

**FIT4H2**

---

# PEM-Elektrolyseur-Systeme Komponenten und Nutzungsszenarien

- Aufbau eines PEM-Elektrolyseur-Systems
- Nutzungsszenarien PEM-Elektrolyseur-Systeme

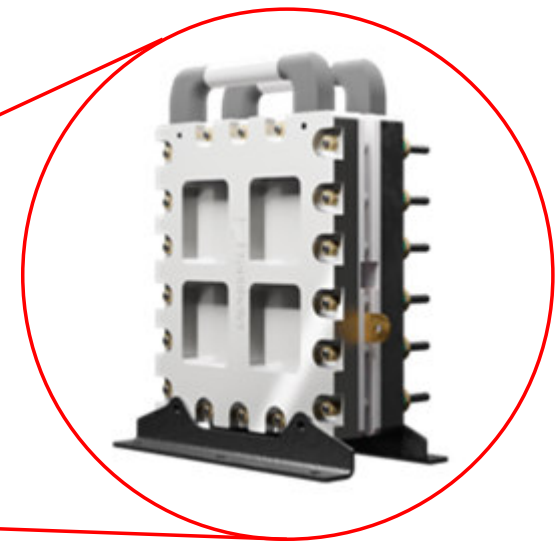
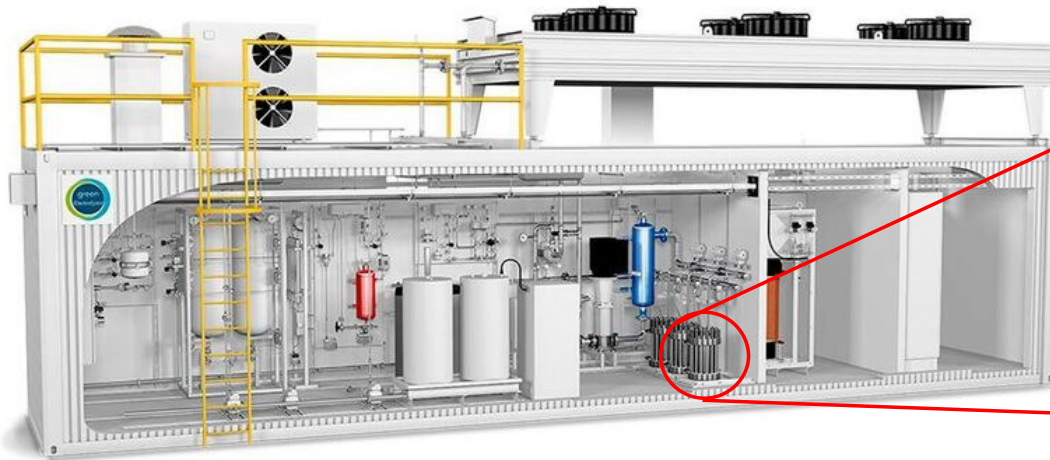


# PEM-Elektrolysesystem

## Agenda

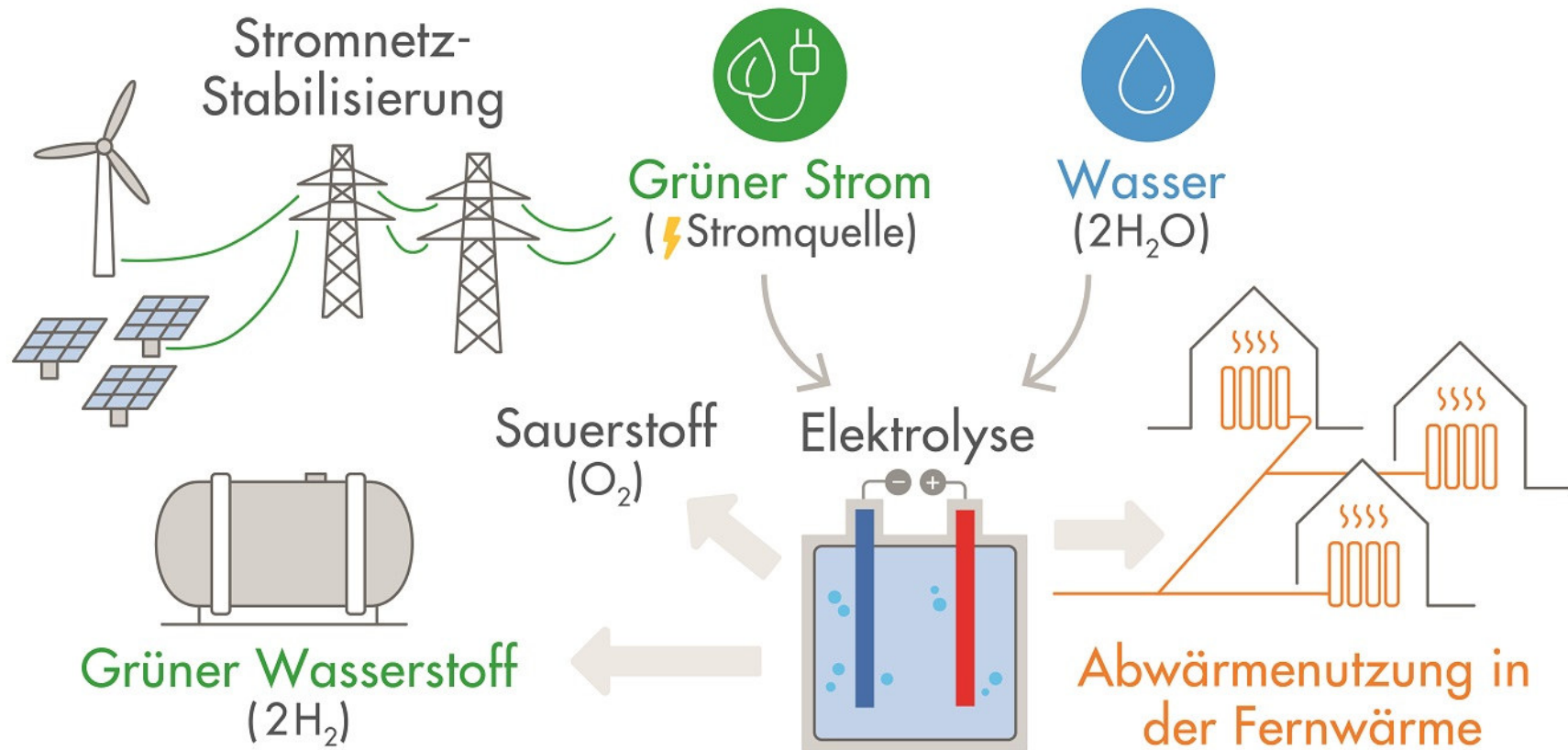
AUFBAU PEM-ELEKTROLYSEURSYSTEME

NUTZUNGSSZENARIOEN



# PEM-Elektrolyseur-Systeme

## Ausgangssituation



# PEM-Elektrolyseur-Systeme

## Aufbau

Kriterium	Eigenschaft
Elektrolyseur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elektrolyseurtyp</li> <li>- Betriebsparameter</li> <li>- Leistungsdaten</li> </ul>
Anwendungsfall	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Umgebungsbedingungen</li> <li>- Besonderheiten des Einsatzszenarios</li> <li>- Integration in bestehende Systeme (Energieversorgung)</li> </ul>
Vorgaben ans System	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bauraum, Kosten, Gewicht</li> <li>- H<sub>2</sub>-Produktion (Menge), H<sub>2</sub>-Reinheit</li> </ul>
Verwendung Produkte	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Speicherung, Nutzung oder Abfuhr</li> <li>- Sicherheitskonzept</li> </ul>



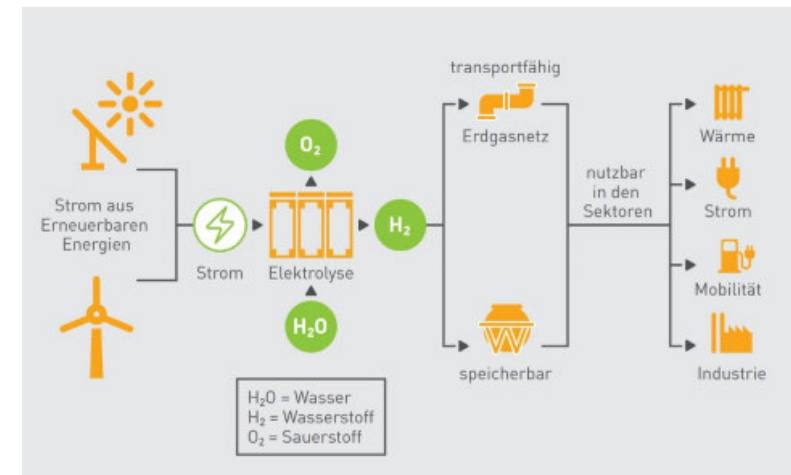
Nutzung von Elektrolyseuren in Kläranlagen



Nutzung von Elektrolyseuren in/für energieintensive Prozesse



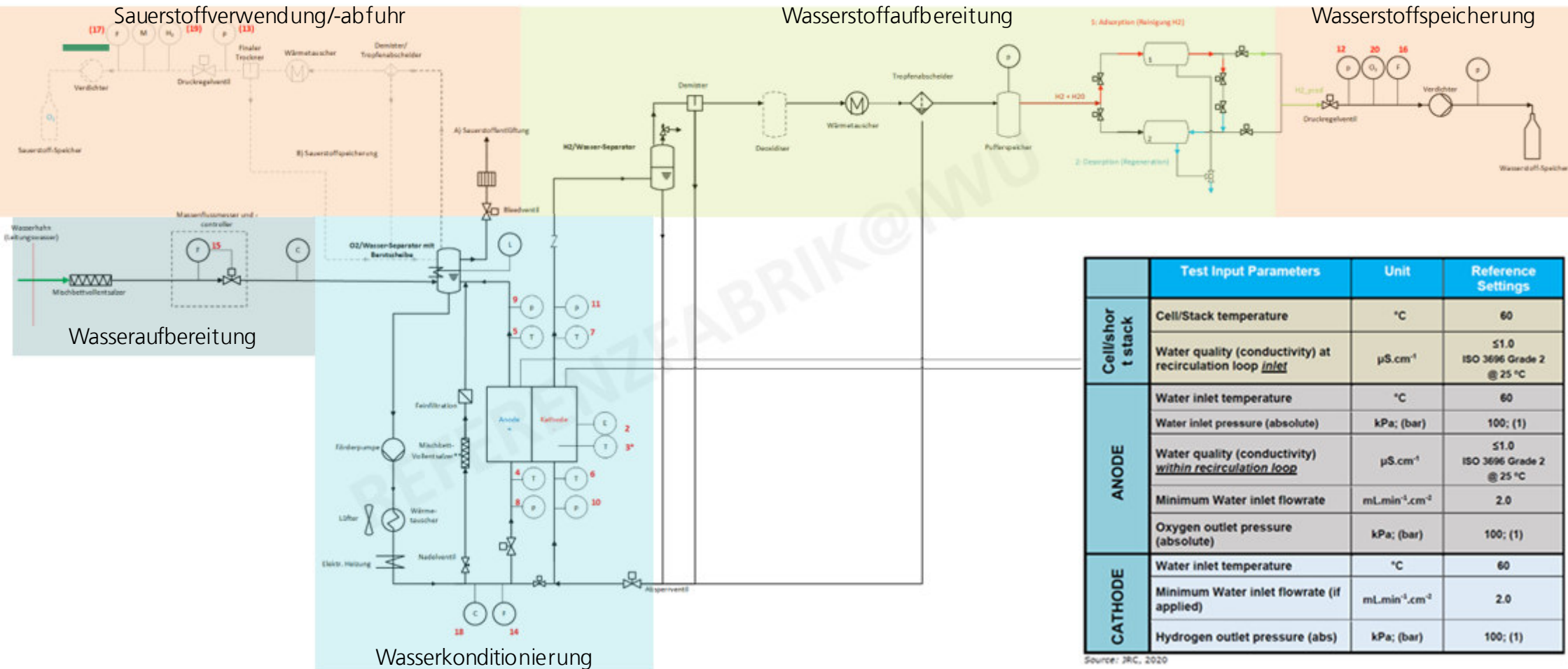
Nutzung von Elektrolyseuren für Aufwertung der Umwelt



Sektor Kopplung/Energiespeicher



# Rohr- und Instrumentenfließschema PEM-Elektrolyseur-Systeme



	Test Input Parameters	Unit	Reference Settings
Cell/short stack	Cell/Stack temperature	°C	60
	Water quality (conductivity) at recirculation loop <u>inlet</u>	$\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	$\leq 1.0$ ISO 3696 Grade 2 @ 25 °C
ANODE	Water inlet temperature	°C	60
	Water inlet pressure (absolute)	kPa; (bar)	100; (1)
	Water quality (conductivity) <u>within recirculation loop</u>	$\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	$\leq 1.0$ ISO 3696 Grade 2 @ 25 °C
	Minimum Water inlet flowrate	$\text{mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	2.0
	Oxygen outlet pressure (absolute)	kPa; (bar)	100; (1)
CATHODE	Water inlet temperature	°C	60
	Minimum Water inlet flowrate (if applied)	$\text{mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	2.0
	Hydrogen outlet pressure (abs)	kPa; (bar)	100; (1)

Source: JRC, 2020

# Wasseraufbereitung

## Planung

- Ziel: abhängig von Rohwasser (Ausgangssituation) erforderliche Wasserreinheit gewährleisten
- Erforderlich: Reinstwasser

### Wasser:

- Qualität und Quantität Rohwasser (Meerwasser, Brauchwasser, Oberflächenwasser, Brunnenwasser, etc.)
- Wasseranalyse Rohwasser, wichtige Parameter:  
Qualität und Quantität von Anionen ( $\text{Cl}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{PO}_4$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{SiO}_2$ , ...) und Kationen ( $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{K}$ , ...) chem.-phys. Kenngrößen (Temperatur, PH-Wert, Leitfähigkeit/Total dissolved solids) für Anlage (Fe, Mn, freies Chlor, TSS (Total suspended solids), SDI (Silt Density Index))
- Reservekapazitäten?
- Projektumfang/-größe:  $\text{kg H}_2$  bzw. MW?
- Elektrolyseur-Typ
- Materialanforderungen
- Geeignete Dimensionierung von Speisewasseraufbereitung und Speicher

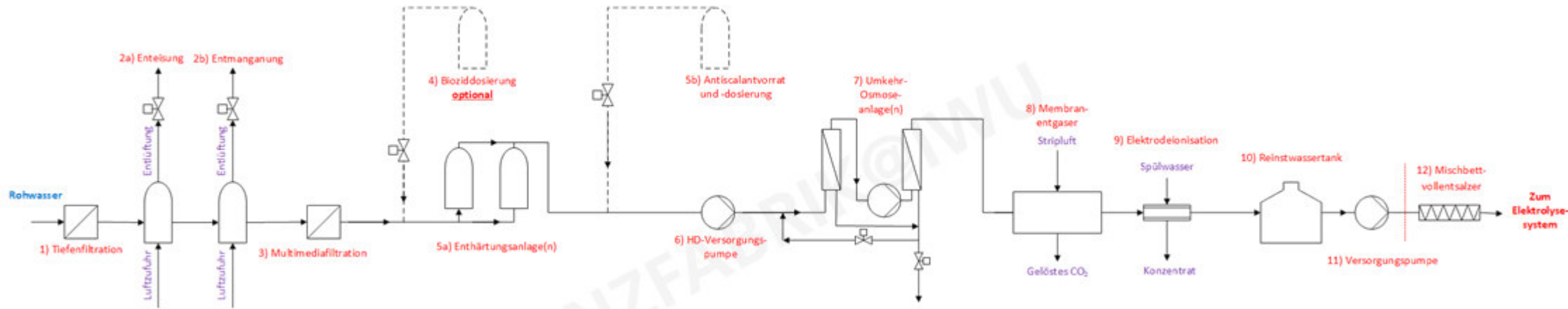
### Weiterführende Aspekte:

- Anlagen- und Steuerungskonzept
- Service und Schulungen



# Wasseraufbereitung

## Anlagenkonzept



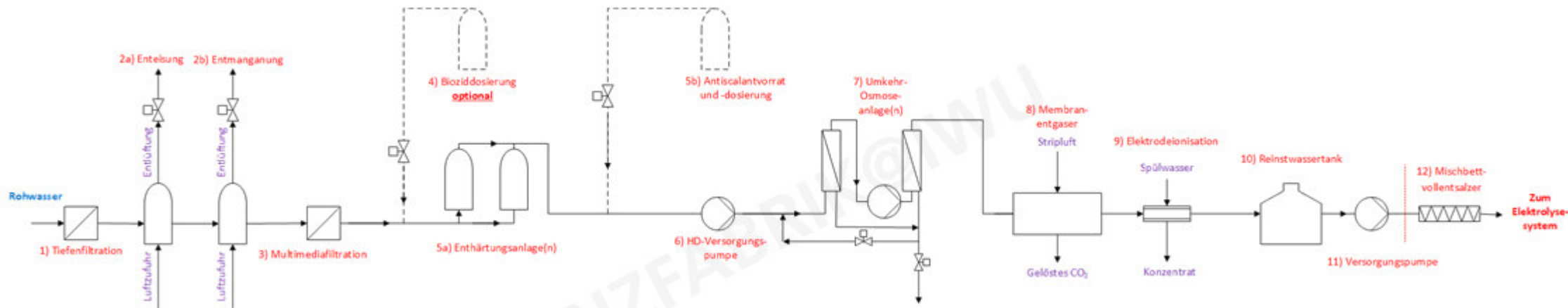
1. Tiefenfiltration: mechanische, physische und chemische Filtration von ungelösten Partikeln oder Kolloiden
2. Enteisung/Entmanganung: Luft als Oxidator
3. Multimediafilter: Entfernung des oxidierten Fe-/Mn-Partikel
4. Bioziddosierung: Substanzen zur Algen-, Pilz und/oder Bakterienbekämpfung
5. a) Enthärtungsanlage: Austausch von Härtebildnern mit Natrium-Ionen
5. b) Antiscalant: Stabilisierung des Härtegrades
6. Hochdruckpumpe: Einstellung Arbeitsdruck Umkehr-Osmose-Anlage
7. Umkehr-Osmose-Anlage: Durch Triebkraft Druck Filtration an semipermeable Membran



Beispielhafte Darstellung Umkehr Osmose-Anlage mit Filtration und HD-Versorgungspumpe

# Wasseraufbereitung

## Anlagenkonzept



8. Membranentgasung: Entfernung von gelöstem  $\text{CO}_2$
9. Elektrodeionisation: Entfernung restlicher Anionen und Kationen
10. Reinstwassertank: Vorratstank für Elektrolysesystem
11. Versorgungspumpe: Einstellung Arbeitsdruck Wasserversorgung Elektrolysesystem
12. Mischbettvollentsalzer: Entfernung neu gebildeter/ausgelöster Anionen und Kationen

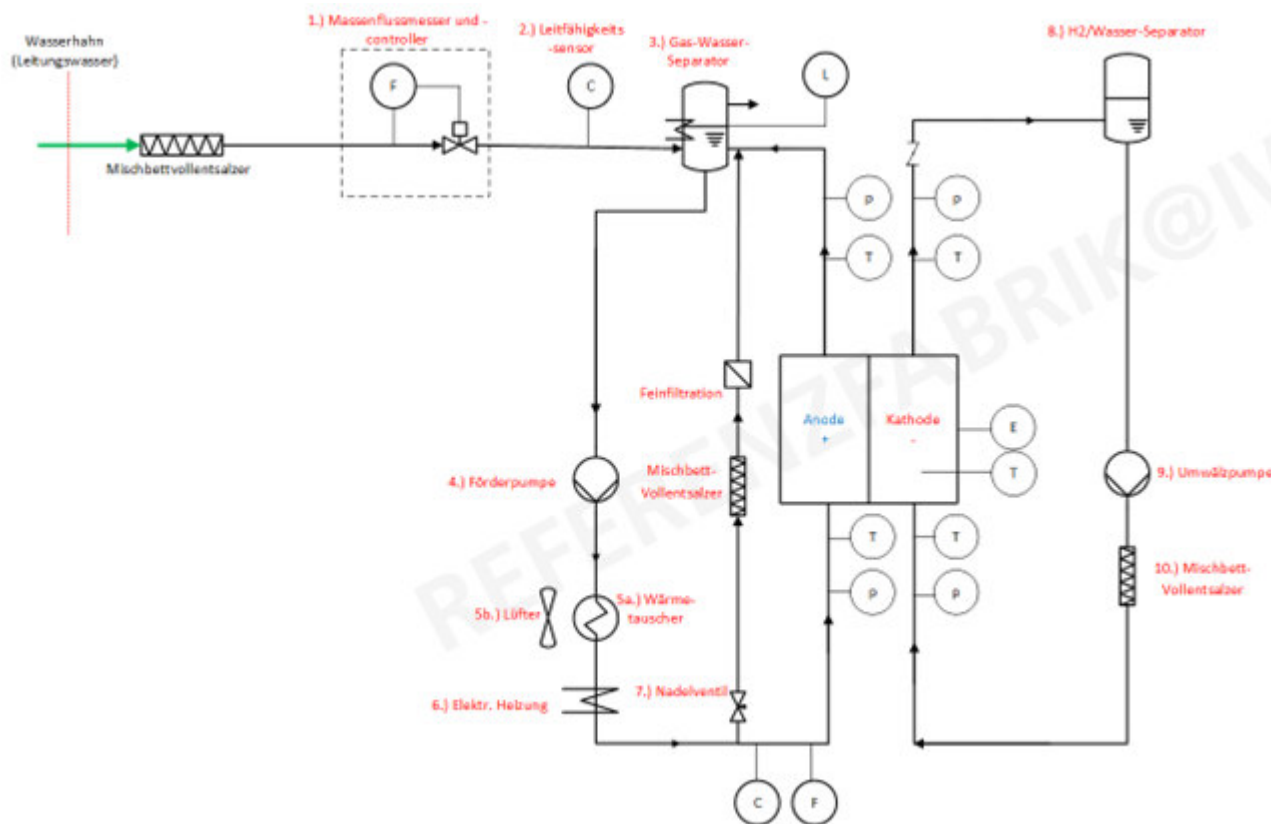


Elektrodeionisation mit  
Steuereinheit und Prozessüberwachung



# Wasserkonditionierung

## Anlagenkonzept

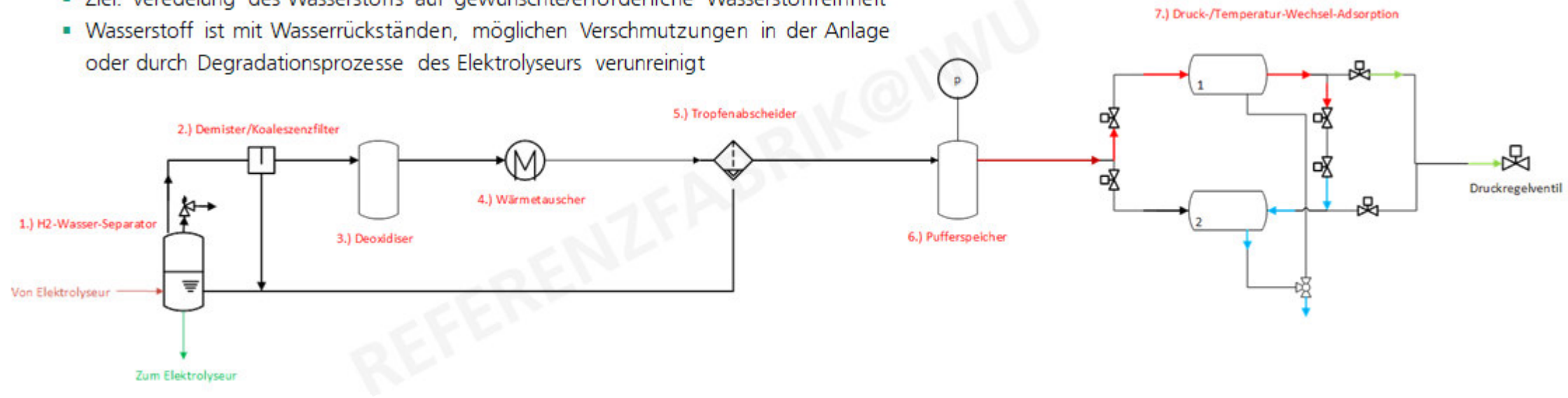


1. MFM/MFC: Bedarfsgerechte Wasserzufuhr und Berechnung Wasserverbrauch pro erzeugten Wasserstoff
2. Leitfähigkeitssensor: Überwachung Wasserqualität
3. Sauerstoff-Wasser-Separator & Vorratsbehälter Reinstwasser
4. Förderpumpe: Wasserversorgung (Reaktion und Kühlung)
5. Wärmetauscher mit Lüfter: Abfuhr Abwärme
6. Heizung: Kaltstartoption
7. Nadelventil: Steuerung Bypass Wasserqualität
8. Wasserstoff-Wasser-Separator & Vorratsbehälter Reinstwasser
9. Zirkulation 2. Wasserkreislauf

# Wasserstoffaufbereitung

## H2-Wasser-Separator

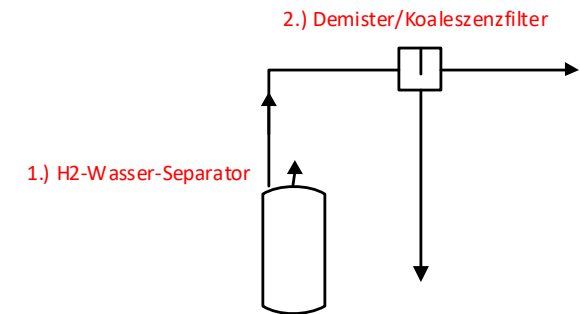
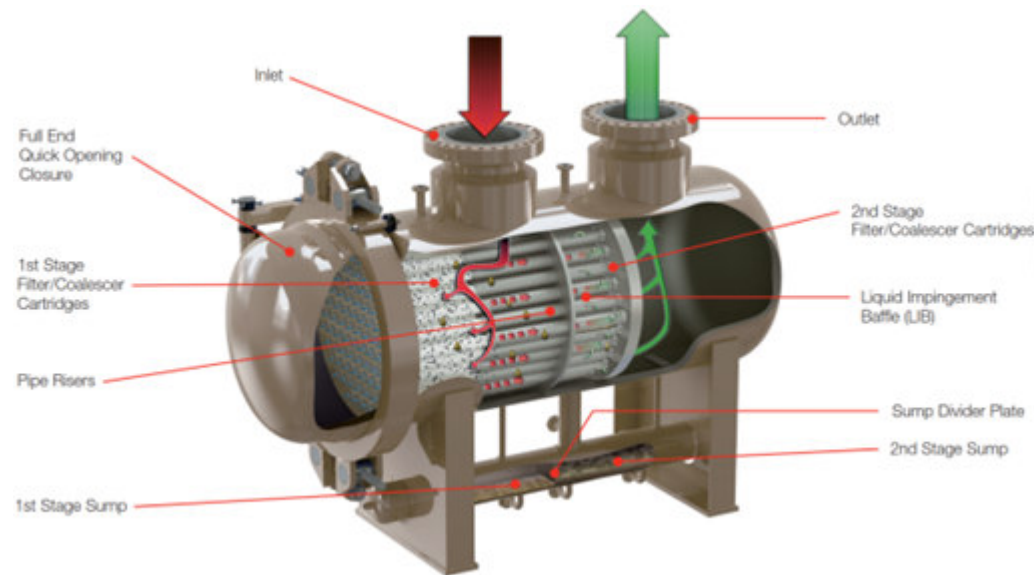
- Ziel: Veredelung des Wasserstoffs auf gewünschte/erforderliche Wasserstoffreinheit
- Wasserstoff ist mit Wasserrückständen, möglichen Verschmutzungen in der Anlage oder durch Degradationsprozesse des Elektrolyseurs verunreinigt



1. H2-Wasser-Separator: Trennung durch Schwerkraft und Verweilzeit (ggf. auch Zentrifugalkraft)

# Wasserstoffaufbereitung

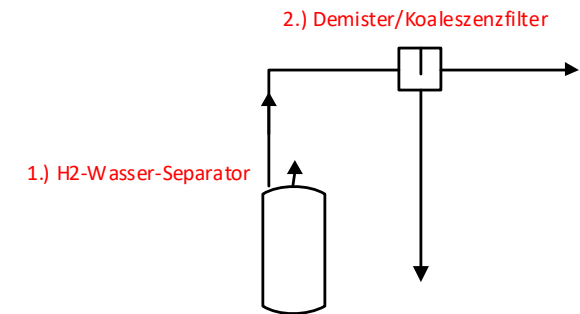
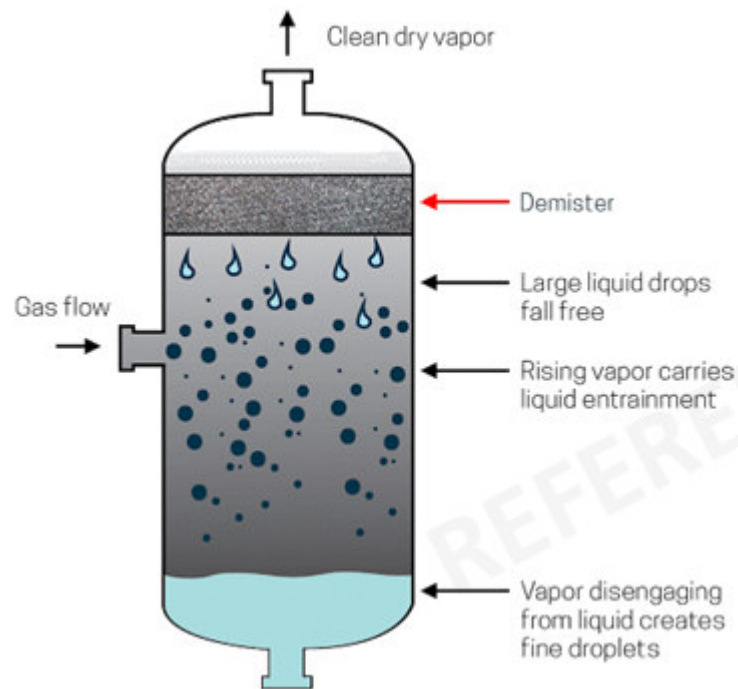
## Koaleszenz Filter



1. Flüssige Aerosole und Tröpfchen im Gasstrom treten in den Koaleszenzfilter ein → Mikrofasern aus Borosilikatglas, um die Aerosole und Tröpfchen einzufangen.
2. flüssigen Aerosole passieren Filterelement → strömung entlang der Fasern → koaleszieren zusammen und nehmen an Größe zu.
3. große Tröpfchen durchbrechen Außenseite des Filterelements durchbrechen → laufen durch Schwerkraft an der Seite nach unten und sammeln sich zum Ablassen in der Schale des Filtergehäuses.
4. saubere und trockene Gas zum Ausgang des Filtergehäuses.

# Wasserstoffaufbereitung

## Demister



- Demister nutzen die, im Vergleich zum gasförmigen Medium, höhere Trägheit der Flüssigkeitstropfen
- Gute Abscheideleistungen werden über mehrmaliges Umlenken der Gasströmung um die Drähte herum erreicht  
→ Bei der Abscheidung strömen die Tröpfchen durch das Drahtgestrick und prallen aufgrund des Trägheitsmomentes auf die Drahtoberfläche → Von dort sammelt sich die Flüssigkeit an den Gestrück-Knotenpunkten, läuft der Schwerkraft folgend zusammen und fällt herunter, wo sie in einem Auffangraum gesammelt wird

# Wasserstoffaufbereitung

## Deoxidiser

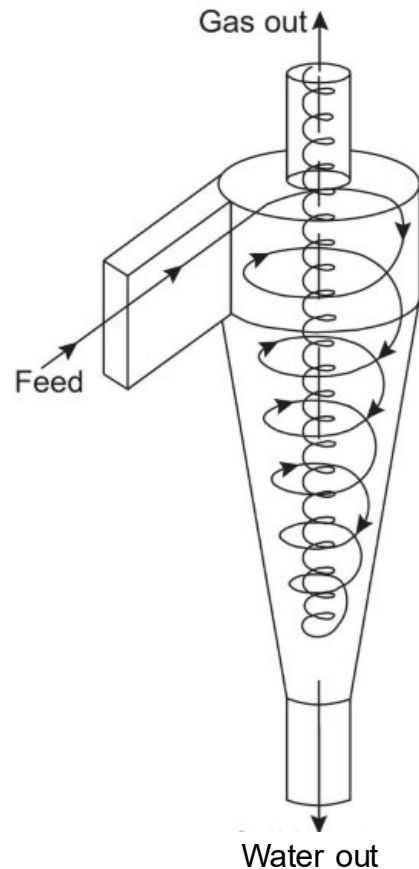


- katalytischer Reaktor
- auf Basis von Palladium/Platin
- 1. auf Oberfläche des Palladium/Platin-Katalysators reagieren Spuren von Sauerstoff (ppm-Bereich) mit Wasserstoff zu Wasser
- 2. exotherme Reaktion → Temperaturerhöhung
- 3. Wärmetauscher benötigt
- 4. Abfuhr kondensiertes Wasser



# Wasserstoffaufbereitung

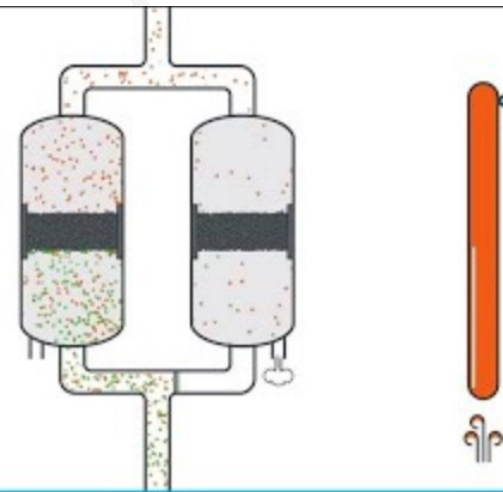
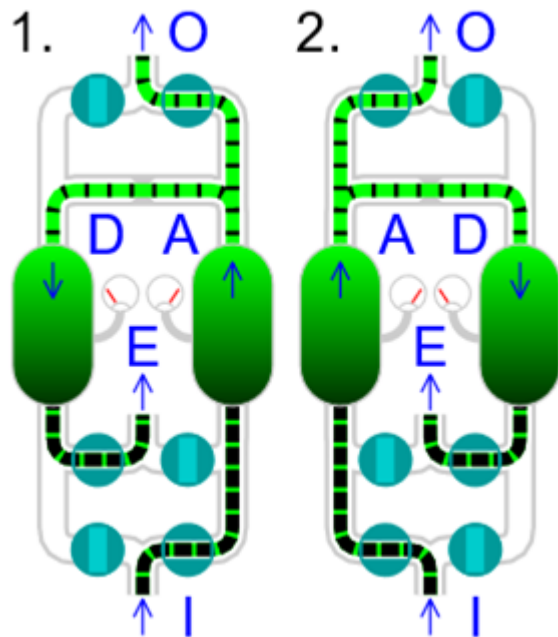
## Tropfenabscheider



- Massenkraftabscheider in technischen Anlagen zur Abscheidung von festen oder flüssigen Partikeln, die in Gasen enthalten sind
  - Als Trennverfahren werden Zentrifugalkräfte verwendet, die durch Erzeugung einer Wirbelströmung entstehen
1. tangentielle Zufuhr über Eintrittsrohr eingeblasen → kreisförmige Bahn
  2. Durch die Verjüngung im Kegel Erhöhung der Drehgeschwindigkeit
  3. Wasser wird durch die Fliehkraft an die Kegelwände geschleudert und abgebremst, dass es sich aus der Strömung löst und nach unten in den Auffangbehälter tropft.
  4. Das gereinigte Gas bzw. die Flüssigkeit verlässt den Kegel durch das mittige Tauchrohr nach oben.

# Wasserstoffaufbereitung

## Druck-/Temperatur-Wechsel-Adsorption



Atlas Copco

Chapter 11  
What is PSA gas generation?

# Wasserstoffspeicherung

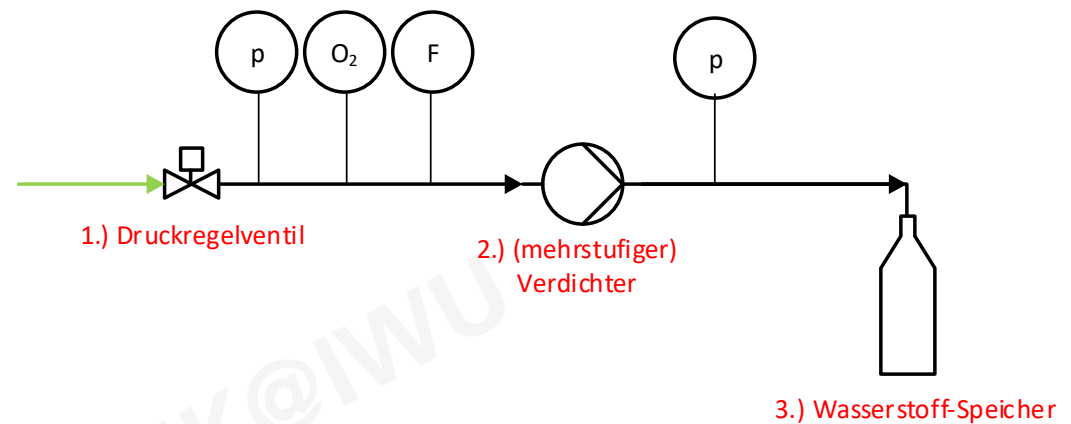
## Hochdruckspeicher



Typ III / IV: Polymer-Drucktanks



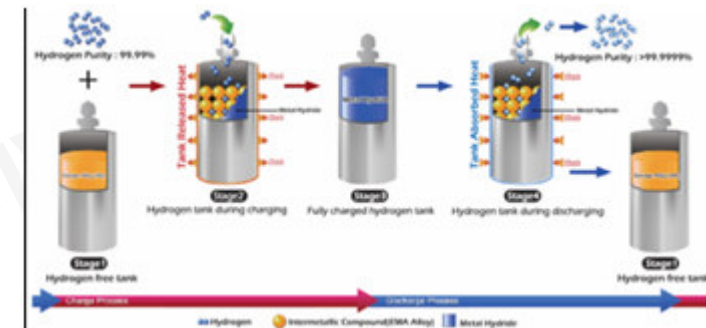
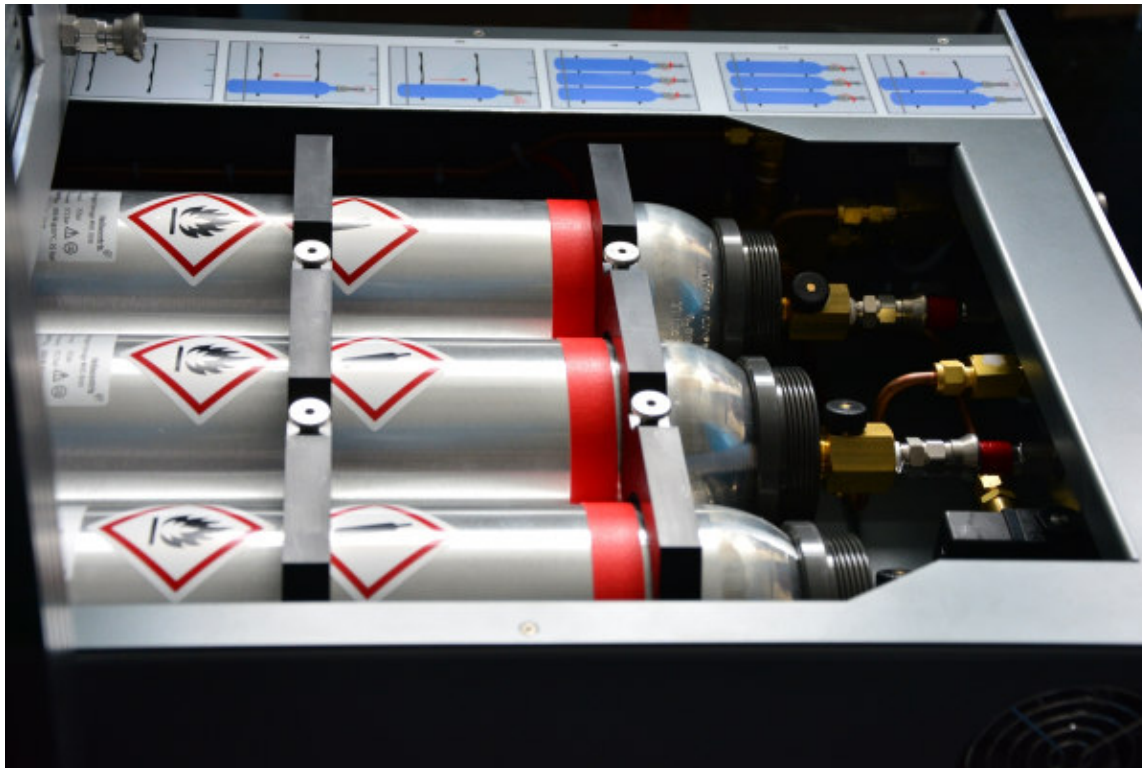
Typ I: Stahl-Gasflasche



- Wasserstoff hat unter Normbedingung (1 barA, 20°C) geringe Dichte 0,089 kg/m<sup>3</sup>
- Komprimierung/Verdichtung ist die geläufigste Speichertechnologie (80% der weltweiten Wasserstoffspeicherung und –Transport)
- Speicherung im „kleinen Maßstab“: Drucktanks
- Herausforderungen:
  - ➔ Herstellungs- und Entwicklungskosten für Polymer-Hochdrucktanks
  - ➔ Energiebedarf der Verdichtung (10% des Energiegehaltes von H<sub>2</sub> bei Komprimierung von 1 barA auf 700 bar)

# Wasserstoffspeicherung

## Metallhydridspeicher



- Verschiedene Hydride (ionisch, kovalent und komplexe Hydride) können eingesetzt werden
- Für reversible Wasserstoffspeicherung müssen sowohl Absorption (Lösung in Metall oder Metalllegierung → Metallhydrid) als auch Desorption (Auslösen von H<sub>2</sub> unter Druckerniedrigung und leichte Wärmezufuhr) anwendbar sein

# Sauerstoffverwendung/-abfuhr

- Stand der Technik: kontrollierte Abgabe des Sauerstoffs an die Umwelt

Bei sauerstoffangereicherten Atmosphären müssen beachtet werden:

- Sauerstoff reagiert mit den meisten Stoffen
- Je höher die Sauerstoffkonzentration und der Druck in der Atmosphäre oder in einem Sauerstoffsysteem sind, umso:
  1. heftiger verläuft die Verbrennungsreaktion bzw. das Feuer,
  2. niedriger sind die zum Starten der Verbrennungsreaktion erforderliche Zündtemperatur und Zündenergie
  3. höher sind die Flammentemperatur und die Zerstörungsfähigkeit der Flamme.





# Nutzungsszenarien

## Wasserstoff – Sauerstoff - Wärme

Wasserstoff:

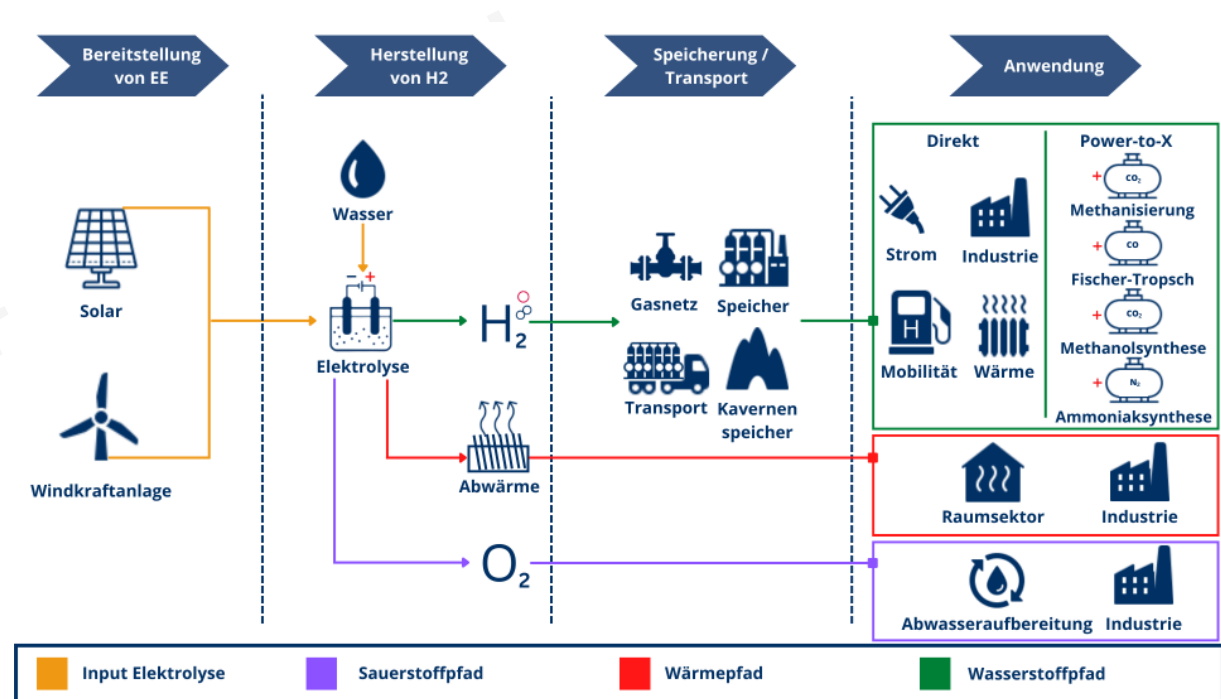
- Energieträger: Brennstoffzelle, Brennstoff für energieintensive Industrien, Wasserstoffverbrennungsmotoren, Kraftstoff für Strahltriebwerken\_oder Raketentreibstoff
- Kohlehydrierung (E-Fuels)
- Ammoniakherstellung (Haber-Bosch-Verfahren)
- Kühlmittel (Turbogeneratoren in Kraftwerken)

Sauerstoff:

- Medizin: Notfallmedizin, chronische Erkrankungen, Therapie
- Technik: Metallurgie, Oxy-Fuel-Anwendungen, Umwelttechnik, chemische Erzeugnisse

Wärme:

- Haushalt/Fernwärme
- Industrielle Prozesse



**FIT4H2**

---

# PEM-Brennstoffzellen-Systeme Komponenten und Nutzungsszenarien

- Aufbau eines Brennstoffzellensystems
- Demonstrator Wasserstofftheke
- **Nutzungsszenarien Brennstoffzellensysteme**



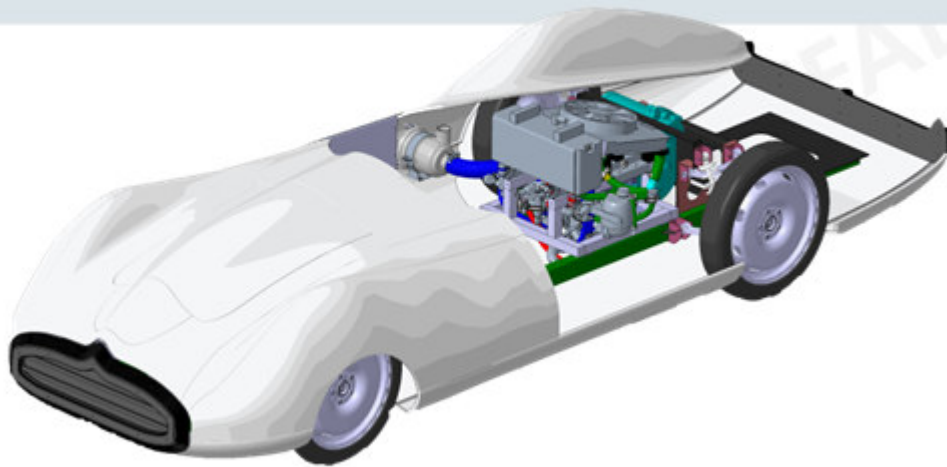
# PEM-Brennstoffzellen-Systeme

## Agenda

AUFBAU BRENNSTOFFZELLENSYSTEM

WASSERSTOFFTHEKE

NUTZUNGSSZENARIOEN



CAD-Entwurf der BZS-betriebenen „Silberhummel“



CAD-Entwurf der „Wasserstofftheke“

# Brennstoffzellen-Systeme

## Aufbau

Kriterium	Eigenschaft
Brennstoffzelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brennstoffzellentyp → benötigte Edukte</li> <li>- Betriebsparameter</li> <li>- Leistungsdaten</li> </ul>
Anwendungsfall	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Umgebungsbedingungen</li> <li>- Besonderheiten des Einsatzszenarios</li> <li>- Mobil oder stationär</li> </ul>
Vorgaben ans System	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bauraum</li> <li>- Kosten</li> <li>- Gewicht</li> <li>- Nutzleistung</li> </ul>
Verfügbarkeit Edukte	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Außenluftabhängiges oder -unabhängiges System</li> <li>- Speicherform Brennstoff</li> </ul>



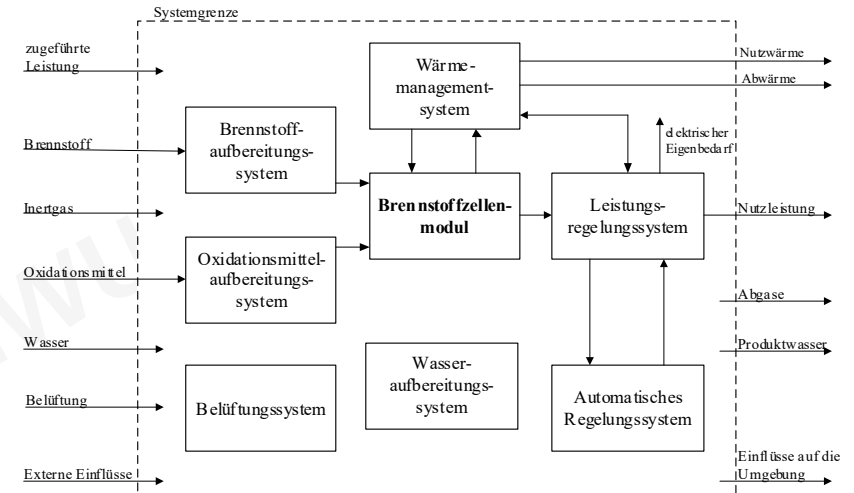
Howaldswerke-Deutsche Werft AG „U212“



Hyundai „Nexo“



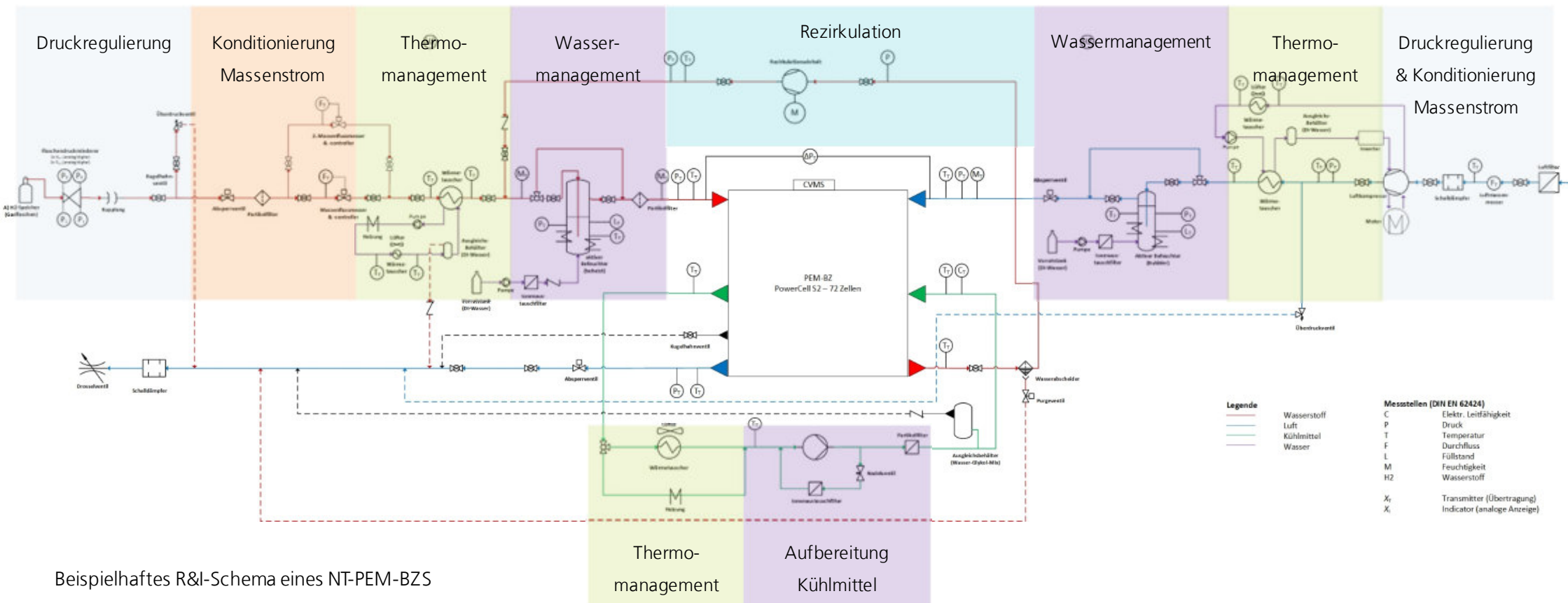
Kryotank im Vergleich zum Druckspeicher



schematischer Aufbau eines Brennstoffzellen-systems nach DIN 62282-2-100

# Rohr- und Instrumentenfließschema NT-PEM-BZS

## Überblick

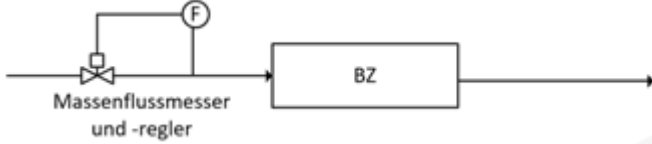
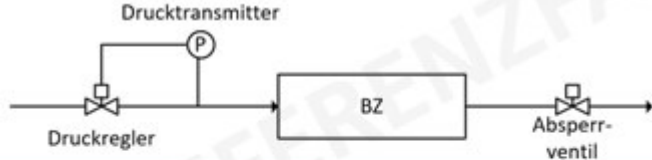
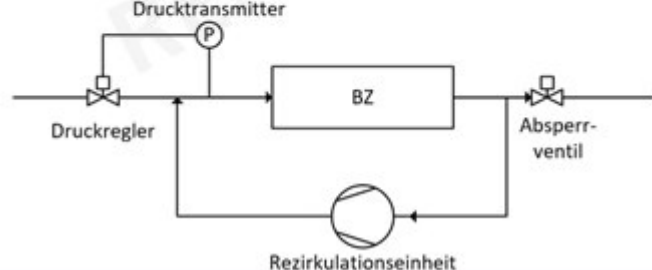


Beispielhaftes R&I-Schema eines NT-PEM-BZS



# Gasversorgungskonzepte

## Anode

Konzept	R&I-Schema	Vorteile	Nachteile
Single-Pass		<p>Geringer apparativer Aufwand:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ minimaler Bauraum</li> <li>■ leichtes System</li> <li>■ geringer Energiebedarf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Hohe Anschaffungs- und Wartungskosten</li> <li>■ Geringer Systemwirkungsgrad → kein Rezirkulieren des überstöchiometrischen Wasserstoffs</li> </ul>
Dead-End		<p>Simpler Systemaufbau:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bedarfsgerechte Kraftstoffzufuhr</li> <li>■ Geringe Bauraumbeanspruchung</li> <li>■ leichtes System</li> <li>■ geringer Energiebedarf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Schlechteres dynamisches Verhalten</li> <li>■ Hohes Risiko von Degradationsprozessen</li> </ul>
Rezirkulieren mittels Kompressor		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Erhöhung Systemeffizienz</li> <li>■ Rezirkulation über gesamten Arbeitsbereich der BZ möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Hohe Kosten</li> <li>■ Größeres Anlagenvolumen</li> <li>■ Leistungsbedarf Kompressor → Einfluss auf BoP</li> <li>■ Erhöhung Anlagengewicht</li> </ul>


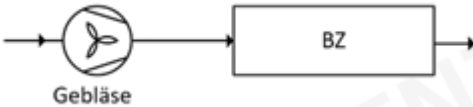
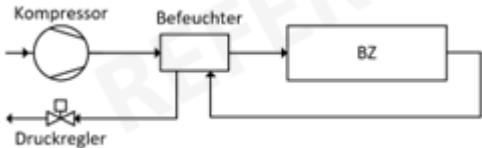
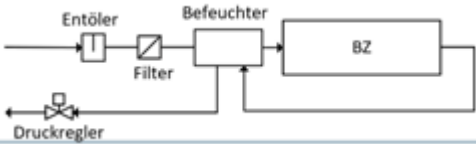
# Gasversorgungskonzepte

## Anode

Konzept	R&I-Schema	Vorteile	Nachteile
Rezirkulieren mittels Ejektor		<ul style="list-style-type: none"> <li>Rezirkulieren → Steigerung Systemeffizienz</li> <li>geringe Bauraumbeanspruchung</li> <li>Geringe Gewichtsbelastung</li> <li>Geringe Kosten</li> <li>Kein Einfluss auf BoP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Auslegung auf ein Betriebspunkt</li> <li>Bei Betrieb im gesamten Arbeitsbereich mehrere Ejektoren notwendig → hoher apparativer Aufwand</li> </ul>
Rezirkulieren mittels Rückschlagventilen		<ul style="list-style-type: none"> <li>Rezirkulieren → Steigerung Systemeffizienz</li> <li>geringe Bauraumbeanspruchung</li> <li>Geringe Gewichtsbelastung</li> <li>Geringe Kosten</li> <li>Kein Einfluss auf BoP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hoher Anspruch an Steuerung und Regelung von Sensoren und Aktoren</li> <li>Volatiler Betrieb → Subsystemübergreifend</li> </ul>

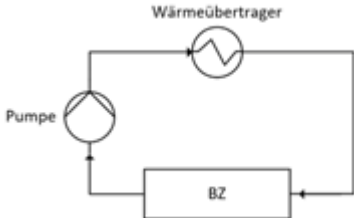
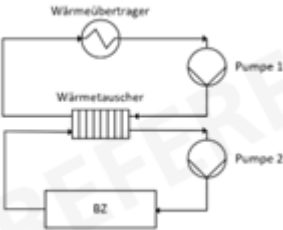
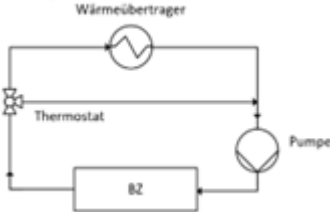
# Gasversorgungskonzepte

## Kathode

Konzept	R&I-Schema	Vorteile	Nachteile
Selbstatmende BZ ( $P_{BZ} < 100 \text{ W}$ )		<ul style="list-style-type: none"> <li>kein Luftversorgungssystem notwendig</li> <li>Keine separate Kühlung notwendig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elektrische Leistung von Diffusionskoeffizient abhängig → keine Regulierung der Luftversorgung möglich</li> <li>Kein Einfluss auf Wasser- und Wärmemanagement</li> </ul>
Luftversorgung mit Gebläse ( $1 \text{ kW} > P_{BZ} > 100 \text{ W}$ )		<ul style="list-style-type: none"> <li>konstanter Betrieb durch Regulierung der Eduktzufuhr</li> <li>Luftkühlung möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kein Einfluss auf Wasser- und Wärmemanagement</li> </ul>
Luftversorgung mit Kompressor ( $1 \text{ kW} < P_{BZ}$ )		<ul style="list-style-type: none"> <li>Leistungsregulierung möglich</li> <li>Einfluss auf Wasser- und Wärmemanagement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hoher apparativer Aufwand</li> <li>schlechte BoP</li> </ul>
Druckluftnetz		<p>Abhängig von Betrachtungsweise:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Verbesserte BoP</li> <li>Geringer Bauraum</li> <li>Geringere Kosten</li> <li>Geringeres Gewicht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hoher Anspruch an Luftaufbereitung</li> <li>Nur bei stationären Systemen &amp; verfügbarem Druckluftnetz möglich</li> </ul>

# Kühlkonzepte

## Überblick

Konzept	R&I-Schema	Vorteile	Nachteile
„einfacher“ Kühlkreislauf		<p>Geringer apparativer Aufwand</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>minimaler Bauraum</li> <li>leichtes System</li> <li>geringer Energiebedarf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Trägheit bei Regulierung der Kühlmitteltemperatur</li> <li>Schlechtes Kaltstartverhalten</li> <li>Geringer Systemwirkungsgrad (Abwärme)</li> </ul>
Double-Loop		<ul style="list-style-type: none"> <li>Betriebstemperatur BZ variabel einstellbar</li> <li>Nutzung der thermischen Energie (Nutzwärme)</li> </ul>	<p>hoher apparativer Aufwand</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>viel Bauraum</li> <li>schweres System</li> <li>hoher Energiebedarf</li> </ul>
Bypass		<ul style="list-style-type: none"> <li>Betriebstemperatur BZ variabel einstellbar</li> <li>gutes Kaltstartverhalten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geringer Systemwirkungsgrad (Abwärme)</li> </ul>

# Kathodensubsystem

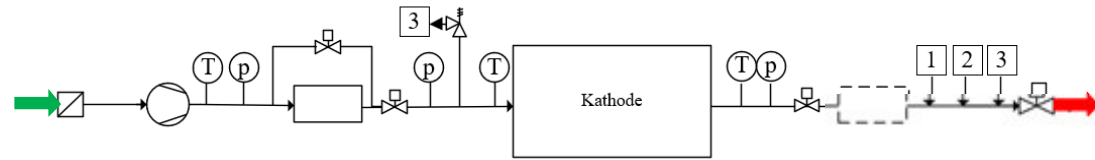
## Überblick



NT-PEM-Brennstoffzelle



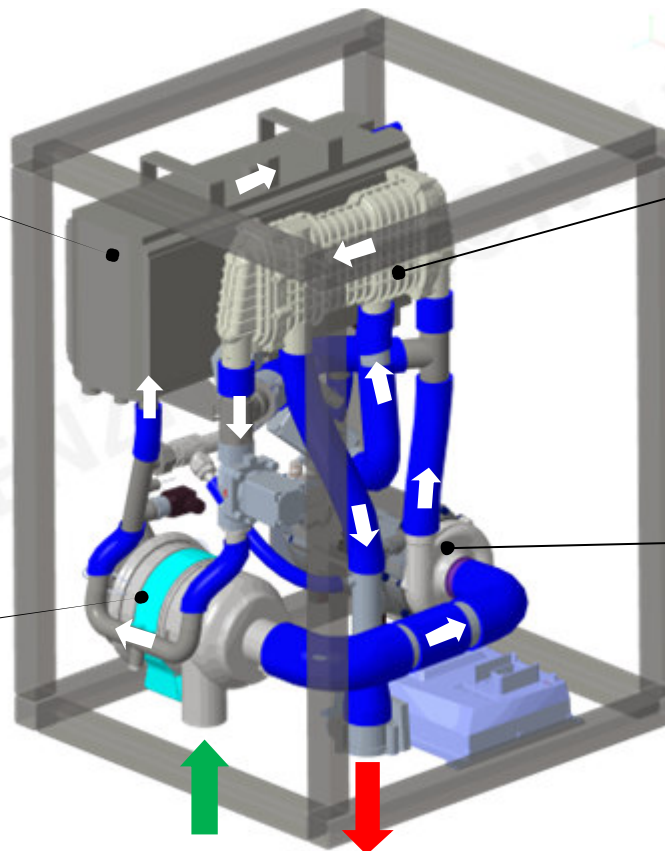
Luftfilter



Luftbefeuchter



Luftkompressor





# Kühlkreislauf

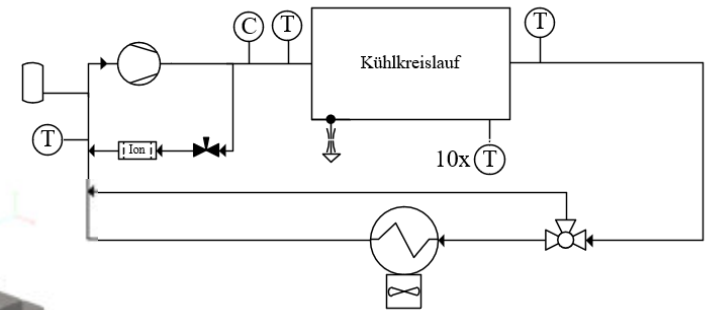
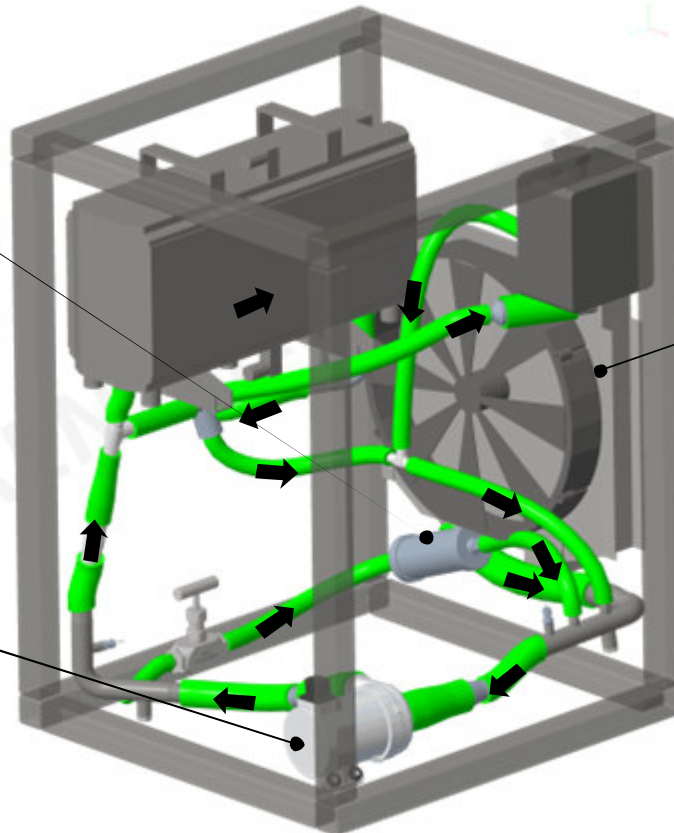
## Überblick



Ionenaustauschfilter



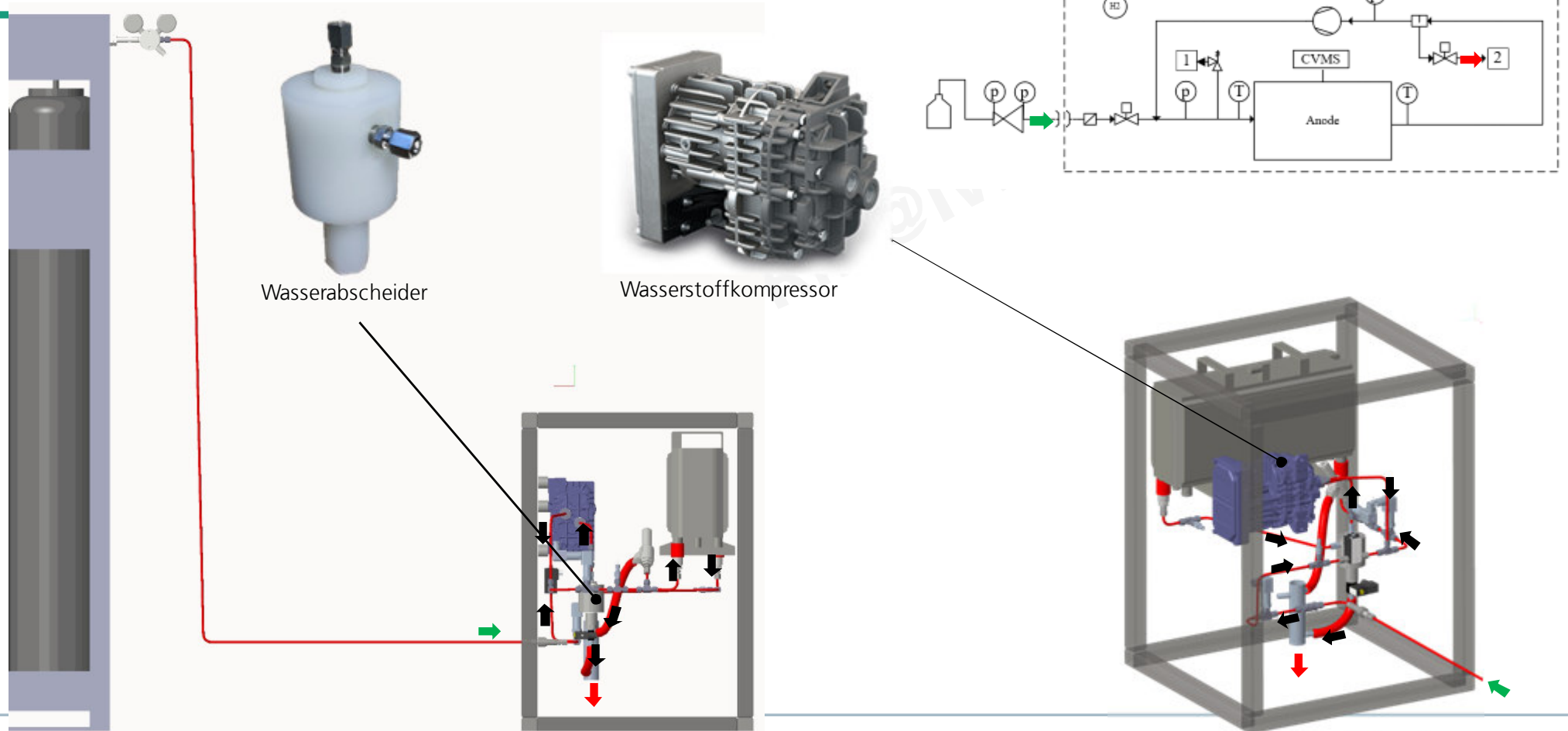
Kühlmittelpumpe



Wasserkühlung

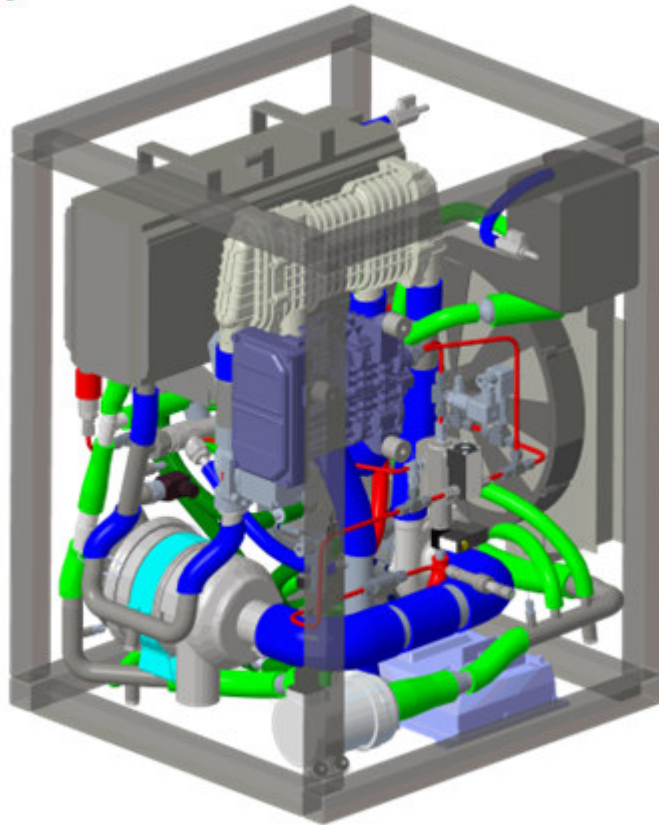
# Anodenkreislauf

## Überblick



# Brennstoffzellen-System

## Gesamtsystem



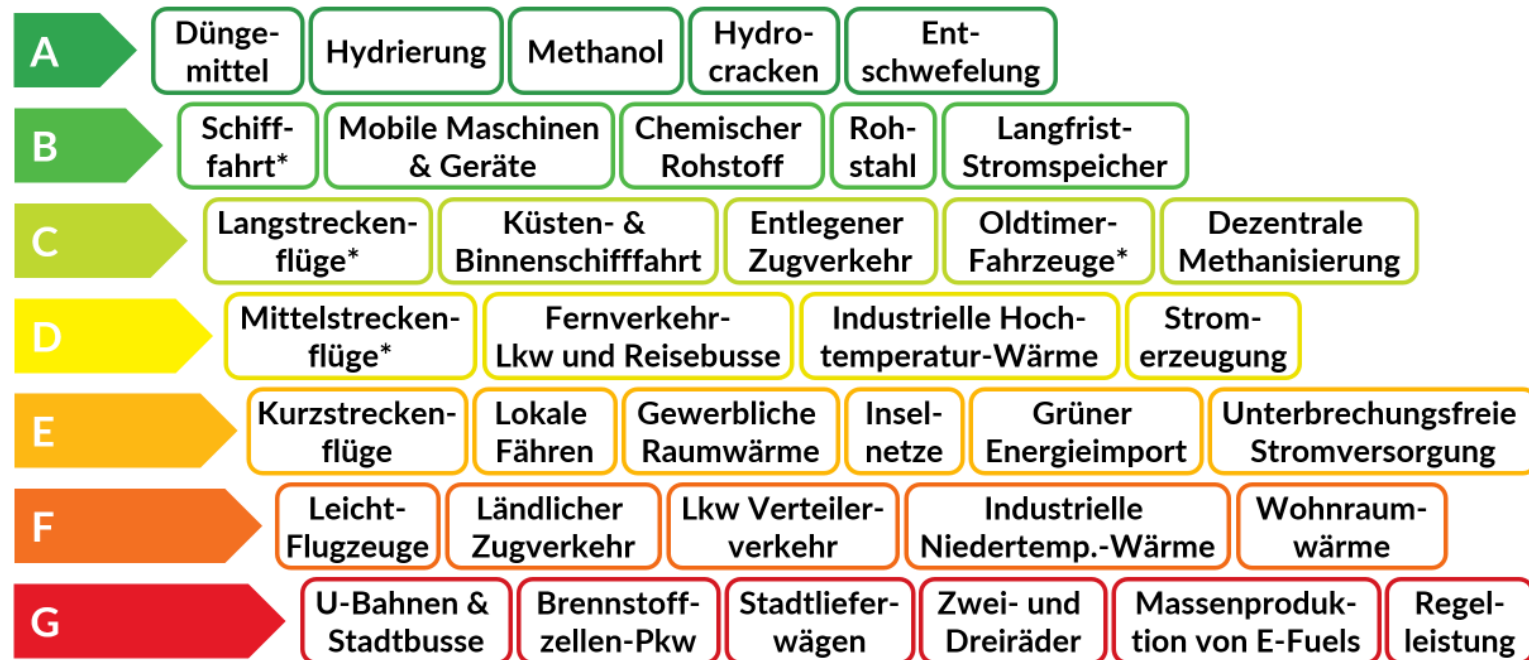
- Anode
- Kathode
- Kühlung



# Sauberer Wasserstoff

## Einsatzbereiche

operativ



strategisch

Quelle: Gregor Hagedorn, Wolf-Peter Schill & Martin Kittel, based on Michael Liebreich/Liebreich Associates, Clean Hydrogen Ladder, Version 4.1, 2021. Concept credit: Adrian Hiel, Energy Cities



# Anwendungen

## Mobil



BMW „iX5“



Victorien Erussard & Jérôme Delafosse „Energy Observer“



Suzuki „Burgman Fuel Cell“



Alstom „Coradia iLint“



NASA „Helios“



Toyota Brennstoffzellen-Gabelstapler

# Anwendungen

## Stationär



Viessmann Vitovalor PT 2



BDBOS- Basisstation mit Brennstoffzellensystem als Notstromversorgung



Microgrid als 20 Fuß Seecontainer-Ausführung  
(Fraunhofer IWU: HygO & HyTrA)



# Anwendungen

Mikro, portable



Micro-PEM Taschenlampe „A2“



NEC Corporation Prototyp-Laptop



Voller Energy „VE100“



Fujitsu/Foma Handyladestation



- Schafft potenziell 10.000 neue Arbeitsplätze
- Stellt Umsätze für Industriepartner in Höhe von 1-5 Milliarden Euro in Aussicht
- Reduziert die Emissionen von CO<sub>2</sub>e/Jahr um ca. 80%
- Emissionen der 6 Industriedemonstratoren  
2022: 0,86 Mt CO<sub>2</sub>e/Jahr  
2030: 0,46 Mt CO<sub>2</sub>e/Jahr  
2045: 0,17 Mt CO<sub>2</sub>e/Jahr



# Kontakt

---

**Stefan Lohberger**  
**Referenzfabrik.H2**  
**Tel. +49 371 5397-1109**  
**[stefan.lohberger@iwu.fraunhofer.de](mailto:stefan.lohberger@iwu.fraunhofer.de)**

[info@referenzfabrik.de](mailto:info@referenzfabrik.de)  
[www.referenzfabrik.de](http://www.referenzfabrik.de)

Fraunhofer IWU  
Reichenhainer Straße 88  
09126 Chemnitz  
[www.iwu.fraunhofer.de](http://www.iwu.fraunhofer.de)



Fraunhofer-Institut für Werkzeug-  
maschinen und Umformtechnik IWU

