

# Markthochlauf Elektrolyse – Chancen und Herausforderungen für Unternehmen in Baden-Württemberg

---

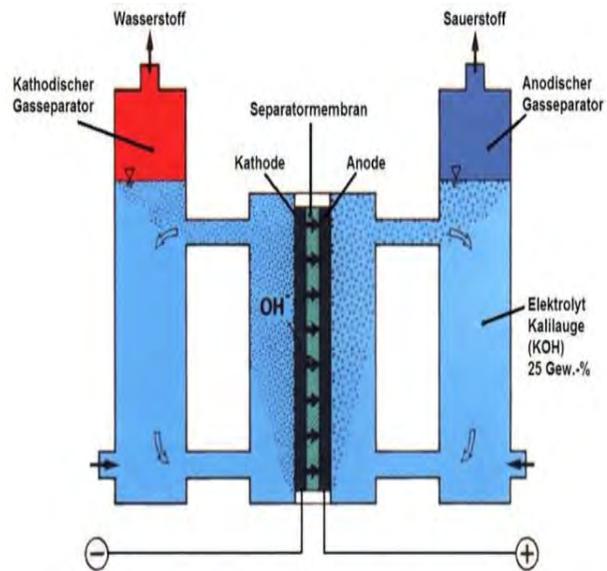
Andreas Brinner, Marc-Simon Löffler

TÜV-SÜD H<sub>2</sub>-Forum Baden-Württemberg, 14. Oktober 2021

Online-Veranstaltung „Wasserstoff im urbanen Raum“



# Wasserstofferzeugung mit Elektrolyse



Vom Elektrolyseprinzip



Zur Wasserstoff-Fabrik

# Agenda

---

- I. ZSW-Kurzvorstellung
- II. Elektrolytische Wasserstofferzeugung? H<sub>2</sub>-Strategien, weltweit, Europaweit, in Deutschland
- III. Wasserstoffmarkt
- IV. Elektrolysehersteller
- V. Kostensenkungspotenziale
- VI. Übersicht Projekt „Elektrolyse made in Baden-Württemberg“
- VII. Kurze Einführung in die Elektrolysetechnik
- VIII. Von der Manufaktur- zur Serien-Bauweise
- IX. Fazit

# Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

1988: Das ZSW wurde als gemeinnützige Stiftung des bürgerlichen Rechts gegründet.

2021: Über 300 Mitarbeiter arbeiten an 3 Standorten in Baden-Württemberg (Umsatz 2020: 46 Mio. €)

## **Stiftungszweck:**

Industriennahe Forschung und Technologietransfer zu erneuerbaren Energien.



# Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

## Stiftungszweck:

Industriennahe Forschung und Technologietransfer zu erneuerbaren Energien.



### Stuttgart:

Photovoltaik mit Solab, Energiepolitik und Energieträger, Zentralbereich Finanzen, IT, Personal & Recht

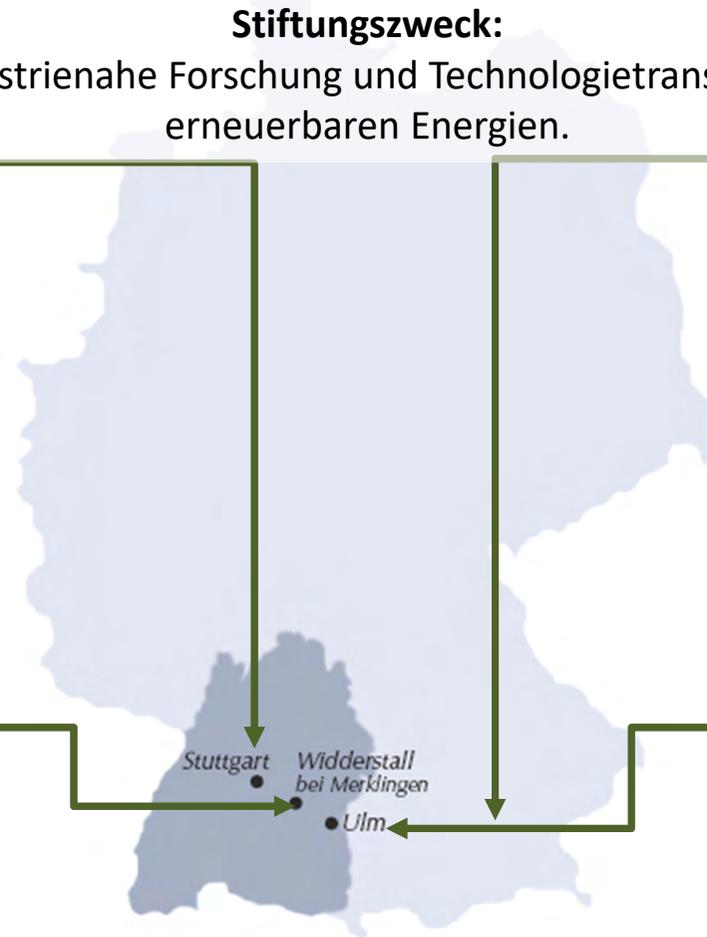


### Widderstall: Solar-Testfeld



### Ulm:

Elektrochemische Energie Technologien und ZSW Labor für Batterietechnologien (eLaB)



# Forschungsthemen

## // ZSW's expertise

- P2X-Elektrolyse
- CO<sub>2</sub>-Bereitstellung aus Biomasse und Luft
- P2X-Standortbegleitung
- Kohlenstoff aus Reststoffen
- Rohstoff-Recycling in Wirbelschicht-Prozessen



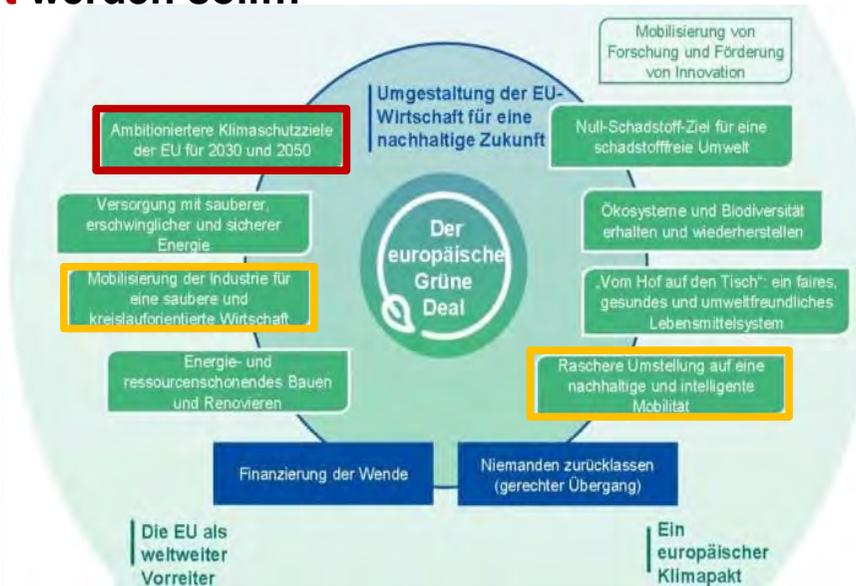
# Ambitionsniveau der neuen EU-Kommission und Wasserstoff-Strategie der Bundesregierung



„Dazu gehört das erste europäische Klimagesetz, mit dem das Ziel der **Klimaneutralität bis 2050 gesetzlich verankert** werden soll...“



„... die **Emissionen [bis 2030] um mindestens 50 Prozent zu senken – oder noch besser sogar um 55 Prozent**“



BM Altmaier, BM Scheuer, BM Müller, PSt Meister, 5.11.2019, Quelle: youtube

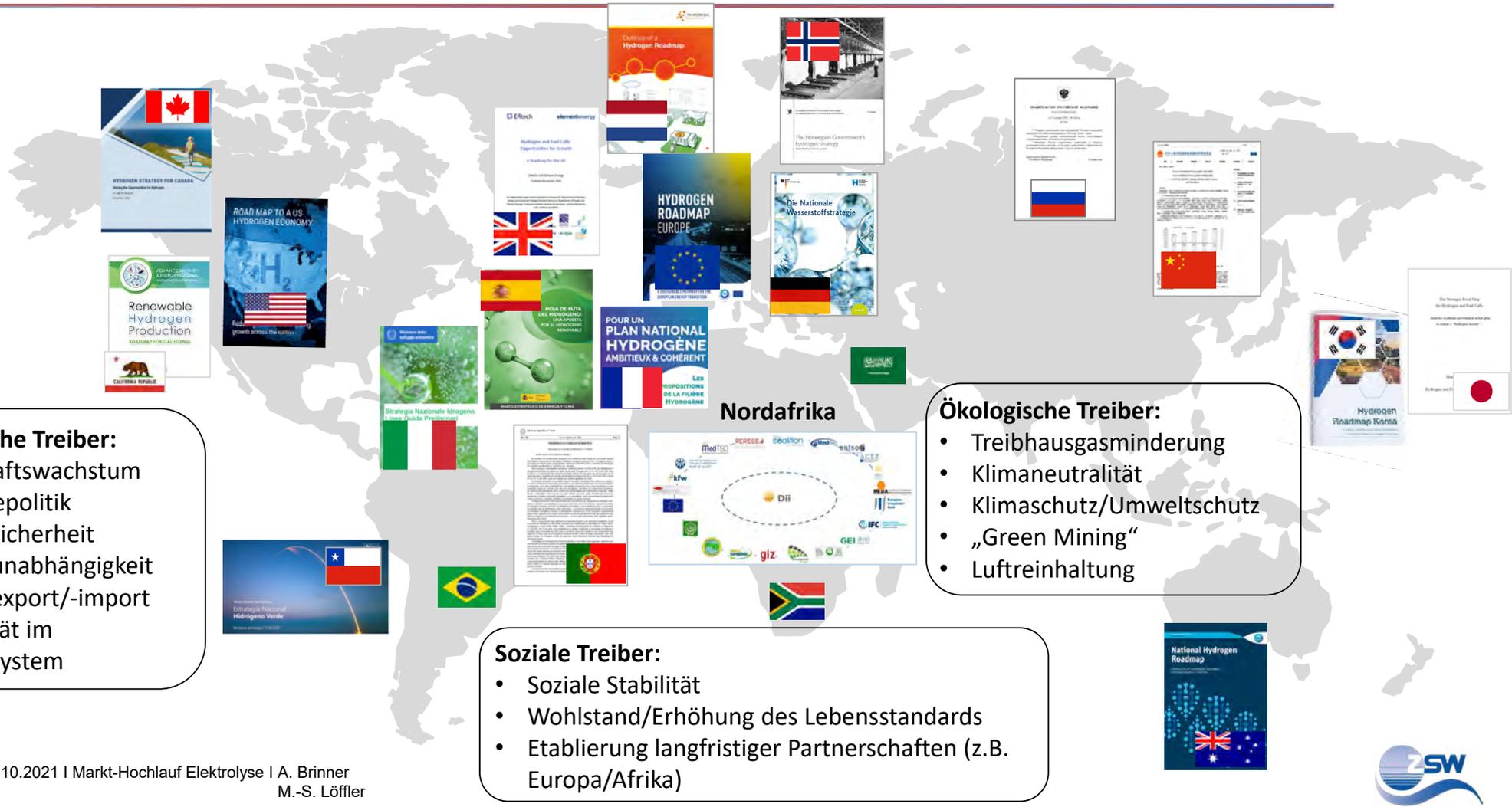


„Wir wollen, dass **Deutschland bei den Wasserstofftechnologien Nr. 1 in der Welt wird!**“  
(Peter Altmaier, 5.11.2019)

➔ Ohne grünen Wasserstoff und seine synthetischen Folgeprodukte sind weder die Klimaziele im Verkehrssektor noch das Ziel der klimaneutralen Produktion in der Industrie erreichbar, selbst wenn die Klimaziele nicht verschärft werden!

# Hohe Marktdynamik bei Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen

Lokale Roadmap-Auswahl weltweit mit unterschiedlichsten Motivationen in verschiedenen Ländern



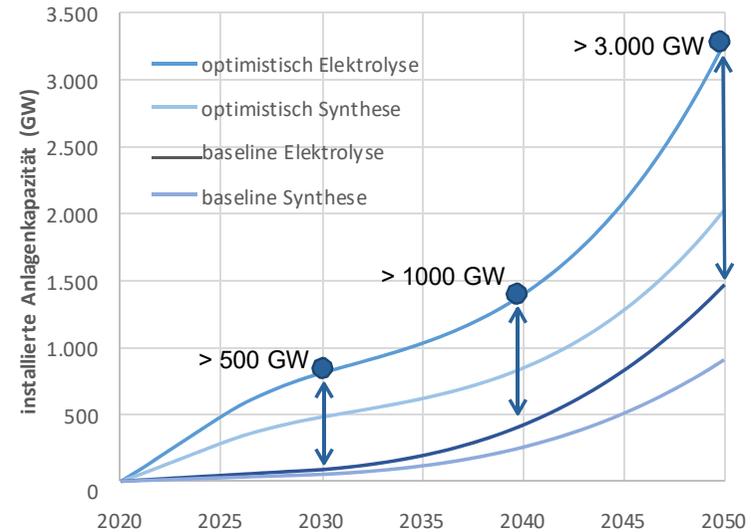
# Exponentiell wachsender Markt für Wasserstoff

Ausbauziele und Marktpotenziale in DE, EU und weltweit



	Elektrolyse installiert 2020	Elektrolyse Ausbauziele 2030	Umsatzpotenzial bis 2030 *
DE	< 0,1 GW	5 GW	ca. 4,5 Mrd.€
EU	< 1 GW	40 GW	ca. 35 Mrd.€

Ausbauziele bis 2030 in Deutschland und der EU  
(gemäß Nationaler und Europäischer Wasserstoff-Strategie 2020)



Ausbaupotenziale bis 2050 weltweit  
(Begleitstudie zum Projekt „reFuels – Kraftstoffe neu denken“)

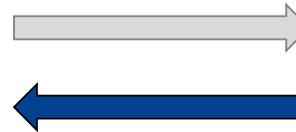
- Alleine in der EU sind bis 2030 **Umsätze von ca. 35 Mrd.€ im Bereich Elektrolyse** zu erwarten.
- Die weltweiten Ausbaupotenziale bis 2050 liegen im Bereich von 1.500 GW bis über 3.000 GW.

\* CAPEX<sub>2020</sub> <1000 €/kW, lineare Kostendegression <700 €/kW bis 2030

# Analyse potenzieller Absatzmärkte für „grünen Wasserstoff“ aus Elektrolyse



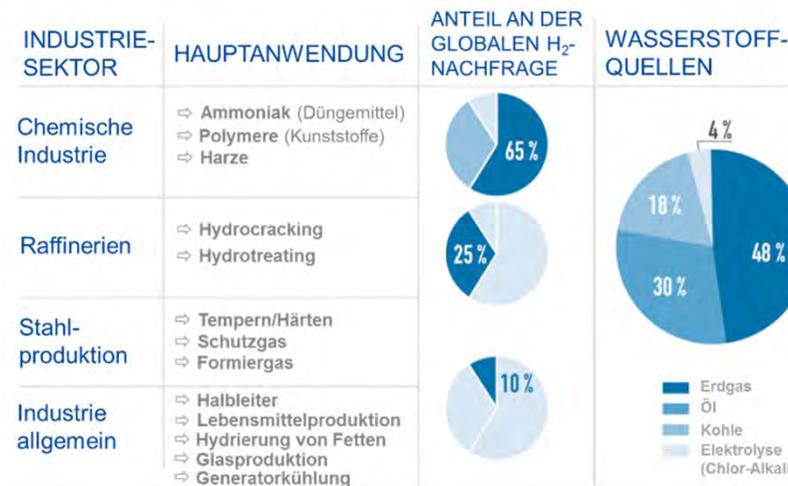
Welt als Lieferanten von Wasserstoff für Deutschland/ Baden-Württemberg



Baden-Württemberg als Technologielieferant für die Welt



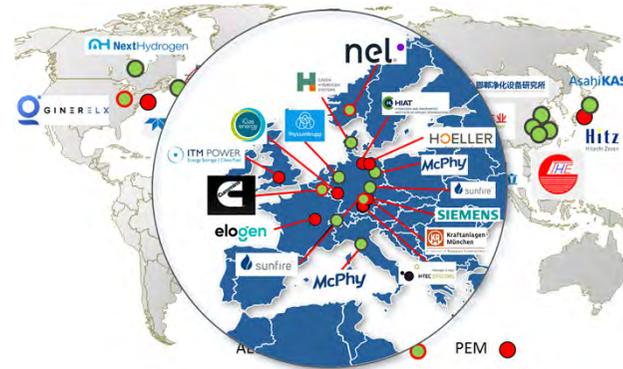
- Der weltweite Wasserstoffverbrauch liegt aktuell bei ca. 70 Mio. t/a (ca. 140 Mrd. €/a bei 2 €/kg).
- Der Energiebedarf entspricht 1,4% des Weltenergiebedarfs.
- Die Erzeugung erfolgt zu > 99% aus fossilen Quellen (ca. 95%) und Chlor-Alkali Elektrolyse (ca. 4%).



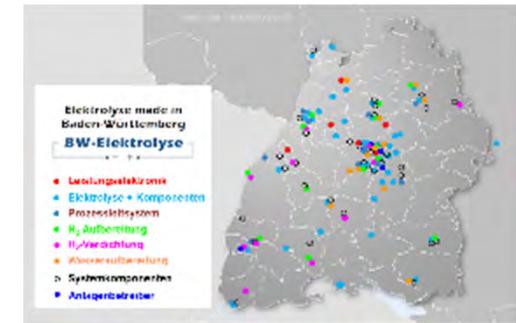


# Elektrolyse: Technologiestand und Industriepotenziale

- Elektrolysetechnologien in Power-to-X-Anwendungen wurden in einer Vielzahl von **Pilotprojekten** erfolgreich in der Praxis demonstriert.
- Die wesentliche Herausforderung besteht nun in der **schnellen Technologieskalierung** und dem **Übergang** von der heutigen **Manufakturbauweise in die Serienfertigung**.
- Es existiert aktuell **kein Elektrolysehersteller in Baden-Württemberg**, jedoch umfangreiche Potenziale im Bereich der Zulieferindustrie.



Elektrolyseanbieter weltweit

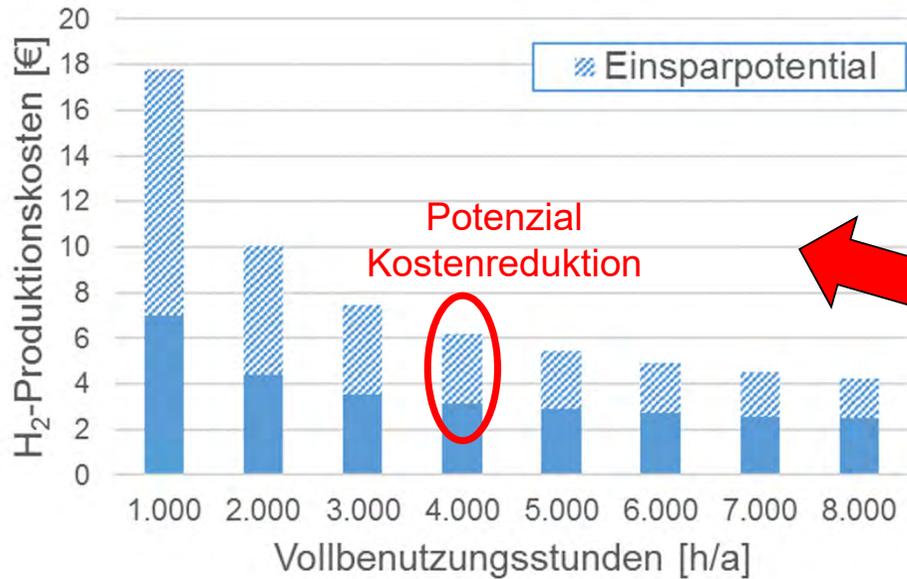


Potenziale Zulieferindustrie in Baden-Württemberg

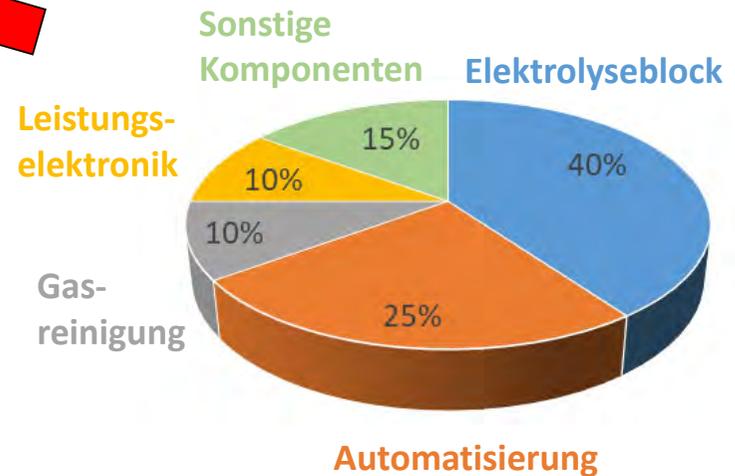


# Leuchtturmprojekt "Power-to-Gas" Baden-Württemberg

Technologie-Roadmap Elektrolyse: Technische Kostensenkungspotenziale, theoretisch



Technologische Hebel für die Kostensenkung:



Die technologische Weiterentwicklung von Elektrolyseblock und Nebenaggregaten ermöglicht in etwa eine Halbierung der H<sub>2</sub>-Produktionskosten.

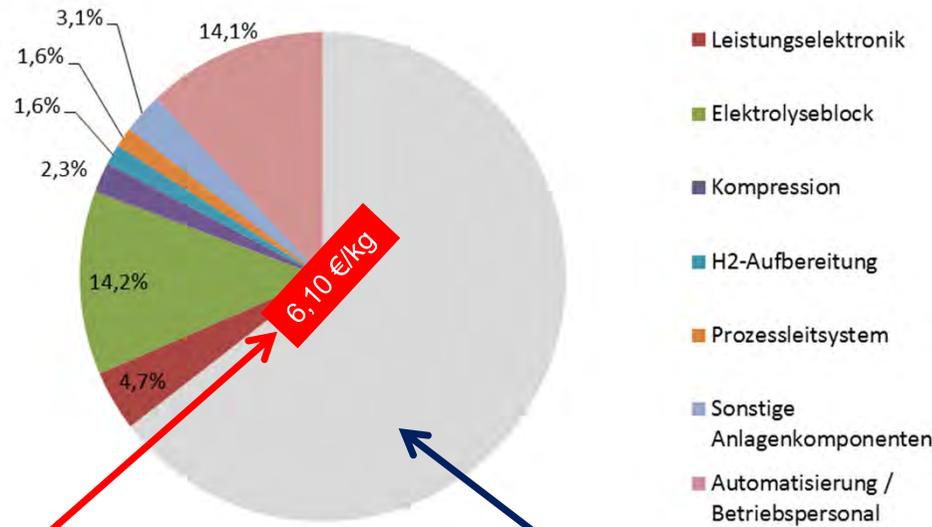
## Randbedingungen

Leistungsklasse 1-5 MW, Beispiel AEL, H<sub>2</sub>-Abgabe: 200 bar, Qualität 5.0  
 Strombezugspreis 35 €/MWh, ohne Abgaben und Steuern, Nutzungsdauer 20 Jahre

# Leuchtturmprojekt "Power-to-Gas" Baden-Württemberg

## Technologie-Roadmap Elektrolyse, realistische Kostensenkungspotenziale

Kostensenkungspotenziale = 1,26 €



**Beispiel**

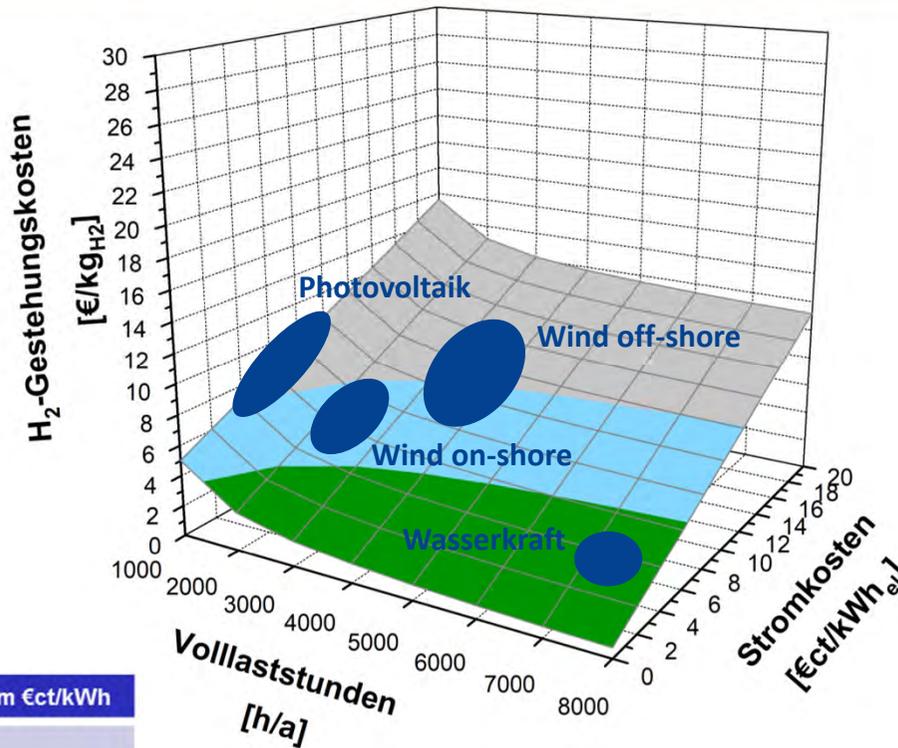
### H<sub>2</sub>-Gestehungskosten mit heutigem Technologiestand für exemplarisch:

- 1 MW, Druck-AEL
- jährliche Volllaststunden: 4.000 h
- Strombezugskosten: 0,03 €/kWh
- H<sub>2</sub>-Abgabe: 200 bar | Qualität 5.0
- vollüberwachter Betrieb
- Abschreibungszeitraum 20 Jahre

potentiell verbleibende H<sub>2</sub>-Gestehungskosten = 4,84 €

# Leuchtturmprojekt "Power-to-Gas" Baden-Württemberg

Strombasierter Wasserstoff; H<sub>2</sub>-Gestehungskosten auf Basis CO<sub>2</sub>-freier Energie



## Technologische Potentiale und Skaleneffekte (100 MW<sub>el</sub>)

Randbedingungen		
Anschlussleistung Elektrolyse	kWe <sub>el</sub>	1000
Invest Elektrolyse+Peripherie	€/kWe	400
Strombezugskosten	€/MWh	variabel
Abschreibungszeitraum	a	20
Zinssatz	%	5
Jährliche Wartungskosten	% Invest	3,5
Strombedarf Peripherie	% Elektrolyse	5
Effizienz Elektrolyse	kWh/Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>	4,0
Effizienz LE	%	95
Verluste RTA	% H <sub>2</sub> roh	3
Strombedarf Verdichtung 200 bar	% H <sub>2</sub> LHV rein	6
Automatisierung (Betriebspersonal)	PA/a	0,3

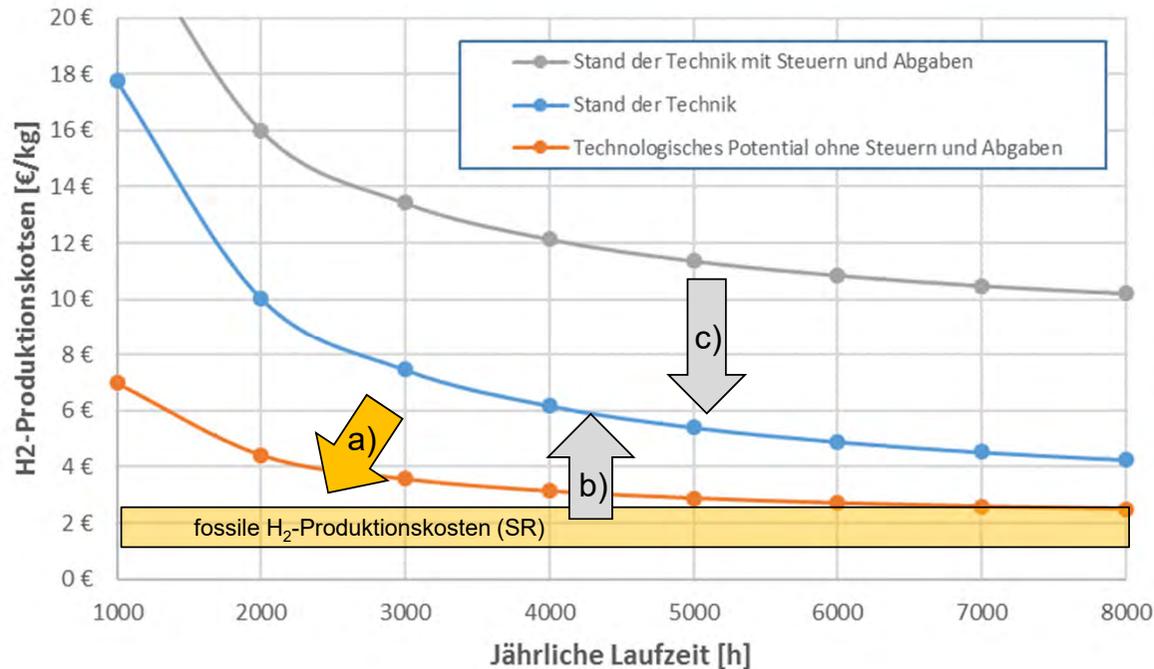
Benchmark H<sub>2</sub> aus Erdgas (@CO<sub>2</sub>-Preis 25€/t)

Benchmark H<sub>2</sub> für Brennstoffzellen-Mobilität

EE-Quelle	Laufzeit (h/a)	Strom €/kWh
PV	1000-1500	4-12
Wind on-shore	2000-3000	4-9
Wind off-shore	3000-4500	8-14
Wasserkraft	7000-8000	3-4

# Leuchtturmprojekt “Power-to-Gas” - Technologie-Roadmap PtG

## Hebel für Wirtschaftlichkeit Strombasierter Wasserstoff



### Annahmen

Technologie: AEL, 1MW

H<sub>2</sub>-Abgabe: 200 bar, Qualität 5.0

Strombezugspreis 35 €/MWh

Abgaben und Steuern 90€/MWh

Nutzungsdauer 20 Jahre

**a) ZSW-Fokus: Technologieentwicklung (Effizienz, Kosten, Scale-up)**

b) Fossile Energie zu billig

→ Schaffung Märkte für grünen Wasserstoff

c) Anpassung ordnungsrechtlicher Rahmen → Ermöglichung Systemkopplung

# „Elektrolyse Made in Baden-Württemberg“

## Initiierung einer Elektrolyse- & Komponentenfertigung im Land

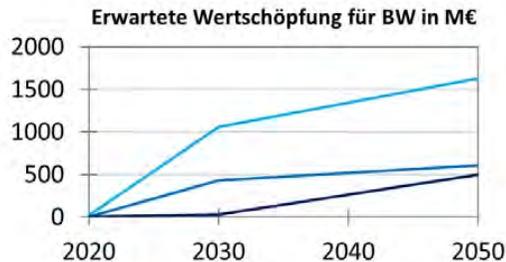
**Industriedialog: Qualifizierung & Aktivierung der Industrie**  
 Initiierung Elektrolyse-Fertigung und Stärkung Zulieferindustrie



**Elektrolyseur „made in Baden-Württemberg“**  
 Industrienaher Prototyp mit hohen Wertschöpfungsanteilen aus BaWü



**Elektrolysepotenziale Baden-Württemberg**  
 Wertschöpfungspotenziale und Handlungsempfehlungen



- Leistungselektronik (6)
- H<sub>2</sub>-Aufbereitung (12)
- Elektrolyse + Komponenten (33)
- H<sub>2</sub>-Verdichtung (12)
- Prozessleitsystem (14)
- Systemkomponenten (57)

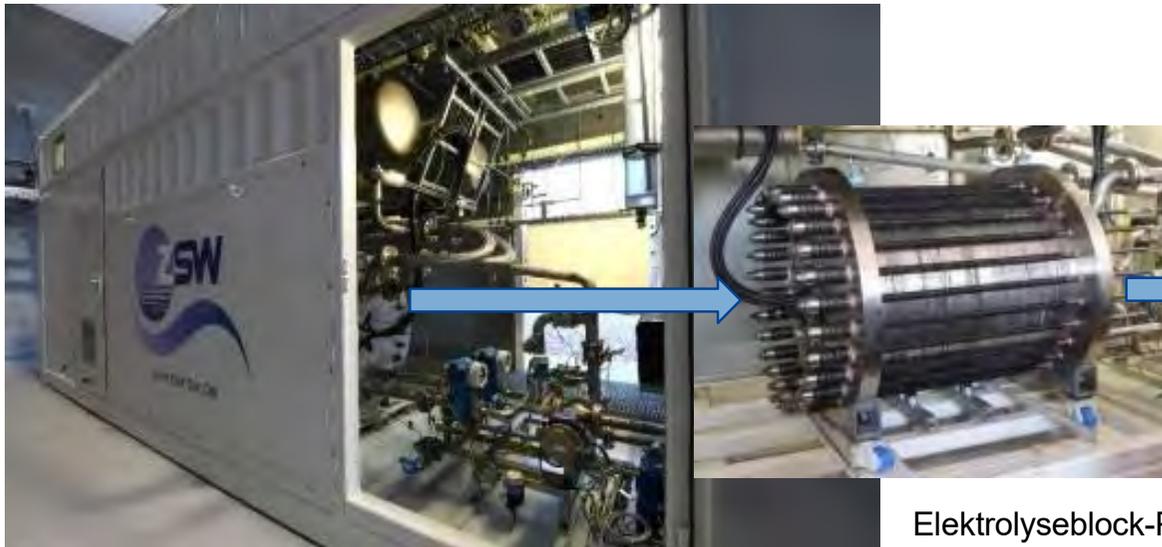
**Technologie & Innovation**  
 Effiziente, marktfähige Technologiebausteine



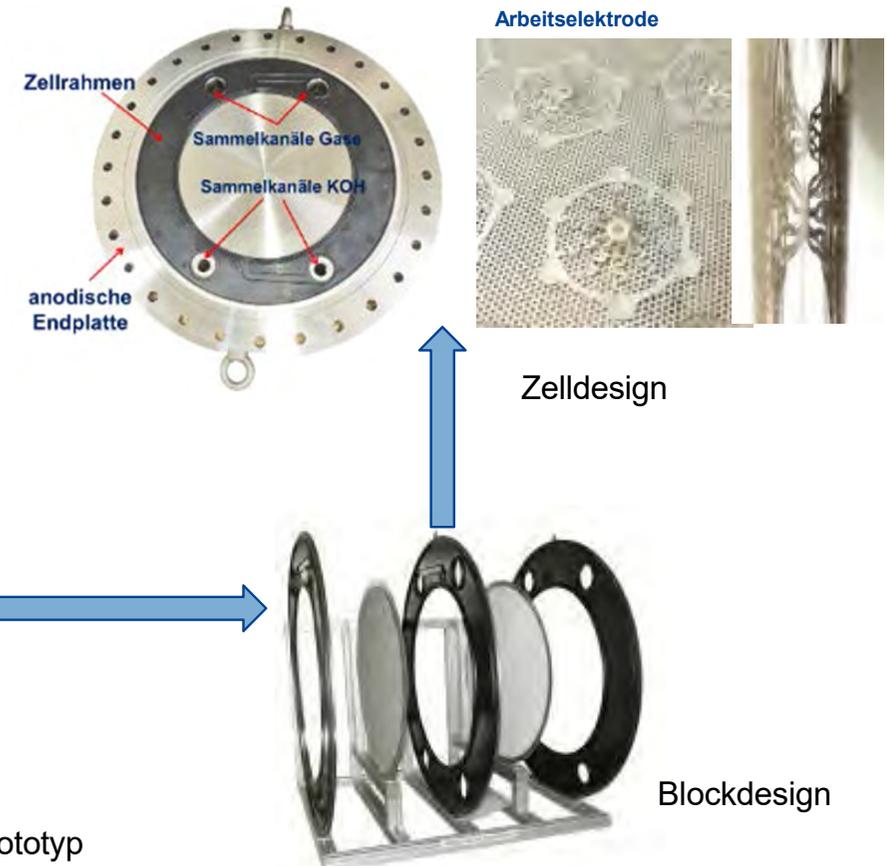
# 10 Jahre Elektrolyse-Systementwicklung des ZSW

Valide CE-zertifizierte Systemtechnologie im MW-Maßstab für die Nutzung im Projekt „BW-Elektrolyse“

- Container-integrierte **alkalische Druckelektrolyse** (1 MW<sub>el</sub>, Doppelblocksystem 2 x 500 kW<sub>el</sub>, 16 bar<sub>ü</sub>).
- ZSW-eigene **valide Systemtechnologie** mit patentierter Blocktechnologie (2.750 cm<sup>2</sup> Zellfläche).
- **Vollständige Anlagendokumentation** und CE-Zertifizierung liegen vor.



Elektrolyseblock-Prototyp  
(umgesetzt bis 300 kW<sub>el</sub>)



# Leuchtturmprojekt “Power-to-Gas” Baden-Württemberg

## ZSW-Pilotanlage erfolgreich in Praxisumgebung erprobt

- Die Power-to-Hydrogen-Anlage in Grenzach-Wyhlen ist ein **Referenzstandort für strombasierten Wasserstoff** in Baden-Württemberg.
- Regelbetrieb seit Ende 2019: >5.000 Betriebsstunden, rund 130 H<sub>2</sub>-Trailer befüllt (kommerzieller Anlagenteil).
- Demonstration von Innovationen unter **realen Einsatzbedingungen** (in Pilotanlage ZSW).
- Monitoring des Anlagekomplexes dient der Ausarbeitung einer **Technologie-Roadmap für Elektrolyseure**.



Kommerzielle Produktion 1 MW<sub>el</sub>



Pilotanlage ZSW

# Projekt „Elektrolyse Made in Baden-Württemberg“

Initiierung einer Elektrolyse- & Komponentenfertigung im Land (15.04.2020 – 31.12.2022)

## Bündelung der Industrie-Kompetenzen durch einen Systemintegrator / OEM

### Elektrolysestack und Leistungselektronik

- Elektrolysestack und Komponenten
- Trafo
- Gleichrichter

### Steuerung und Sicherheit

- Anlagensteuerung
- Systemsicherheit
- Prozessleitsystem
- Systemzulassung

### Verfahrenstechnische Komponenten

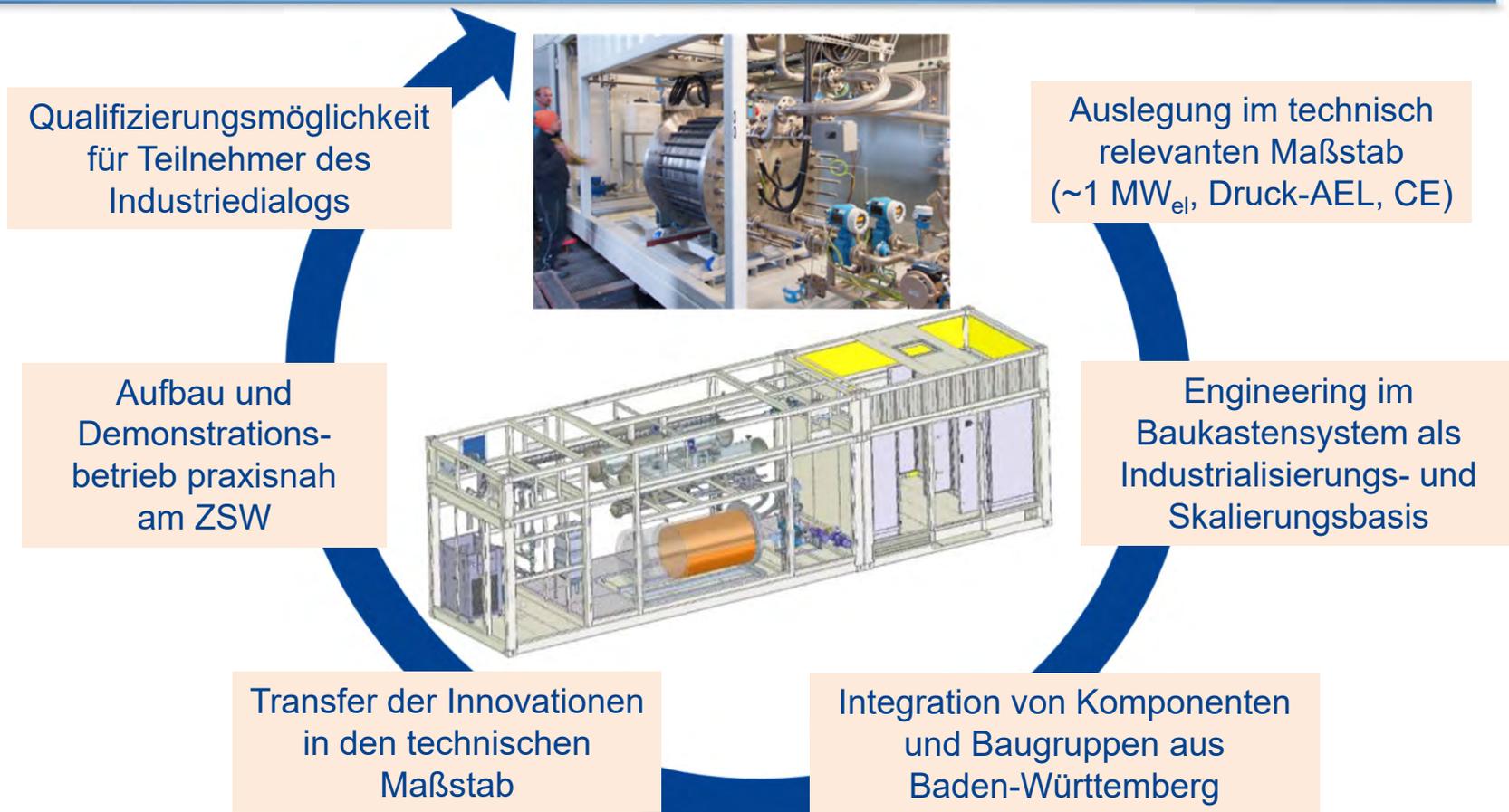
- Kernsystem mit Medien-Kreisläufen
- Medienversorgung
- Containerbau

### Kundenspezifische Schnittstellen

- Gasaufbereitung
- Verdichtung
- Gasspeicher
- Qualitätssicherung



# „Elektrolyse made in Baden-Württemberg“ Alkalischer Systemdemonstrator



# Überblick Erzeugungspfade für Wasserstoff

## System-Wirkungsgrade verschiedener Wasserstoffherstellungsverfahren

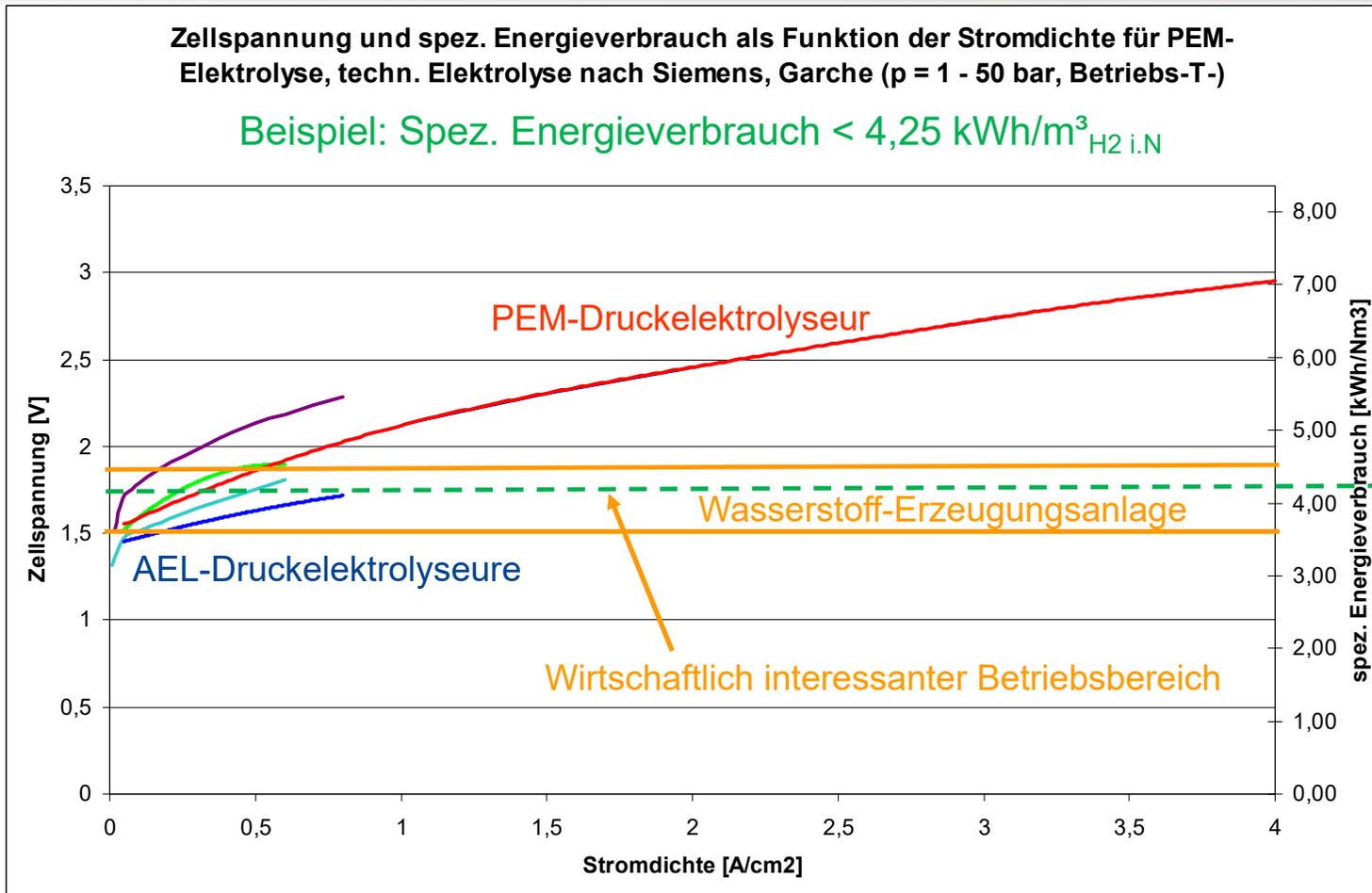
Verfahren	$\mu$ ( $H_2$ )	$T_{\text{Betrieb}}$
Konventionelle alkalische Wasserelektrolyse	65 %	80°C
Verbesserte alkalische Wasserelektrolyse	90 %	150°C
Membranelektrolyse (SPE)	90 %	120°C
Hochtemperatur-Dampfelektrolyse („Hot Elly“)	> 90 %	850°C
Photoelektrolyse	10 %	20°C
Photochemische Wasserstofferzeugung	< 1 %	20°C
Photobiologische Wasserstofferzeugung	?	20°C

**Wirkungsgrad der  
Wandlung  
von fluktuierender  
Primärleistung  
in speicherbare  
Sekundärenergie  
wird letztendlich die  
Nutzung bestimmen**

Quelle: J. Blumberg, TU München

# Einordnung kommerzieller H<sub>2</sub>-Erzeugungsanlagen (AEL & PEM)

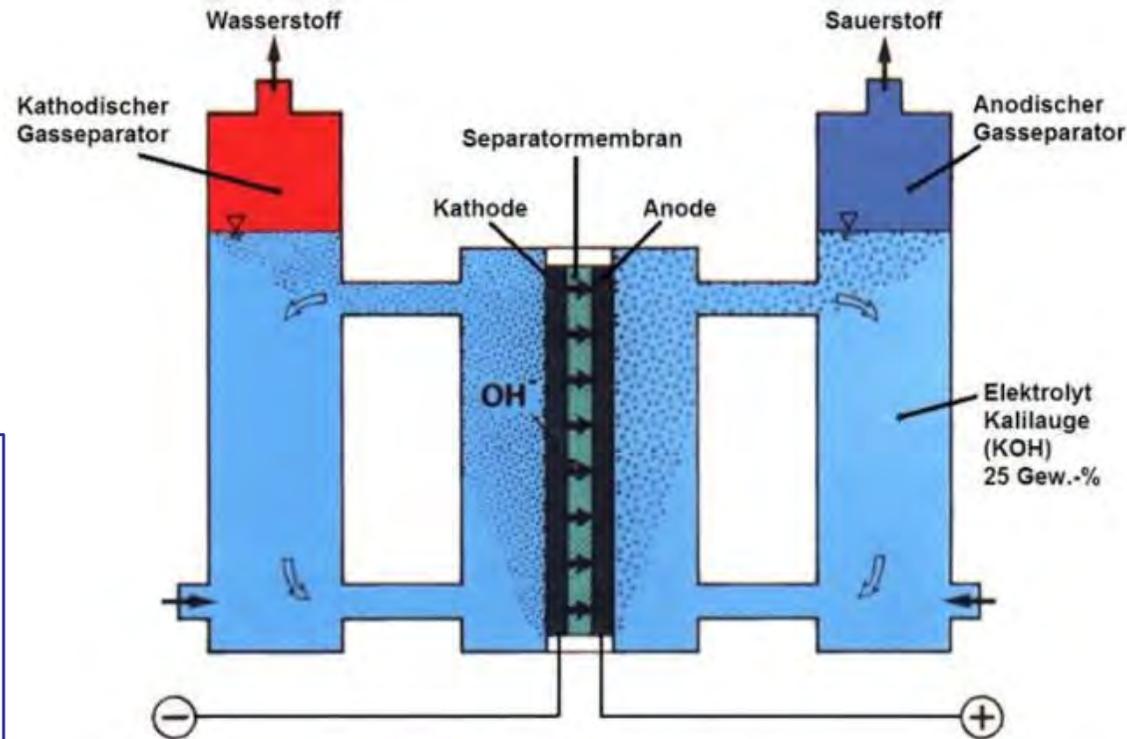
Kommerzieller nutzbarer Betriebsbereich einer Strom-Spannungs-Kennlinie



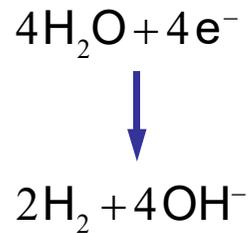
→ nachgewiesen für Elektrolyseure bei 100 – 800 mA/cm<sup>2</sup>

# Funktionsprinzip der Elektrolyse

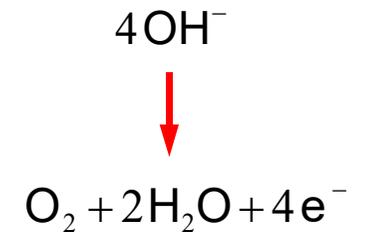
## Beispiel alkalische Elektrolyse



### Kathodenreaktion:



### Anodenreaktion:

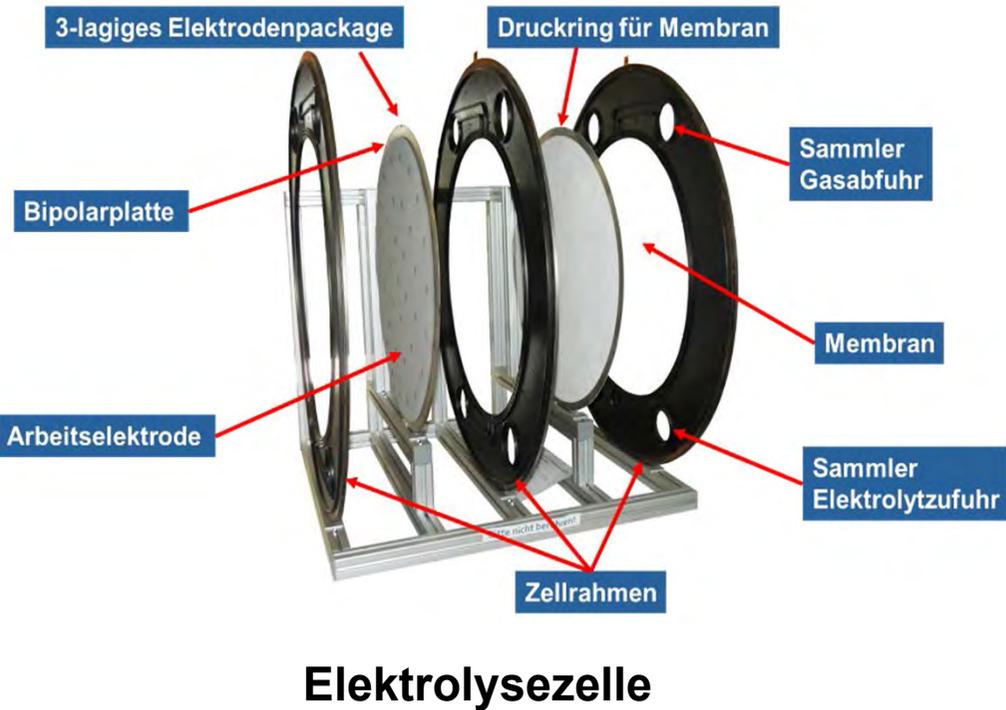


W. Nicholson & A. Carlisle haben 1800 erstmals die Entstehung von 2 Gasen im Verhältnis 2:1 aus Wasser gezeigt.  
 J. W. Ritter hat 1800 die beiden Gase als Wasserstoff und Sauerstoff mit Knallgasprobe und weißem Phosphor bestimmt.

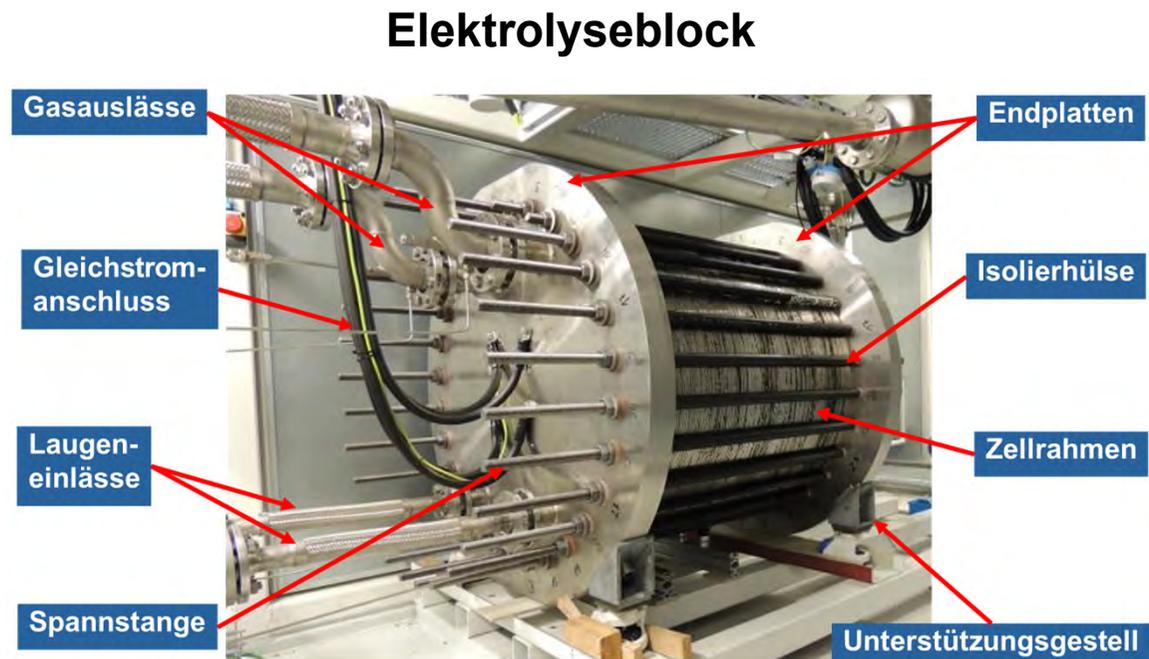
Quelle: DLR-ZSW-Broschüre „Solarer Wasserstoff - Energieträger der Zukunft“, 1.Aufl., 1988

# Bipolarer alkalischer Druckelektrolyseblock und seine Bauelemente

## P2G-Elektrolyseblockdesign des ZSW

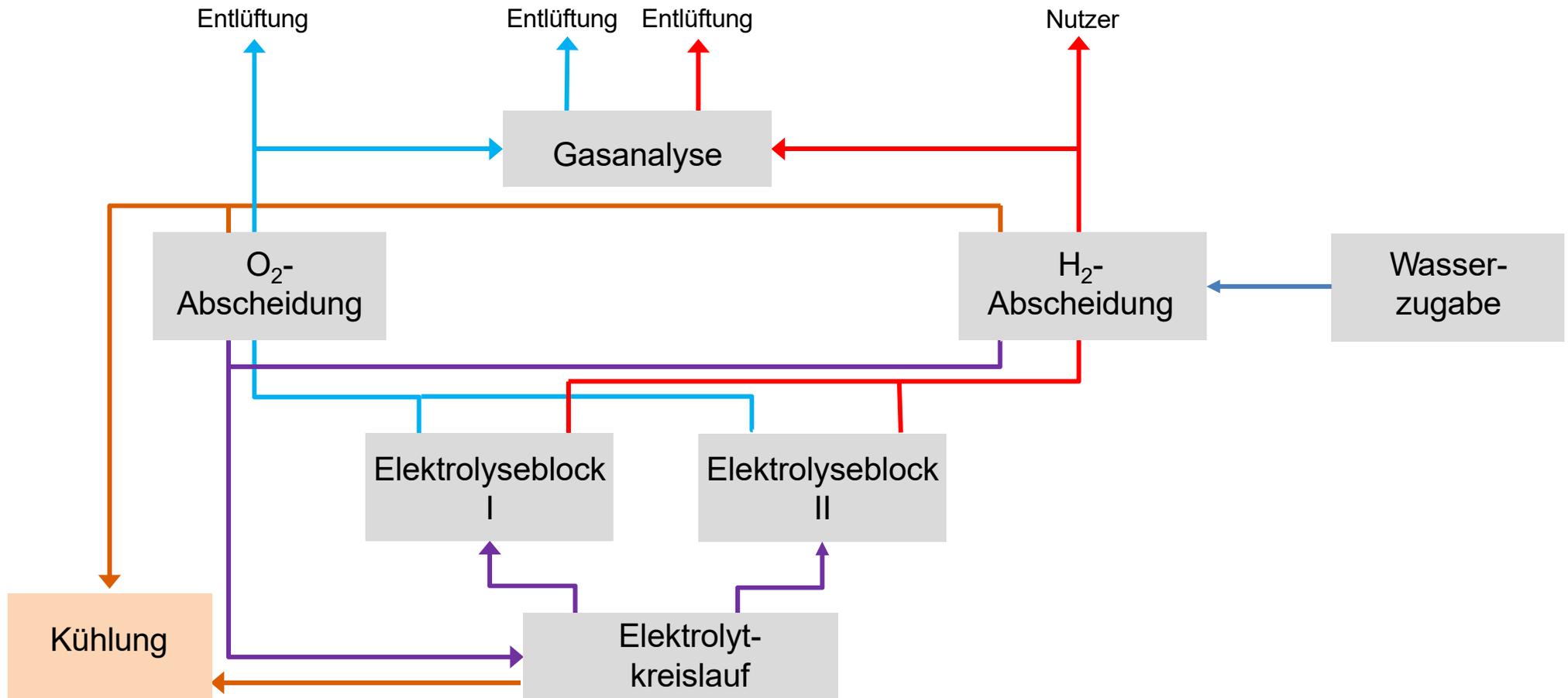


**Elektrolysezelle**



# P2G-Elektrolysesystemtechnik

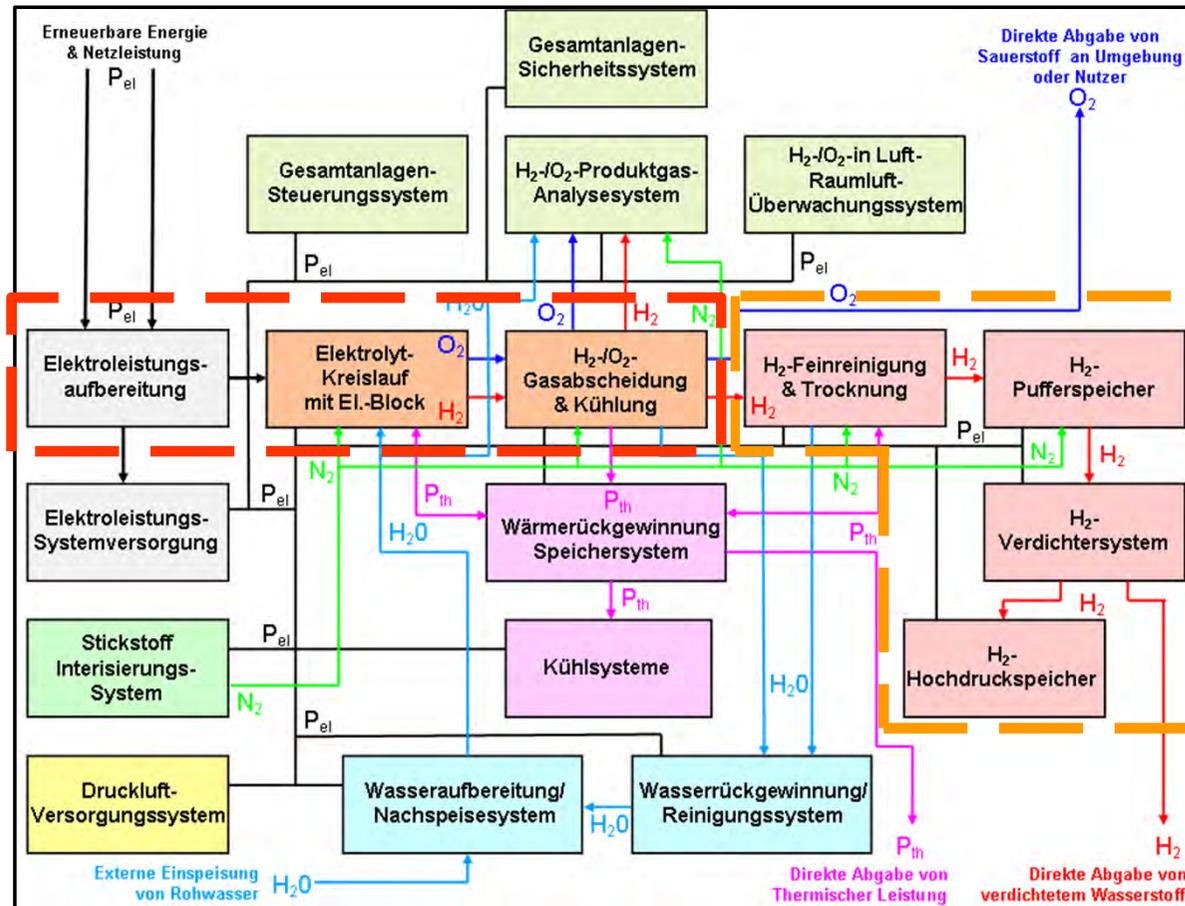
## Systemstruktur



# Vom Elektrolysesystem zur Wasserstoffherzeugungsanlage

## Prinzipieller Aufbau (schematisch)

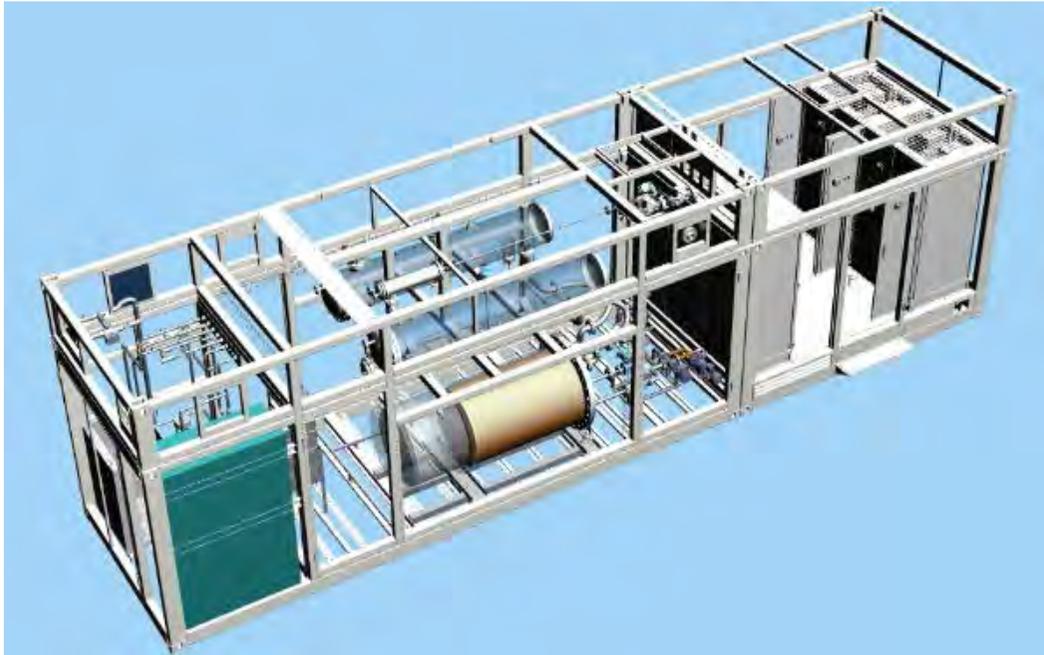
Elektrolyse-Kernsystem



Erweiterung vom Elektrolyseur zur H<sub>2</sub>-Lieferanlage

# Vom Elektrolyseblock zum Elektrolysesystem

## Ausführungsbeispiel P2G-Elektrolysesystem des ZSW



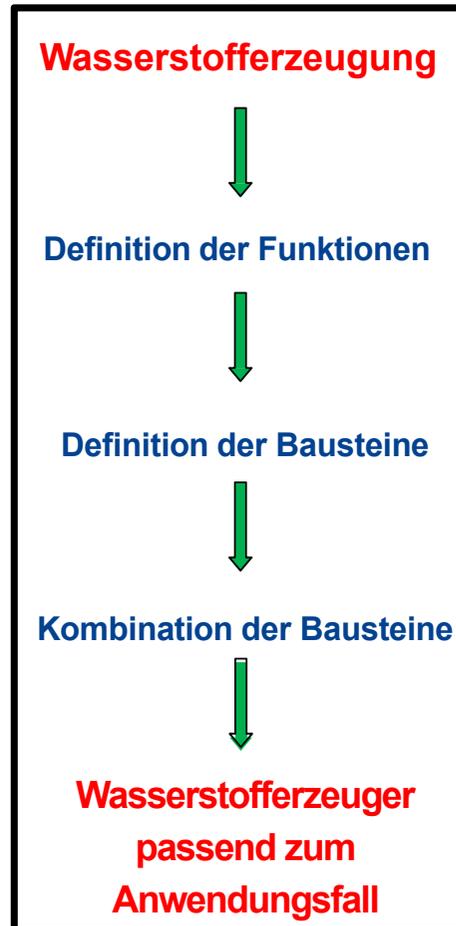
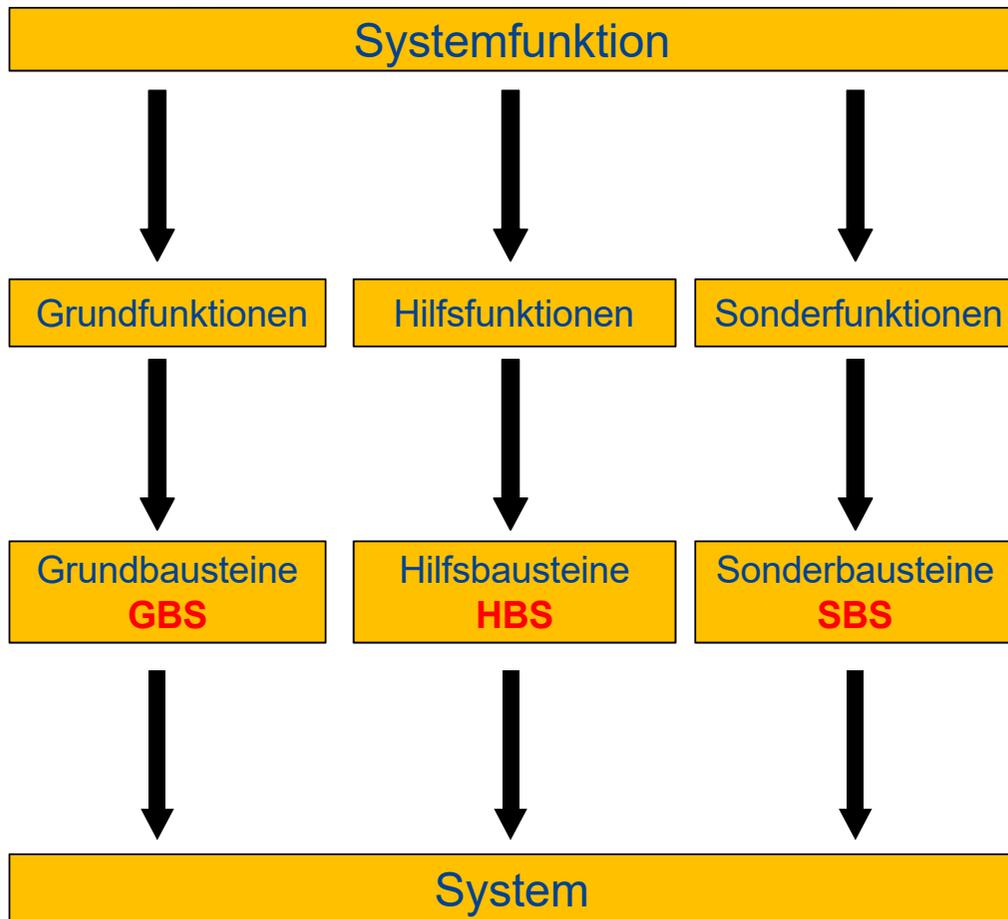
3D-Modell P2G-Elektrolysesystem des ZSW



P2G-Elektrolysesystem des ZSW am Wasserkraftwerk Grenzach-Wyhlen

# Industrialisierung der P2G-Elektrolysesystemtechnologie

Übergang von der Manufakturbauweise zum Prinzip des Baukastensystems für die Serie



## Grundbausteine GBS

- Kernsystem
- Produktgas-Überwachung
- Gleichrichter/Trafo
- Stack
- Elektrotechnik/Steuerung

## Hilfsbausteine HBS

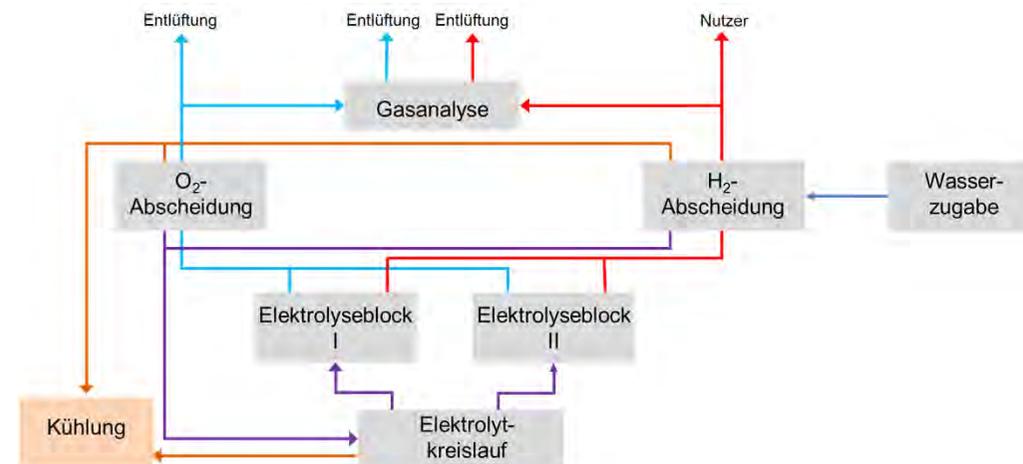
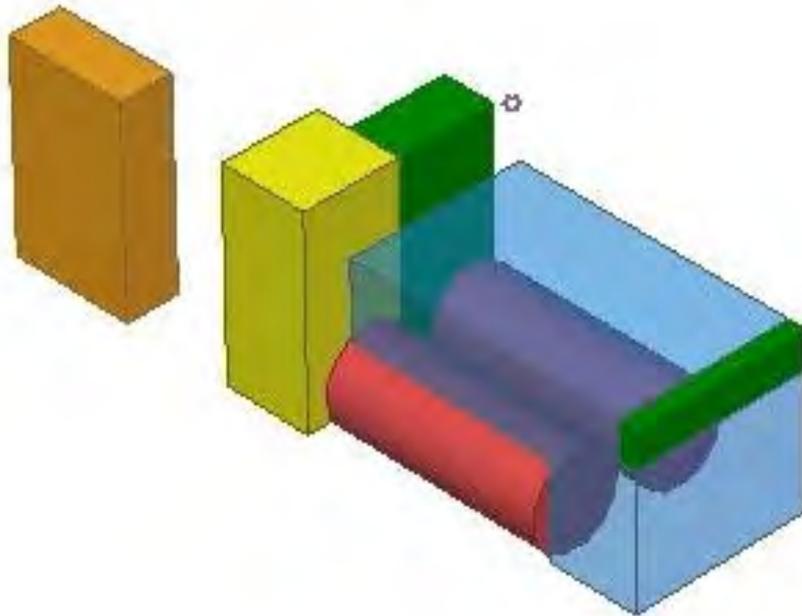
- NT-Kühlung
- HT-Kühlung
- Prozesswasser
- N<sub>2</sub>-Versorgung
- Prozeßluft

## Sonderbausteine SBS

- Temperierung
- Gasreinigung
- Produktgasanalyse
- Container
- Verdichtung

# Industrialisierung der P2G-Elektrolysesystemtechnologie

Baukastensystem: Basissystem abhängig von Standort-Versorgung



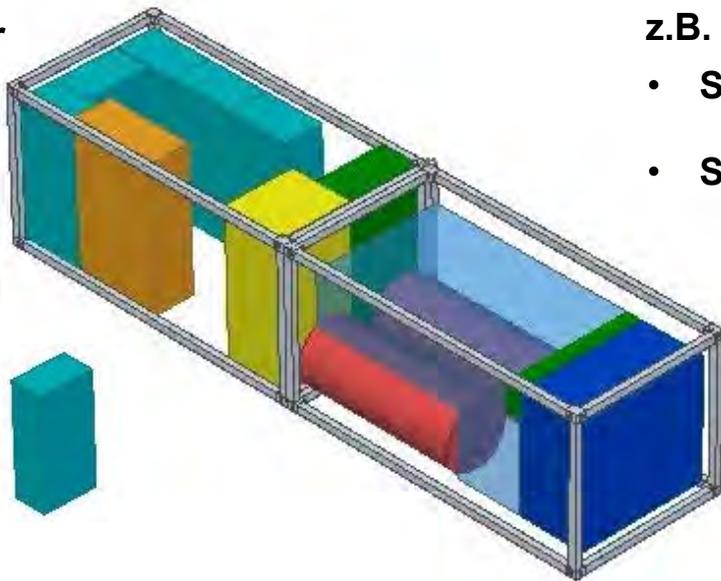
**prinzipiell funktionsfähiger Wasserstoffherzeuger ohne Berücksichtigung von Standortbedingungen oder kundenspezifischer Anforderungen**

# Industrialisierung der P2G-Elektrolysesystemtechnologie

Baukastensystem: Autonomes Komplettsystem

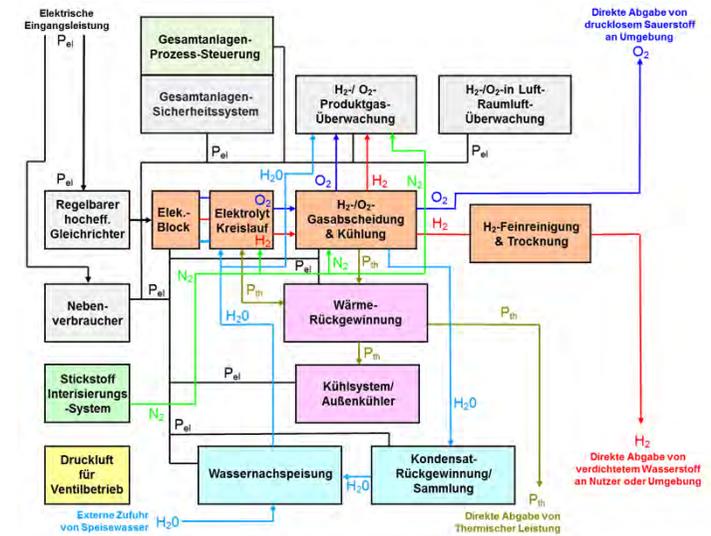
## Erweiterung Basissystem durch Hilfs- und Sonderbausteine

- HBS Prozesswasser
- HBS NT-Kühlung
- HBS HT-Kühlung
- HBS N2-Versorgung
- HBS Prozeßluft



z.B.

- SBS Container
- SBS Gasreinigung



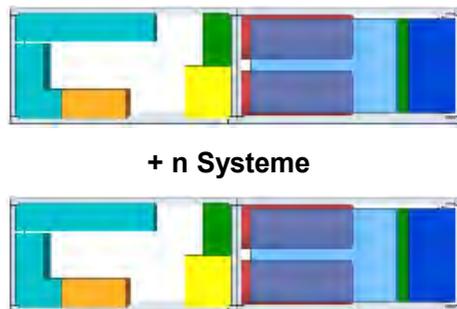
**➔ An den Anwendungsfall angepasster Wasserstoffherzeuger mit Berücksichtigung von Standortbedingungen und kundenspezifischer Anforderungen**

# Industrialisierung der P2G-Elektrolysesystemtechnologie

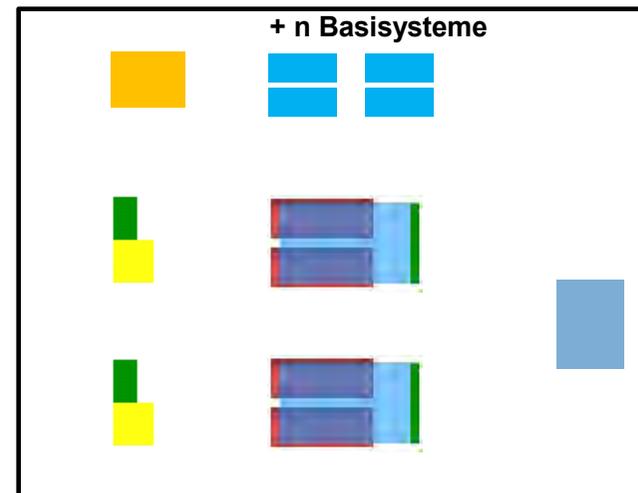
Baukastensystem: Scaleup zu großen Elektrolyseeinheiten

- ➔ Das **Basissystem**, realisiert nur mit Grundbausteinen, wird **über die Anzahl der Basissysteme skaliert**.

*Containerintegriert*



*Hallenaufstellung*



- ➔ **Hilfs- und Sonderbausteine** werden, je nach Anlagengröße und Aufstellungskonzept, entsprechend **separat skaliert**.

# Fazit

---

Die Energiewende hat begonnen.  
Sie hat nicht nur Risiken sondern bietet auch Chancen.

Wasserstoff spielt als chemischer Speicher, Grundstoff, Kraftstoff eine wichtige Rolle.

Seien Sie dabei, die wirtschaftlichen Chancen der Wasserstofftechnologie in

- Komponentenherstellung,
- Systembau,
- Anlagenerrichtung,
- Betrieb,
- Vermarktung,
- Wasserstoff-Nutzung,
- und vieles mehr

für sich herauszuarbeiten und zu ergreifen.

# Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

---

## Fragen?

Kontakt:

Andreas Brinner, Tel: 0711 7870338 / Email: [andreas.brinner@zsw-bw.de](mailto:andreas.brinner@zsw-bw.de)  
ZSW, Meitnerstr. 1, D-70569 Stuttgart

