



R. Stahl Expertenforum

Friedewald

26. – 28. April 2022

Wasserstoffherzeugung und Betriebssicherheit

Dipl.-Ing. Andreas Brinner

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung
Baden-Württemberg (ZSW)
Regenerative Energieträger und Verfahren (REG)
Meitnerstr. 1, D-70563 Stuttgart

Vortragsinhalt:

- Kurzvorstellung des ZSW
- Wasserstoff als Rohstoff und als neuer/ alter Energieträger
- Elektrolyse-Verfahren
- Grundlagen der Elektrolyse
- Von der Einzel-Elektrolyse zur Anlagen-Serienherstellung
- Vom Elektrolyseblock zur Anlage
- Elektrolyseanlagenbeispiele
- Aufbaukonzepte und Sicherheitsaspekte
- Elektrolyse-Großanlagen
- Entwicklungsperspektiven, Aufstellung, Scale-up
- Einsatzmöglichkeiten von Elektrolyseanlagen
- Entwicklungsperspektiven, Energieverbrauch

ZSW Standorte



Stuttgart:
Photovoltaik (mit Solab),
Energiepolitik und Energieträger,
Zentralbereich Finanzen,
Personal & Recht



Widderstall: Solar Testfeld



Ulm:
Elektrochemische Energietechnologien,
Hauptgebäude & eLaB

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

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

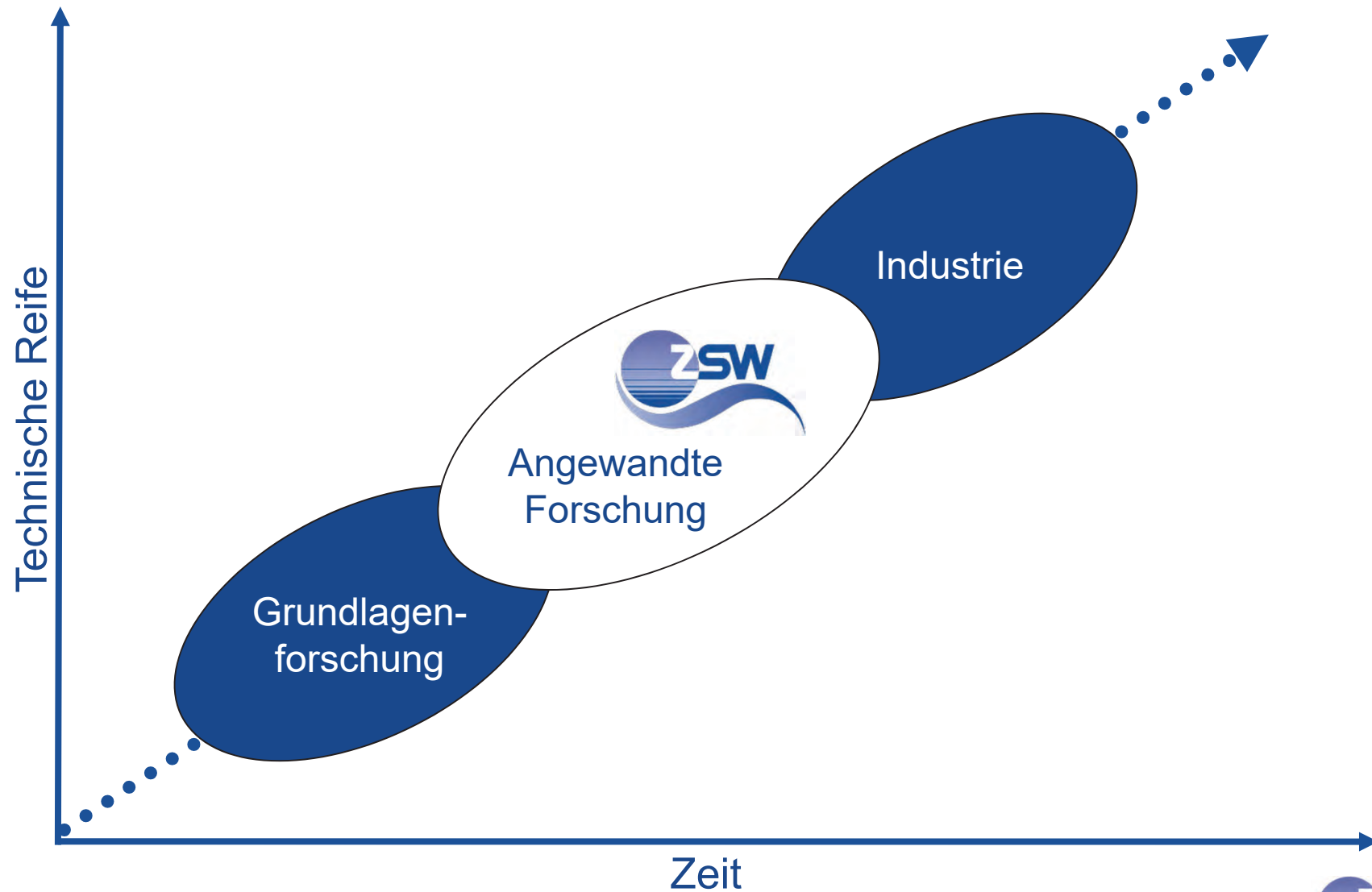
2016: Rund 235 Mitarbeiter arbeiten an 3 Standorten in Baden-Württemberg (Umsatz 2016: 35 Mio. EUR)

Stiftungszweck:

Industriennahe Forschung
und Technologietransfer
im Bereich der
erneuerbaren Energien



Technologietransfer am ZSW

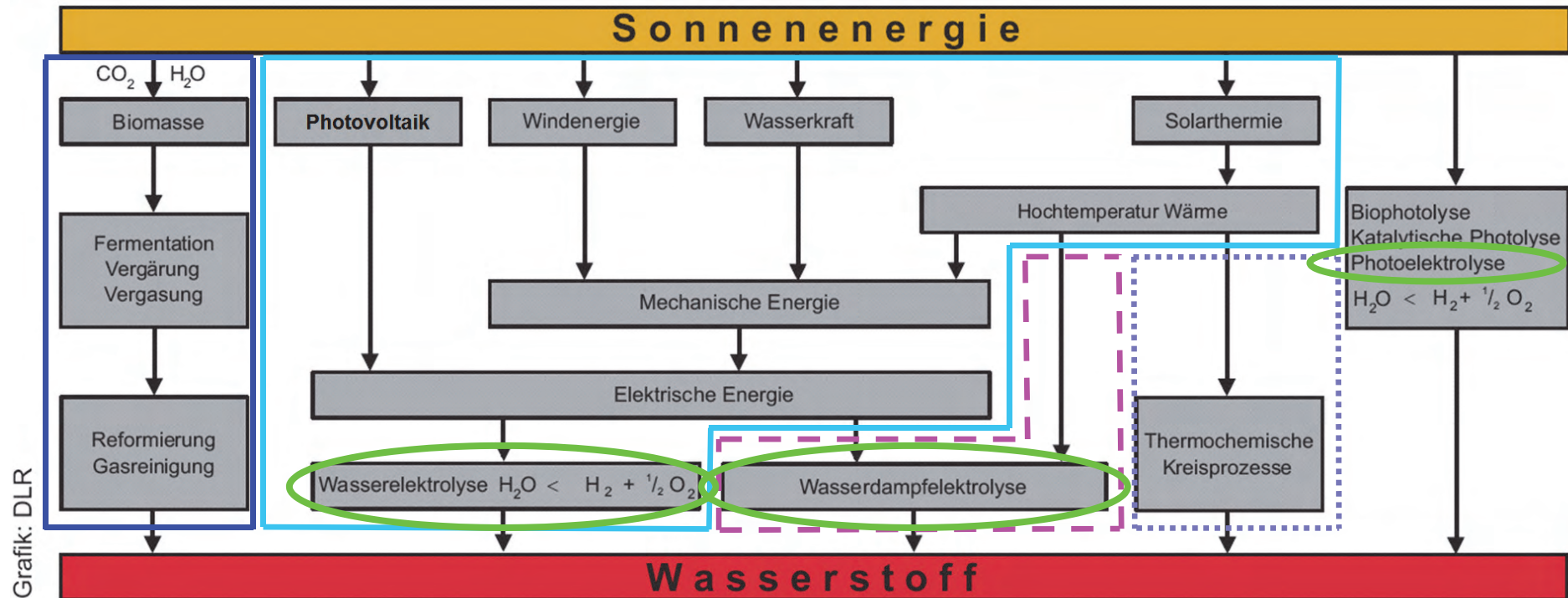


Brennstoffe und Wasserstoff

- Konversion biogener Ressourcen
- Synthetische Energieträger
- Gasprozesstechnik
- Anlagen- und Systemtechnik



Wasserstoff-Herstellungspfade mit regenerativer Energie



Energieumwandlungsschritte der nichtfossilen Wasserstoffherstellung

Großanlagen

Manufakturbau

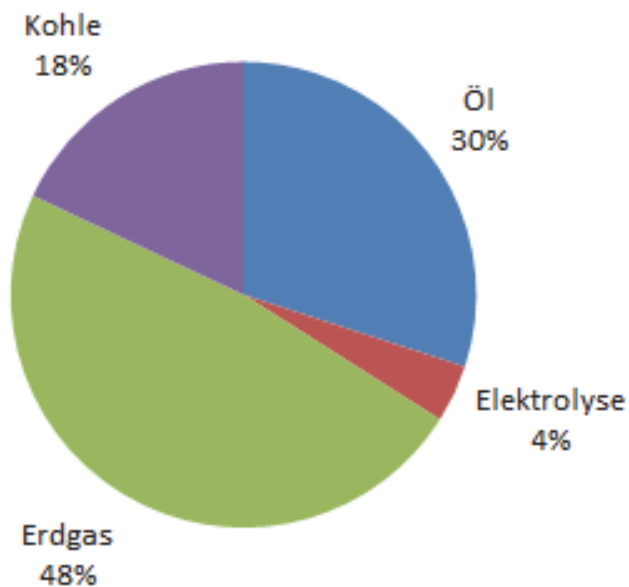
Versuchsanlagen

Laboranlagen

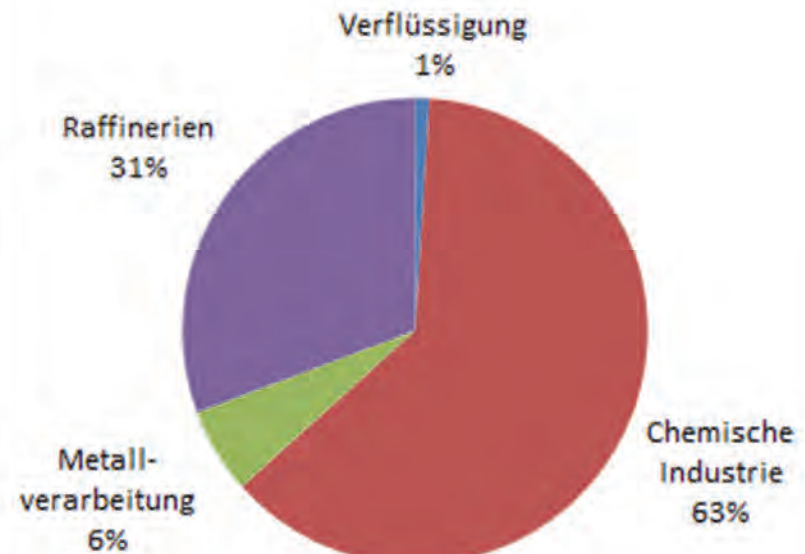
**Die Strukturierung der
H₂-Herstellungsverfahren
ist allgemein anerkannt**

Heute überwiegend: Industrieller Umgang mit Wasserstoff

Produktion

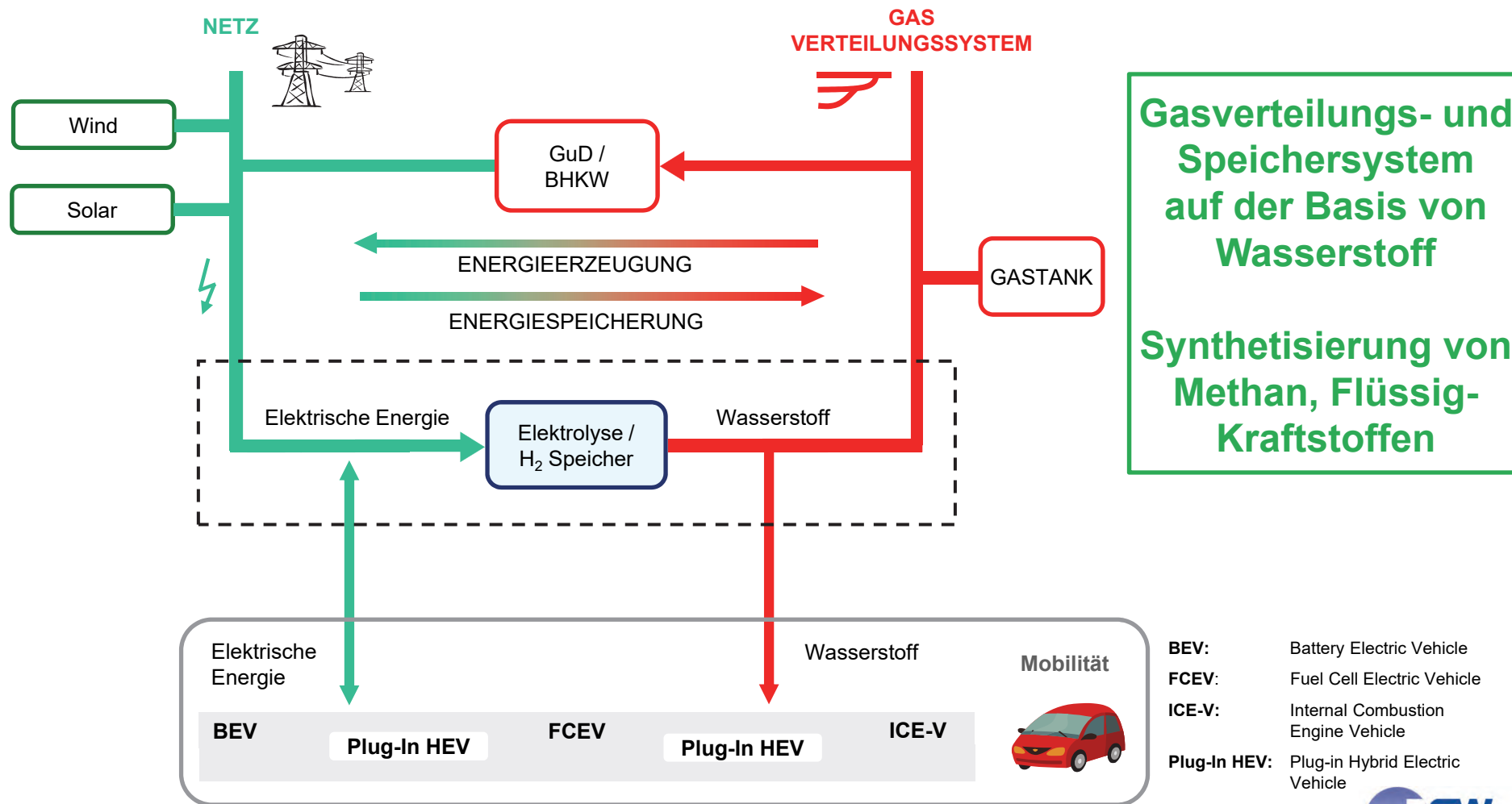


Verbrauch



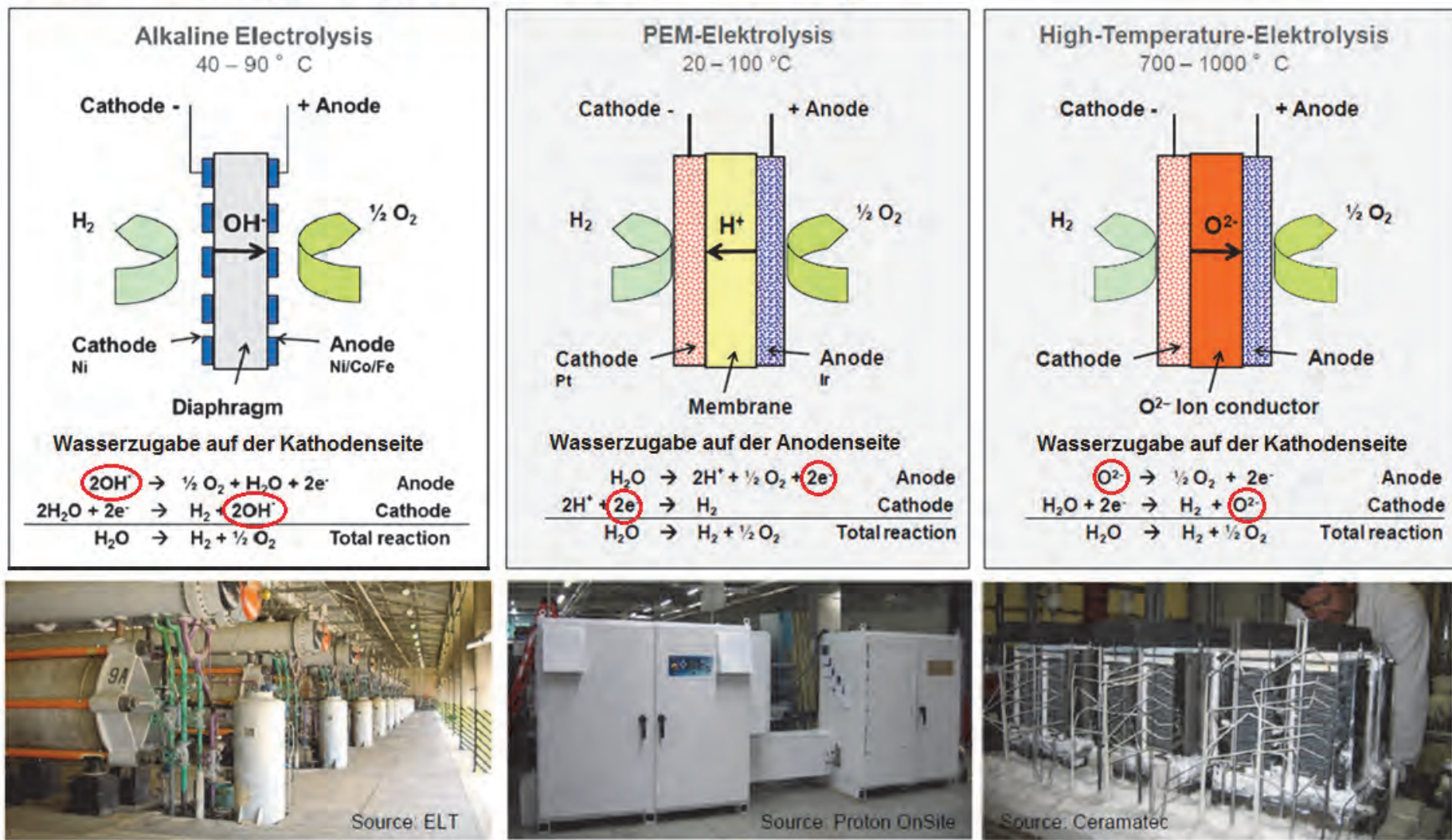
Quelle: Eigene Darstellung in Wuppertal-Institut, 2018-04 „Technologien für die Energiewende, Band 2, Kap. 4.1 PtG – Wasserstoff“

Zukünftig auch: Wasserstoff als Sekundärenergiespeicher für die Sektorkopplung Energie, Kraftstoff, Rohstoff



Konventionelle Prinzipien der Wasserelektrolyse

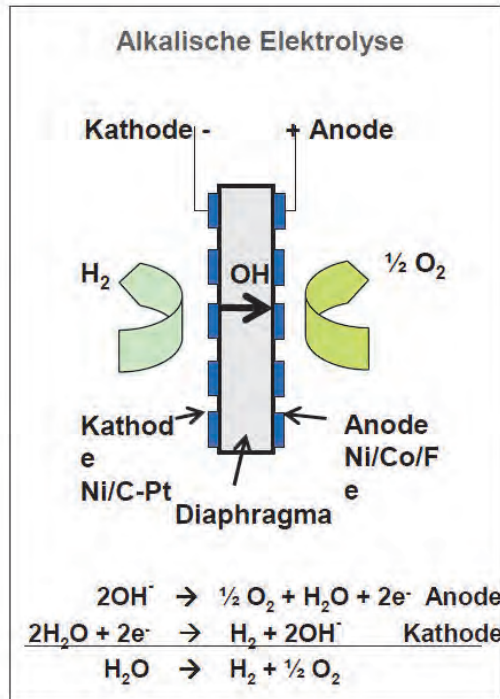
Functional principle of water electrolysis



Neue Ansätze der Wasserelektrolyse, von PEM zu AEM

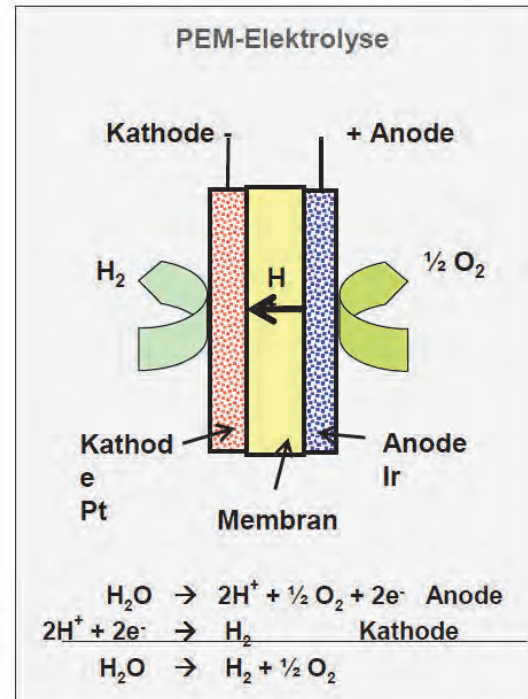
Projektverbund MAPEL

For You and Planet Blue.



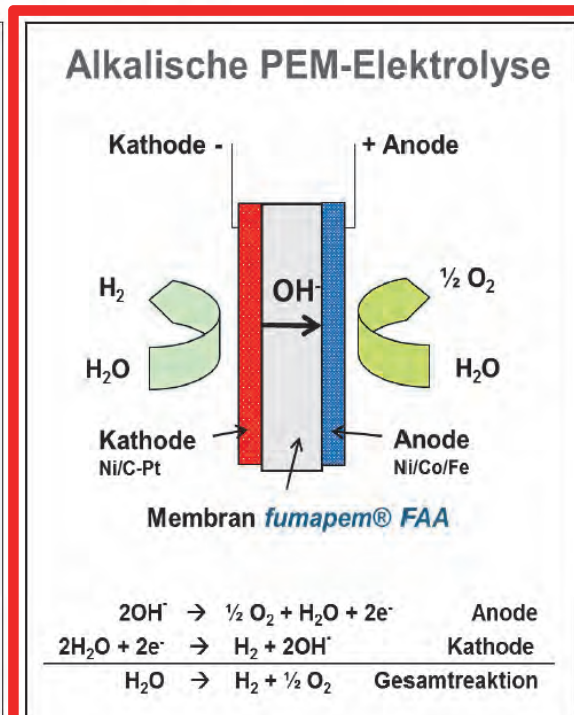
Alkalische Wasserelektrolyse Vorteile:

- gut entwickelte Technologie
- keine Edelmetallkatalysatoren
- hohe Langzeitstabilität



PEM-Wasserelektrolyse Vorteile:

- höhere Leistungsdichte
- höherer Wirkungsgrad
- gute Teillastfähigkeit
- einfacher Systemaufbau



Kombination der Vorteile von alkalischer und PEM-Elektrolyse

MEEs für die alkalische PEM-Elektrolyse

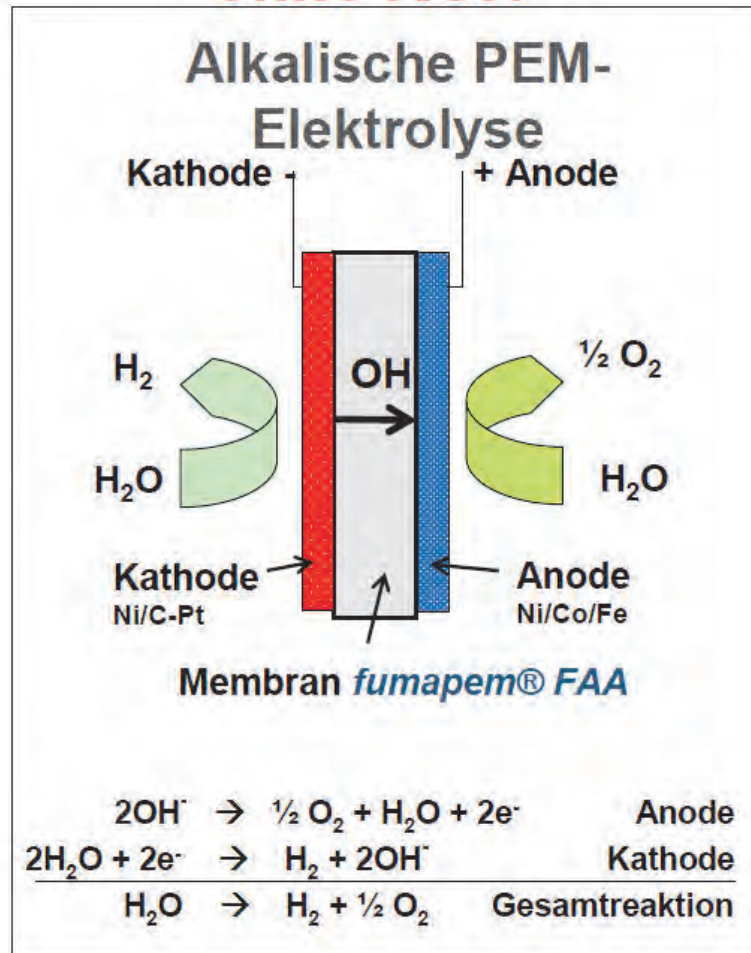
Neue Ansätze der Wasserelektrolyse, AEM-Prinzipen

Konzepte: Alkalische PEM-Elektrolyse

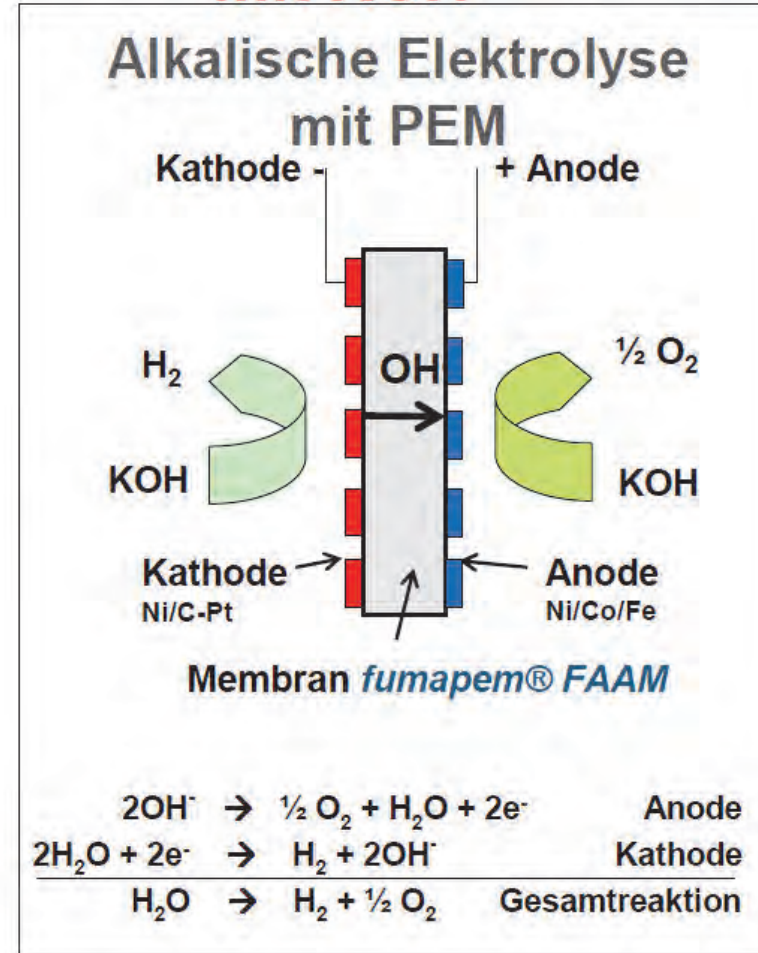
For You and Planet Blue.



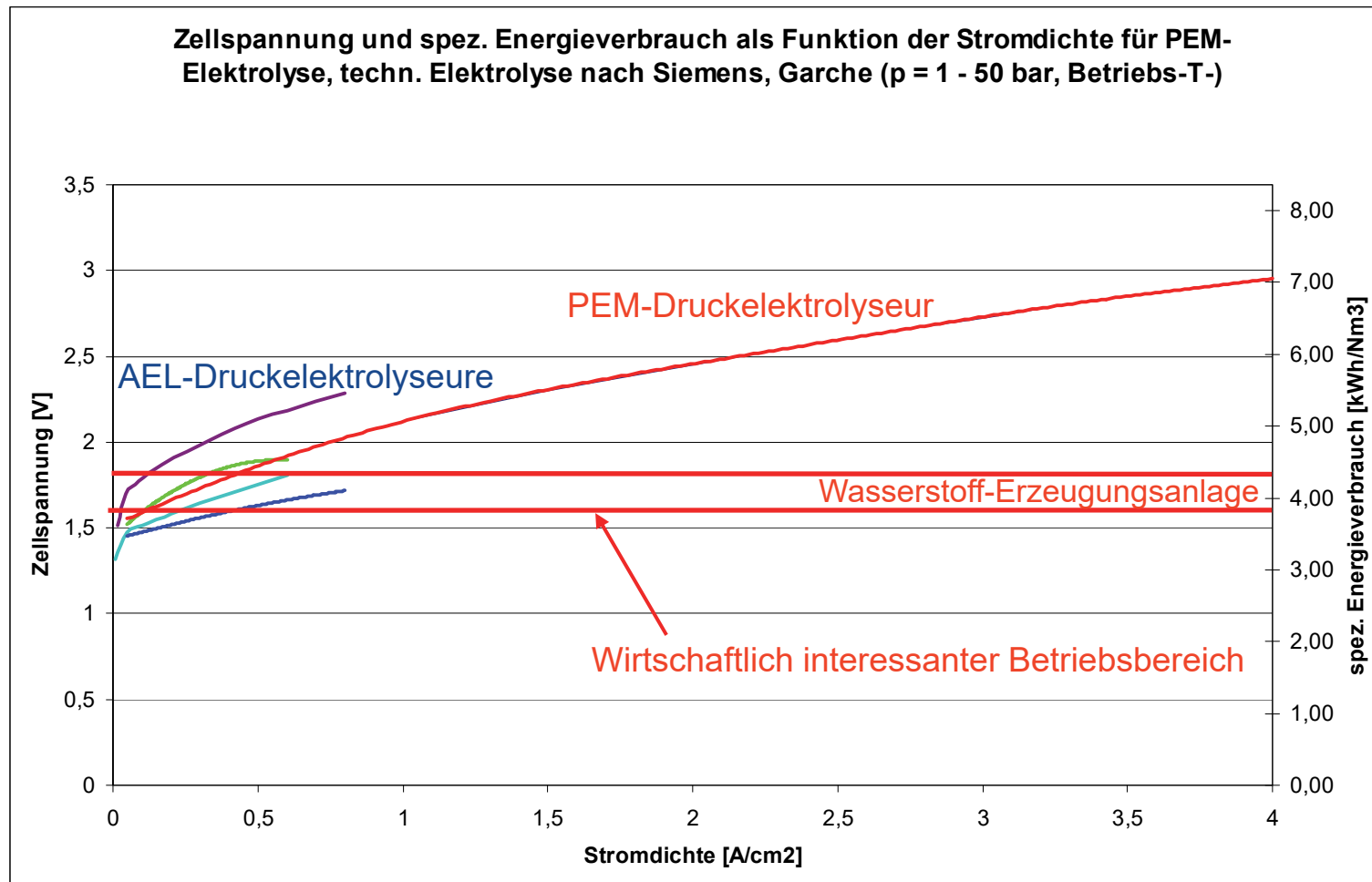
ohne KOH



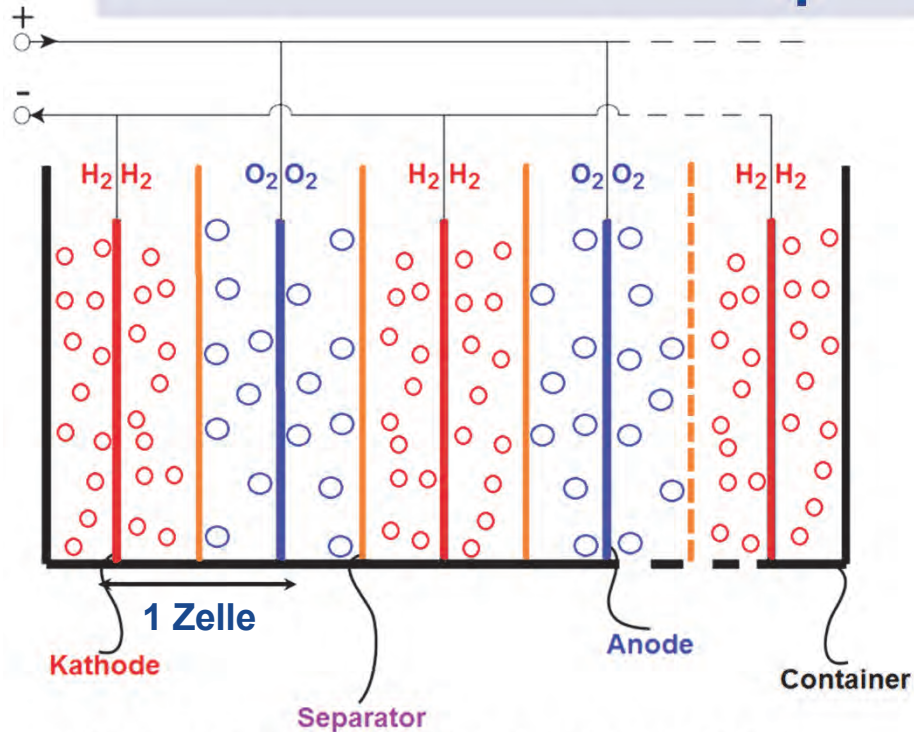
mit KOH



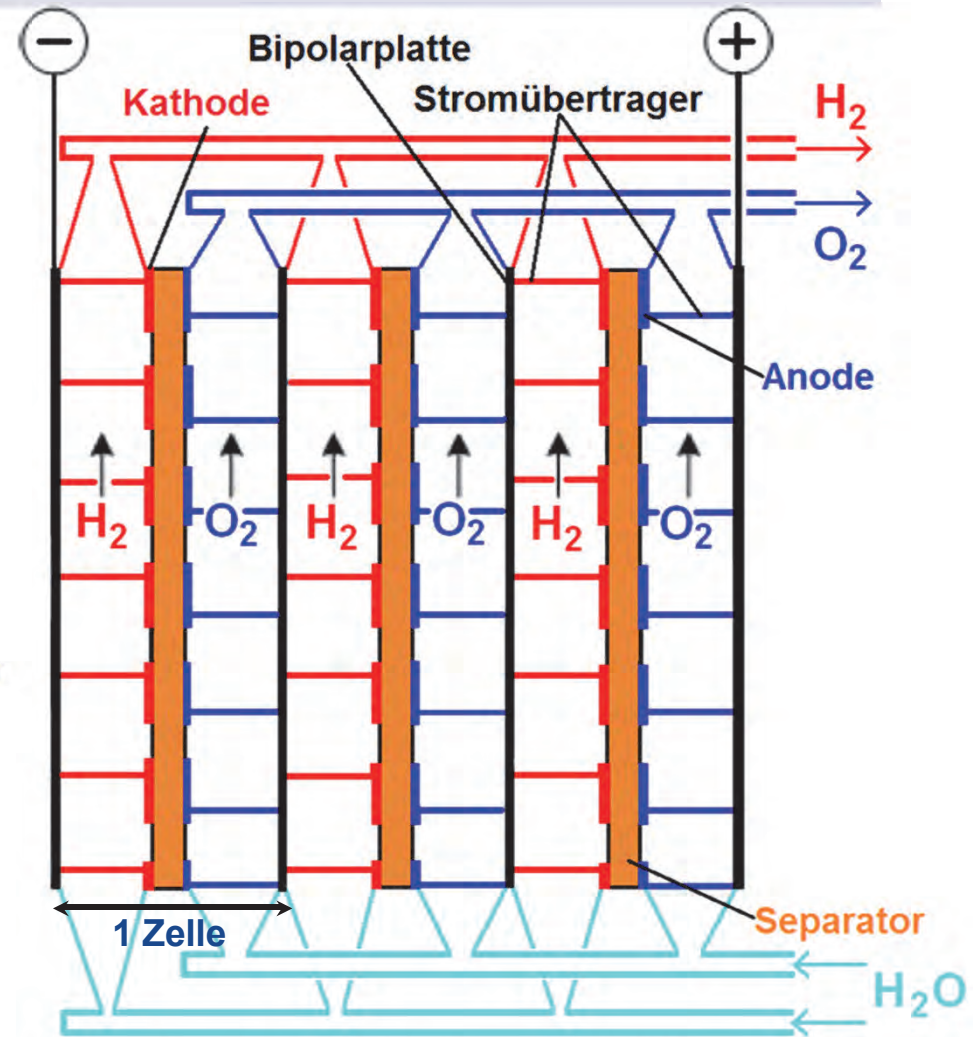
Einordnung kommerzieller H₂-Erzeugungsanlagen (AEL & PEM)



Funktionsprinzipien von Elektrolyseblöcken, unipolar, bipolar

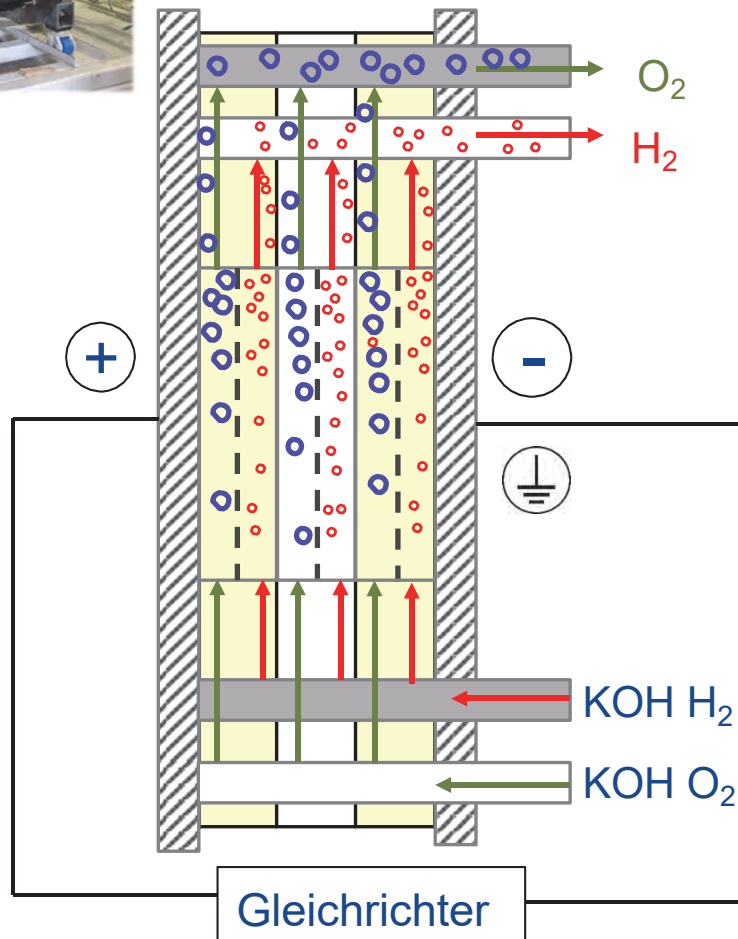
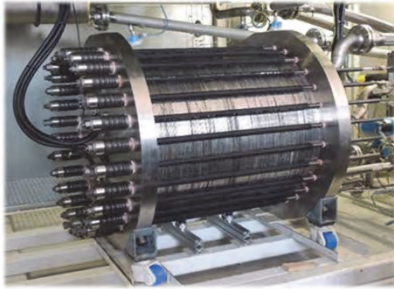


Unipolarer Zellblock mit 3 Zellen

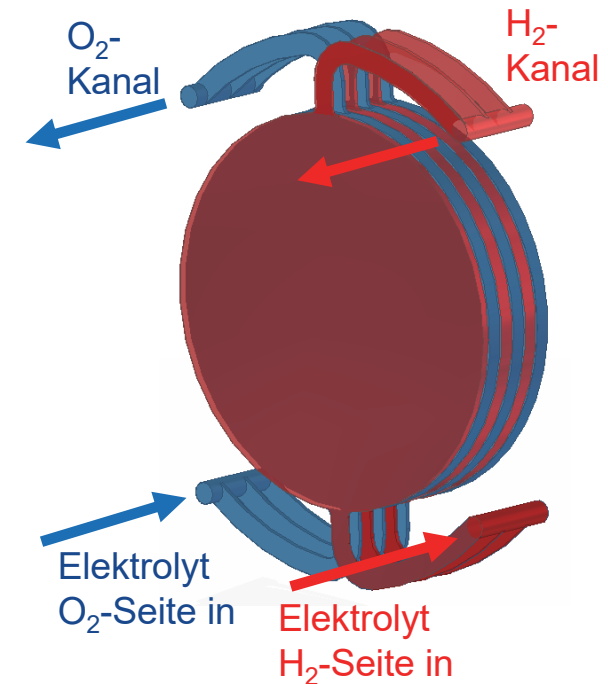


Bipolarer Zellblock mit 3 Zellen

Medienführung

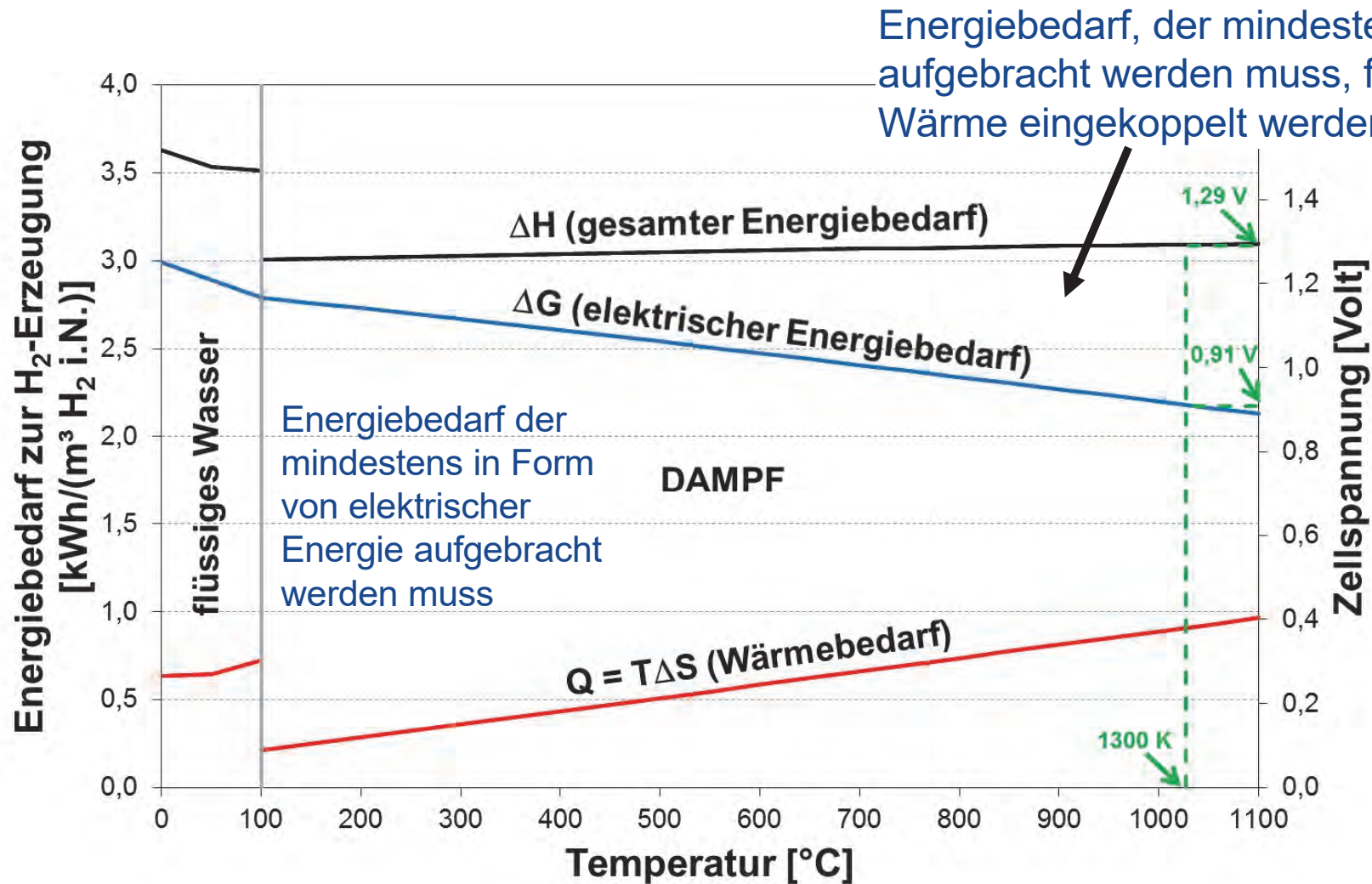


- Der Zellrahmen dichtet die H_2 - und O_2 -Seite voneinander und nach außen ab.
- Gleichmäßige Elektrolyt-Verteilung in und Gas-Abtransport aus den Zellen muss sichergestellt sein.



Negativ: notwendiges Strömungsvolumen

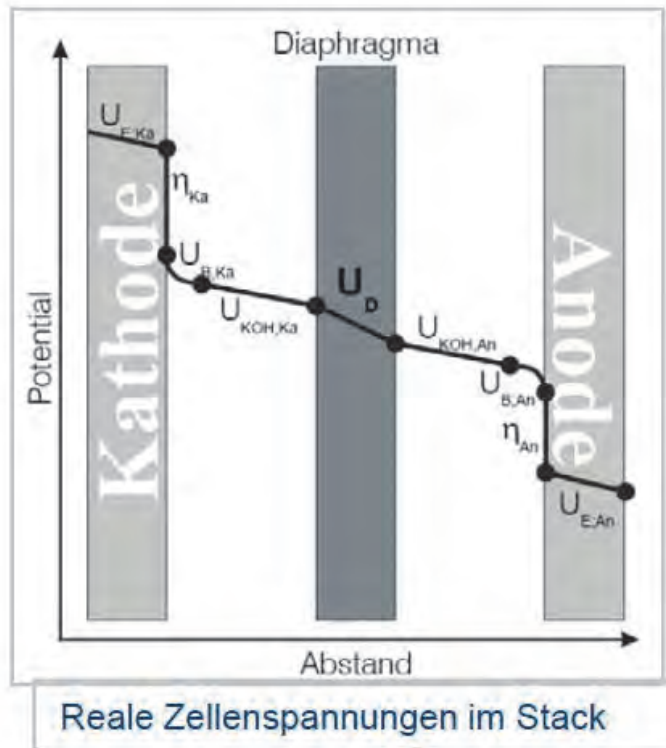
Thermodynamik



ΔH : Reaktionsenthalpie

ΔG : freie Reaktionsenthalpie

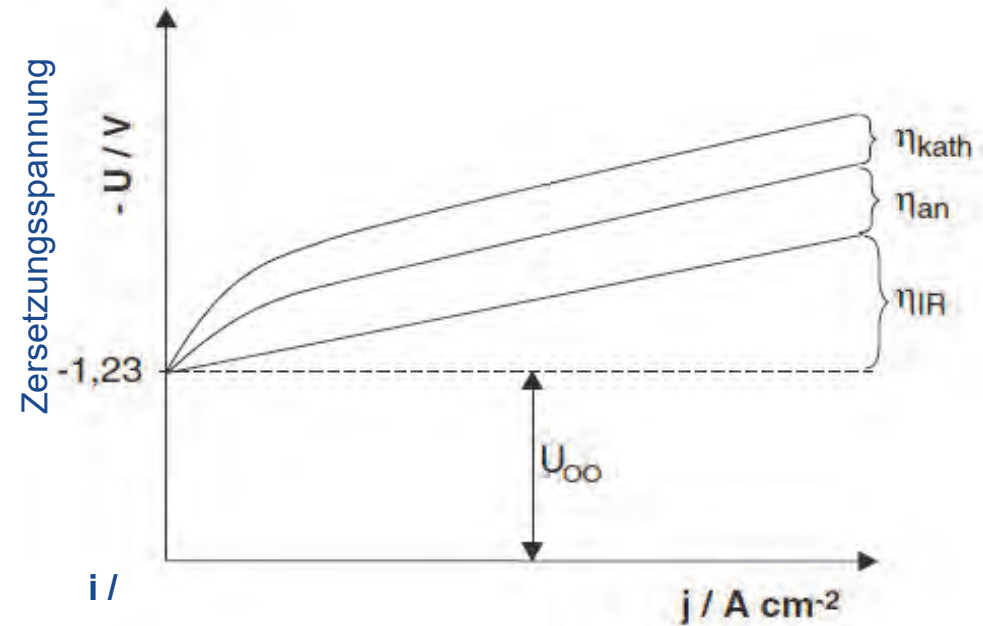
Zellspannungsverluste



Quelle: Dissertation Dr. Michael Beyer, 2000

- Überspannung **Elektroden**
- **Diaphragma**
- Blasenbildung
- Elektrolyt
- **Stromübertrager**

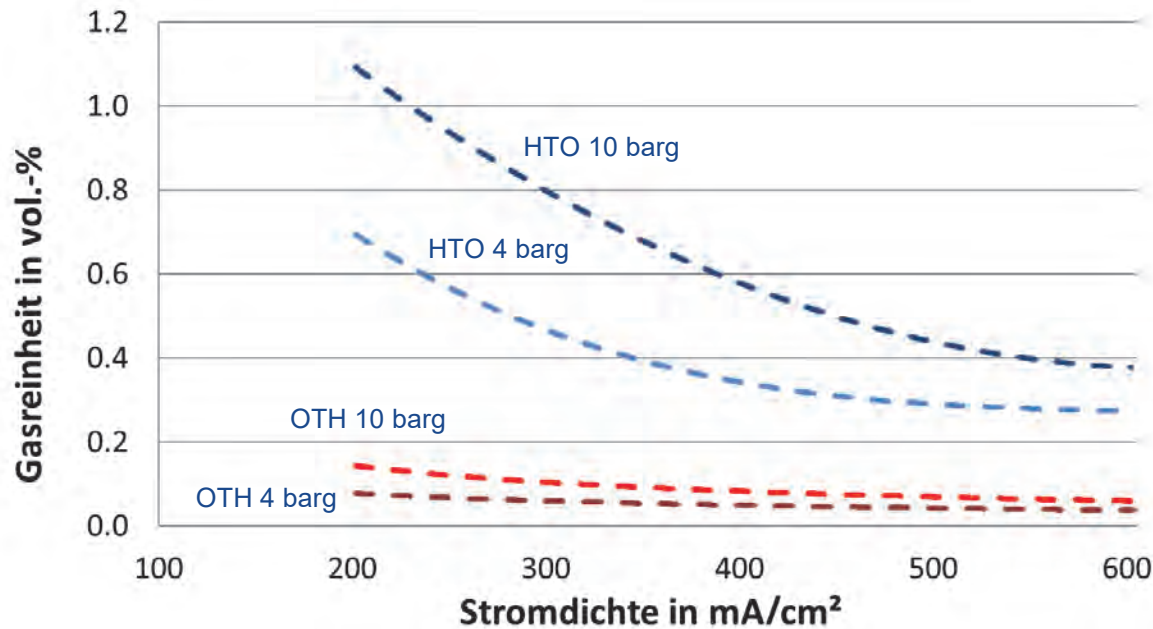
Ohmsche
Verluste



Quelle: Schmidt, Elektrochemische Verfahrenstechnik

Bei hohen Stromdichten sind ohmsche Verluste aufgrund steigendem Gasblasenanteil zwischen Elektrode und Membran dominant

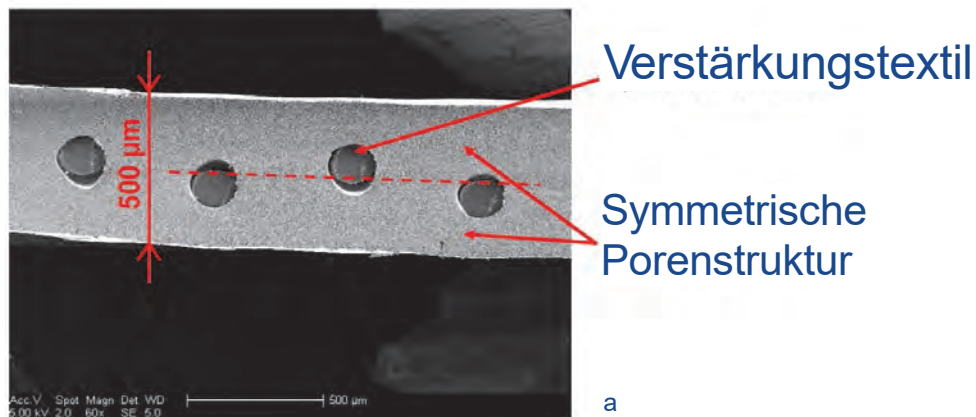
Gasqualität (Zirfon) in Abhängigkeit der Stromdichte



- **Permeationsrate** über Membran ist unabhängig von der Stromdichte. Daher bei geringerer Gasproduktion höhere Verunreinigungen.

- Druck, Temperatur, Gaslöslichkeit und Kalilaugenumschlag haben einen Einfluss auf die Gasqualität.

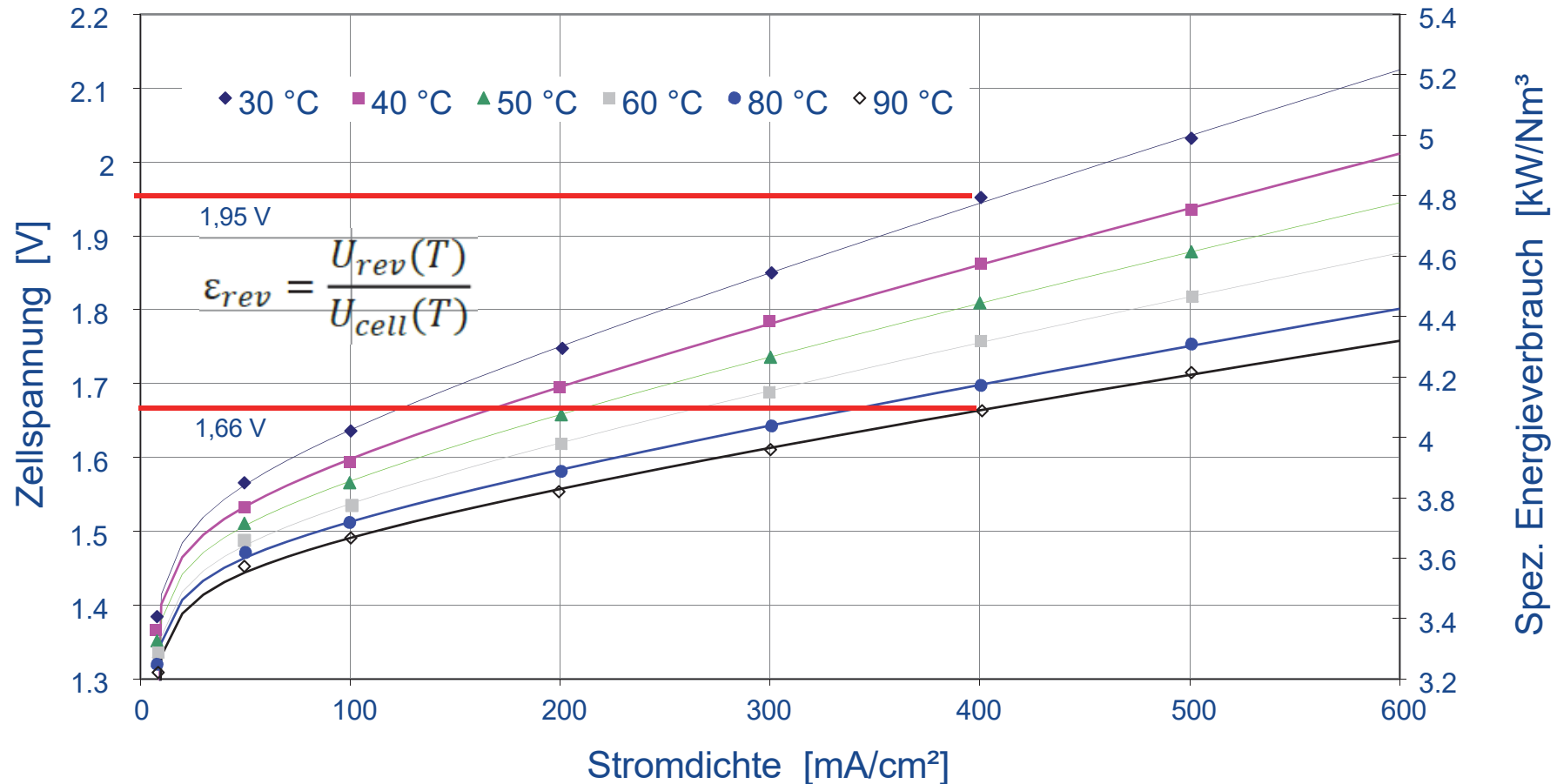
→ Geforderte Gasqualitäten von 5.0 (Tankstelle) sind nur mit Gasaufbereitungsanlagen möglich



Zirfon: PSU-Vlies mit Zirkonoxid-Beschichtung

- ZrO_2 hydrophil, feine Porenstruktur
- KOH füllt Poren
- KOH-Transport von Hydroxidionen
- Flächen-Widerstand ca. $0.1 \Omega\text{cm}^2$

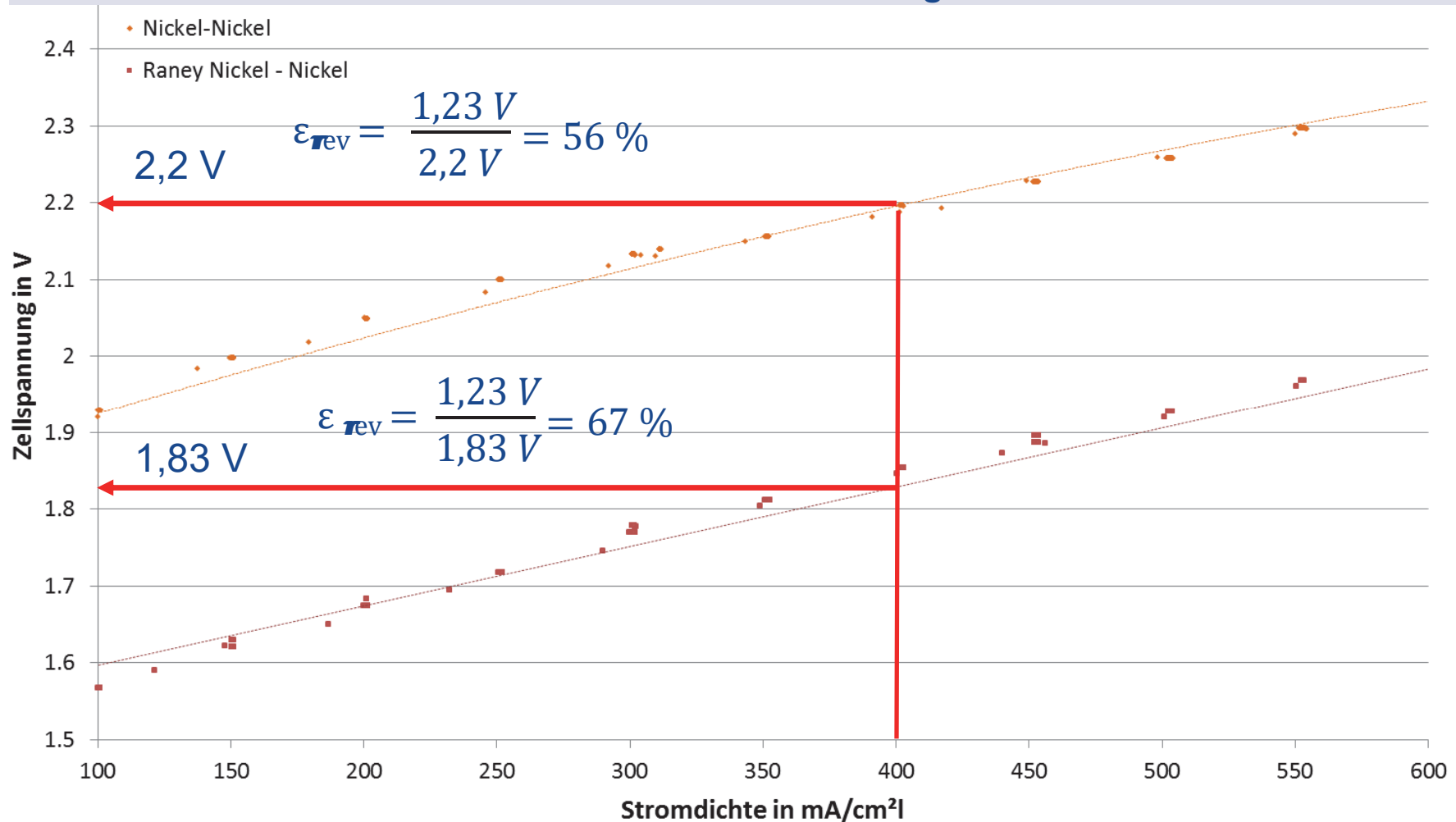
Zellspannung (Temperatur)



Spannungs-Wirkungsgrad (400 mA/cm², 30°C) $\sim \epsilon_{rev} = 63 \%$

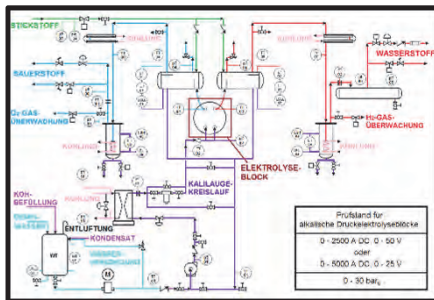
Spannungs-Wirkungsgrad (400 mA/cm², 90°C) $\sim \epsilon_{rev} = 74 \%$

Erhöhung des Spannungs-Wirkungsgrades U-I Kennlinien 10 bar_g 70°C

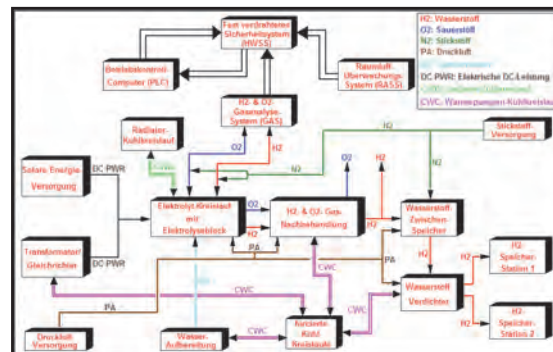


Mit einer Raney-Nickel-Beschichtung auf der Kathode verbessert sich der Spannungs-Wirkungsgrad um 11%

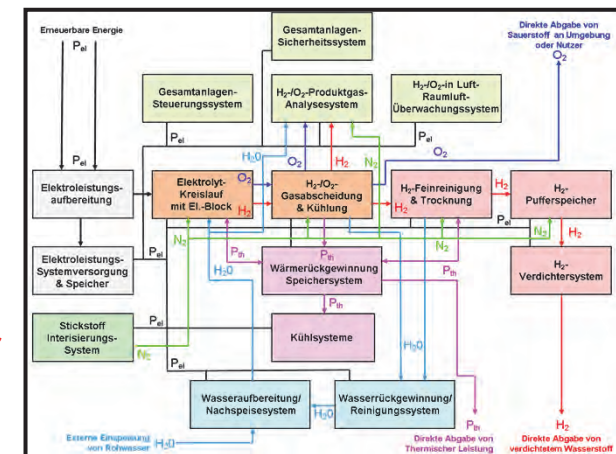
Weiterentwicklung H₂-Erzeugung mittels Elektrolyse: Vom Einzelanlagenbau zur Serienfertigung



Heute
Verfahrenstechnischer
Anlagenbau

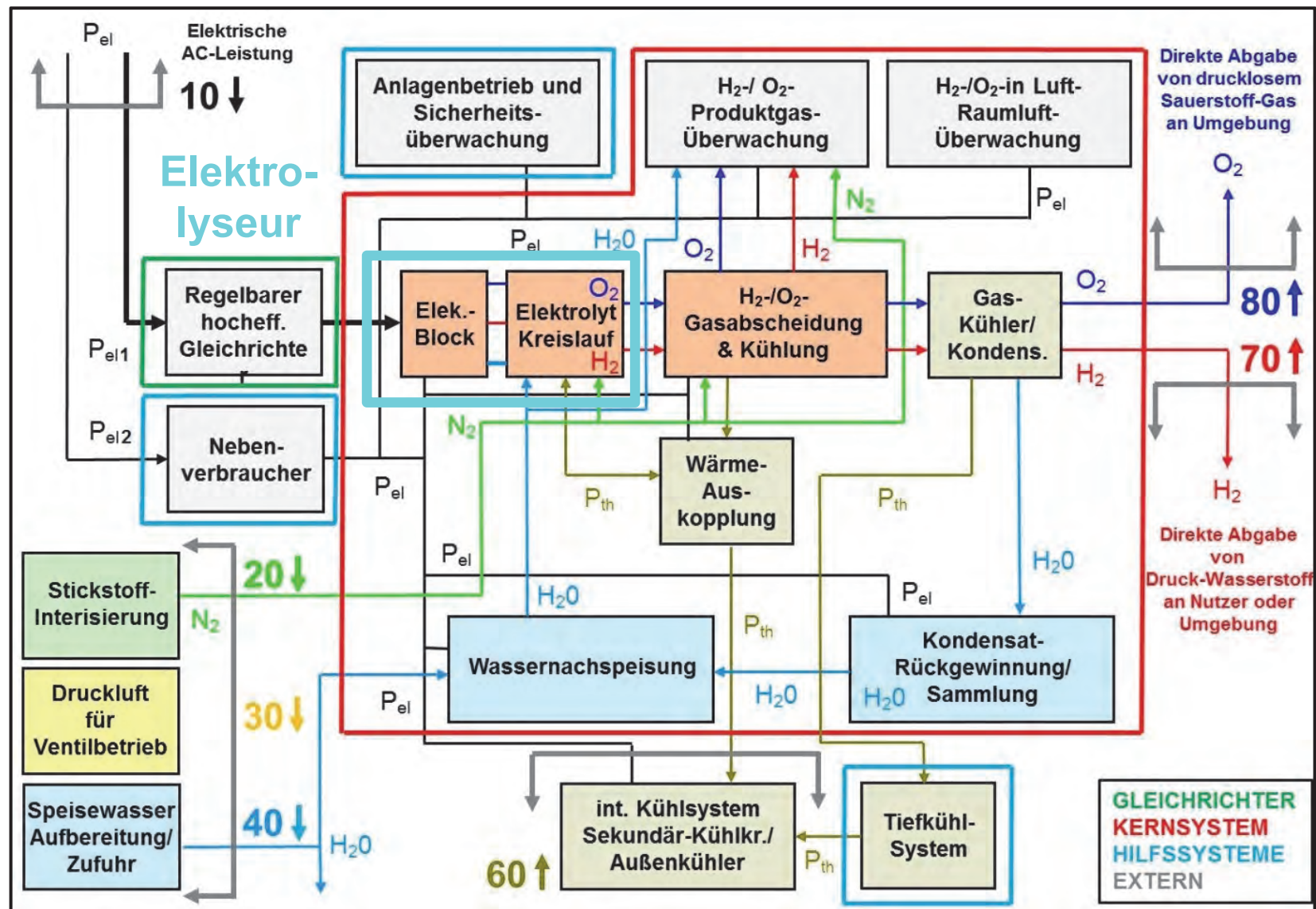


Übergang
Manufaktur-
bauweise

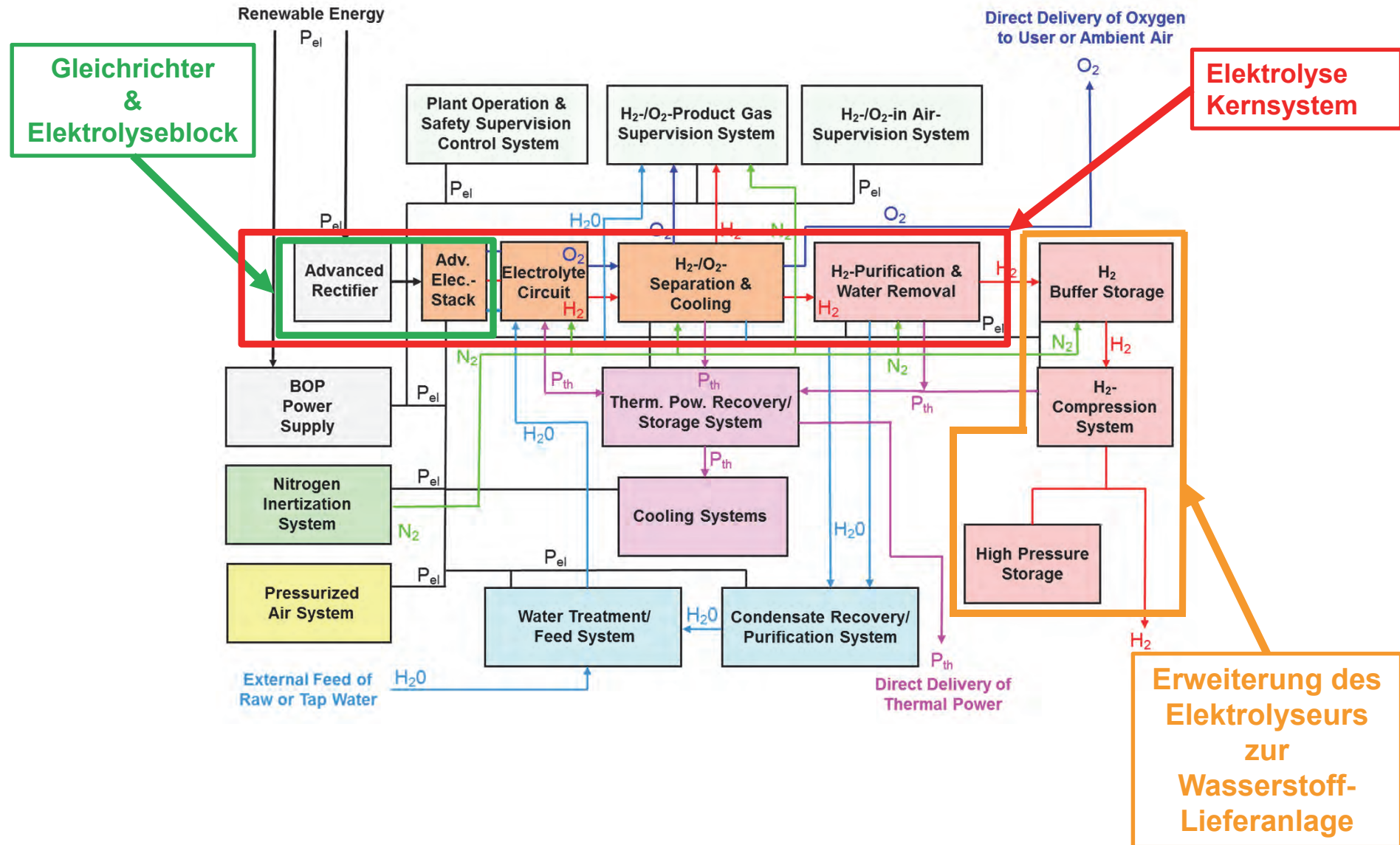


Morgen
Industrieller
Serienbau

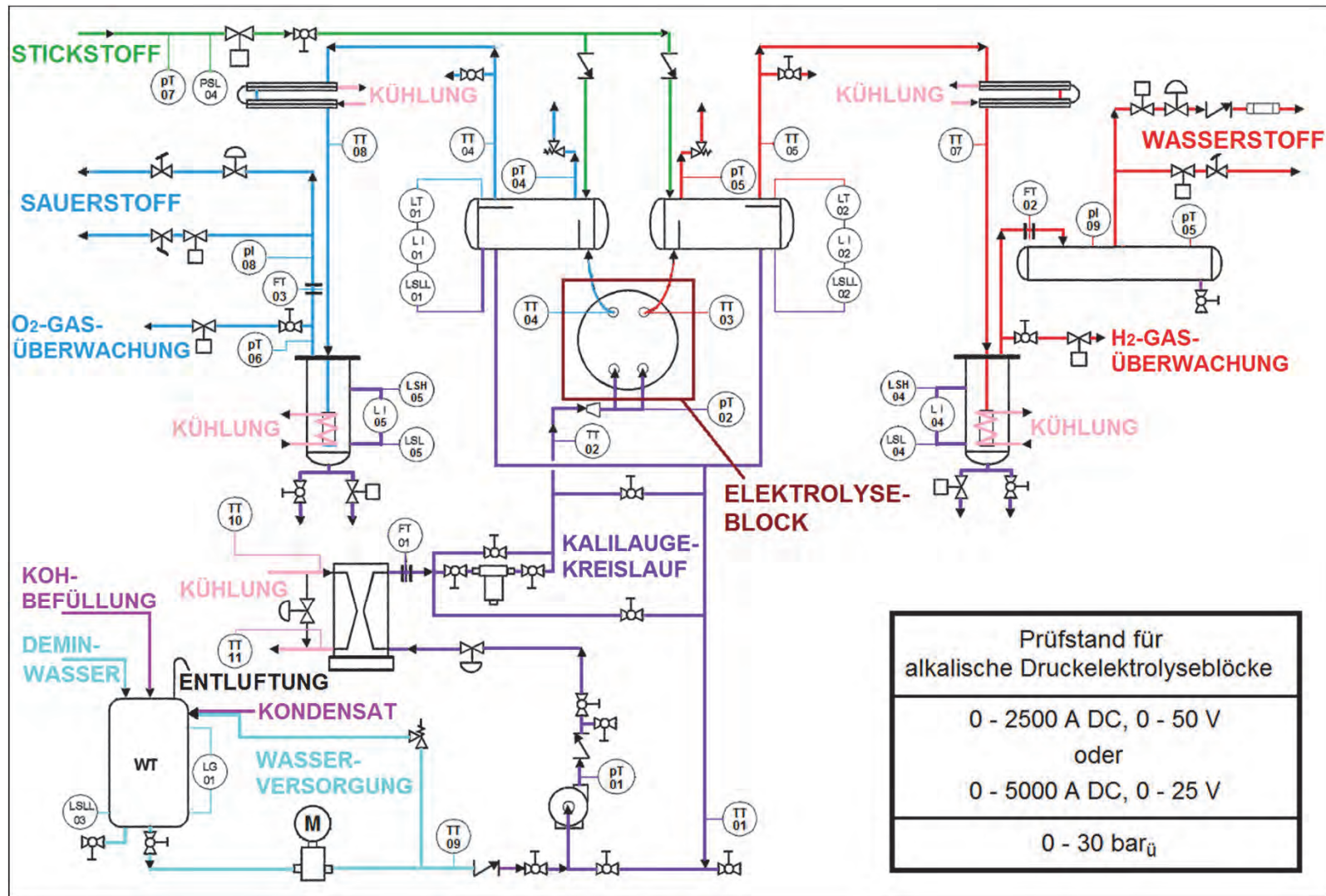
Blockschaltbild eines alkalischen Elektrolyseurs



Systemkonzept einer H₂-Lieferanlage mit Elektrolyse



Verrohrungs- und Instrumentierungs-Schema eines alkalischen 100 kW Druckelektrolysesystems



Wasserstoff

Sauerstoff

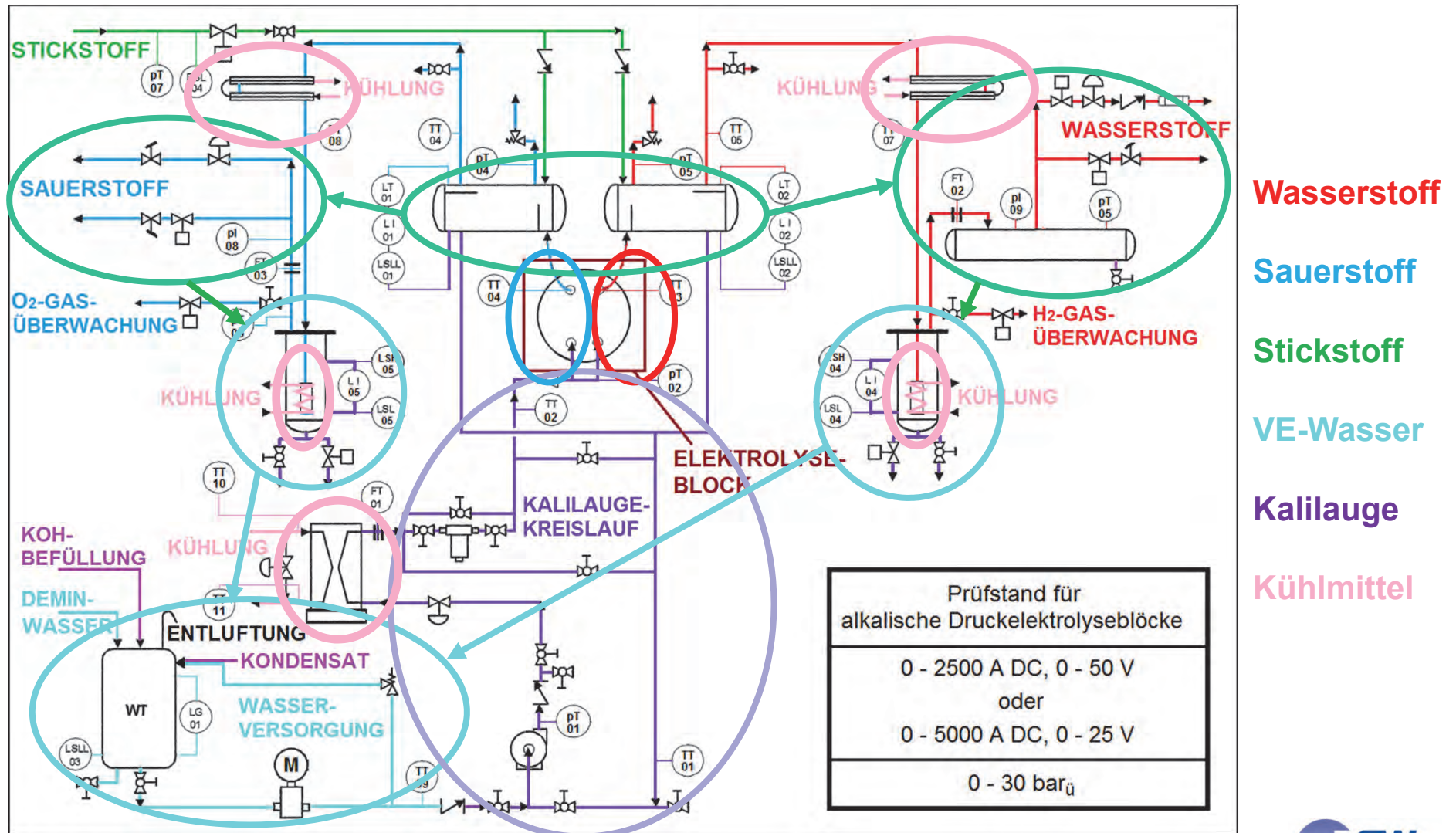
Stickstoff

VE-Wasser

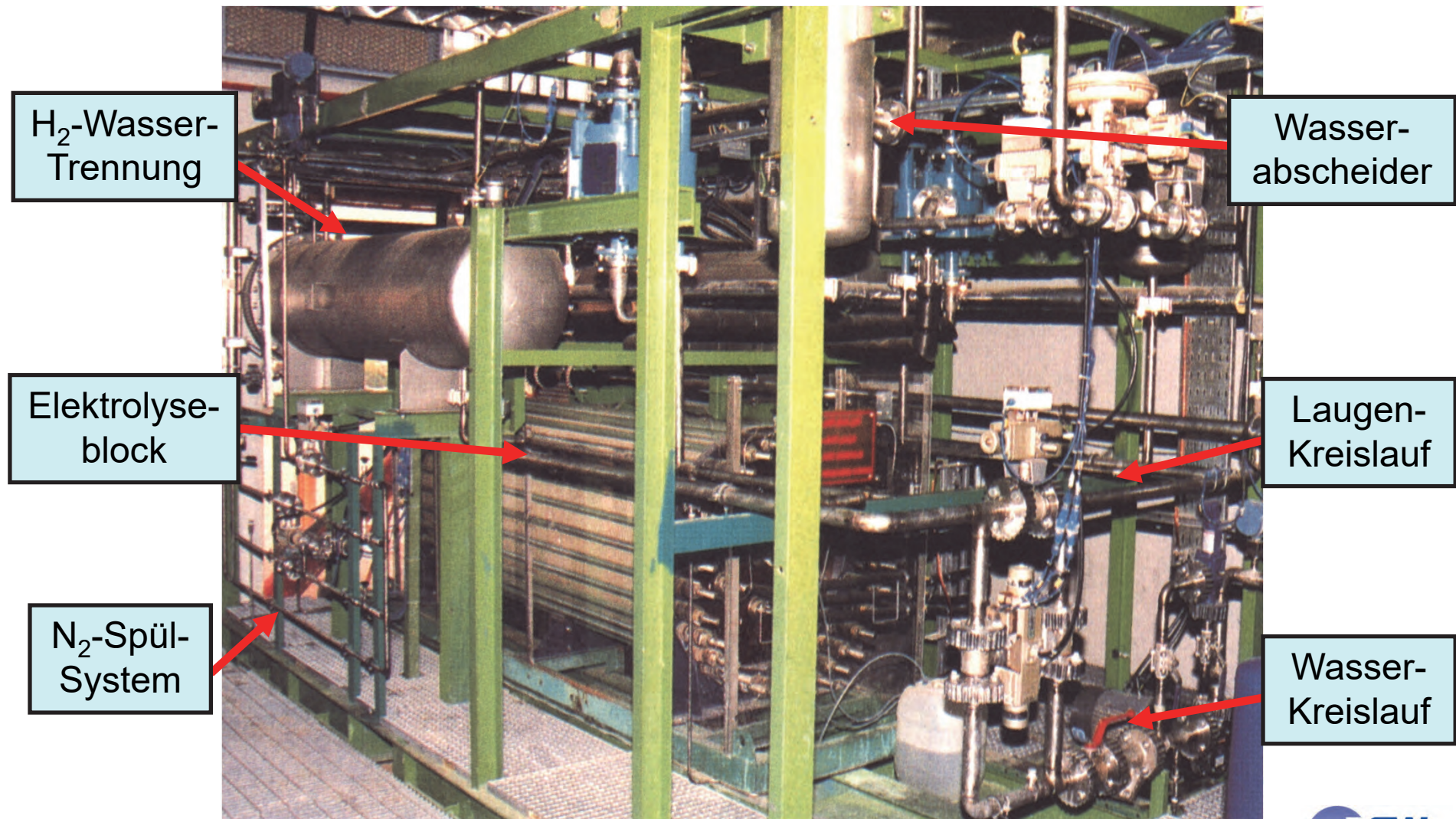
Kalilauge

Kühlmittel

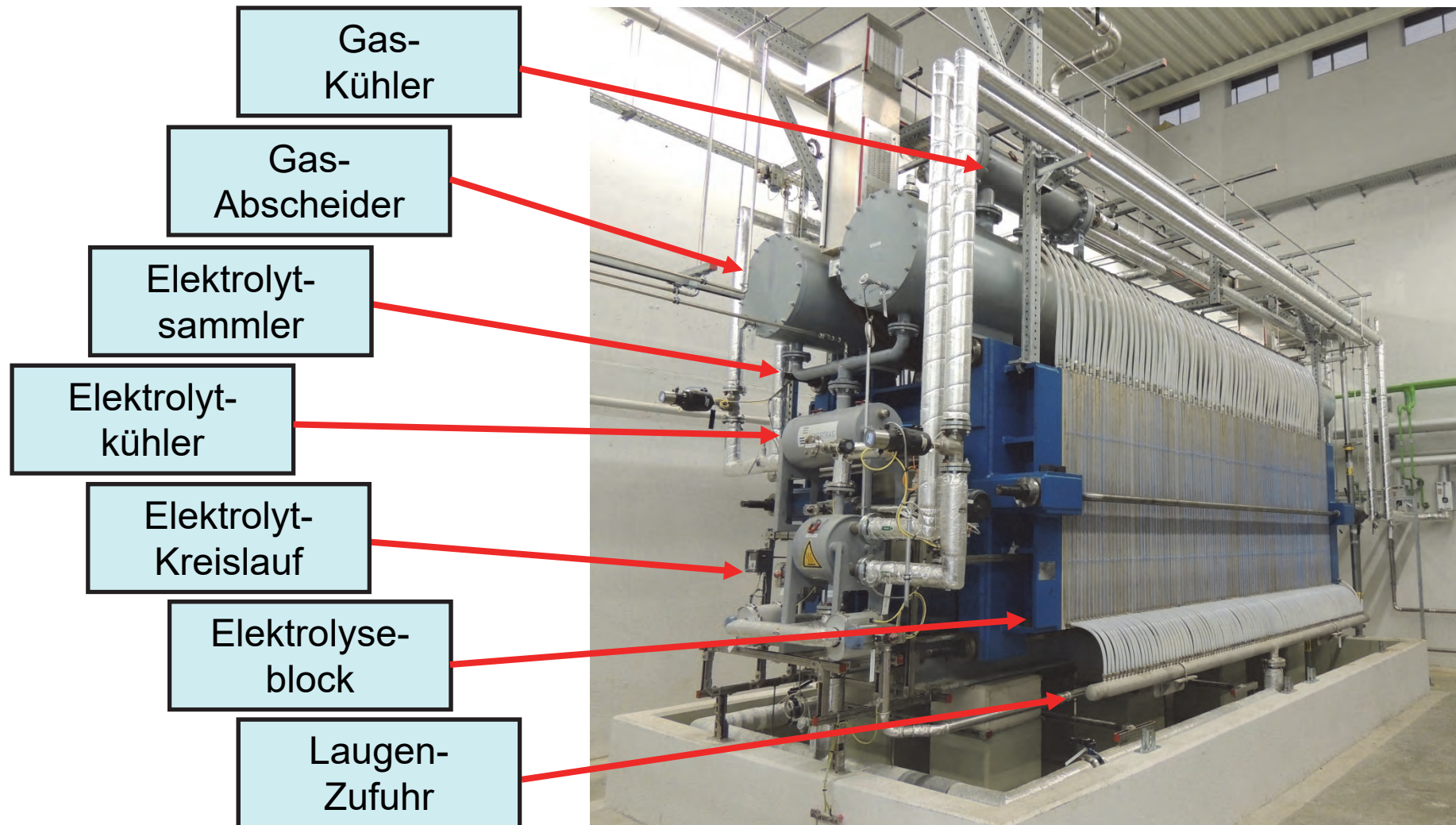
Komplexe Kreislauf-Koppelungen im Elektrolysesystem



Fortschrittlicher alkalischer Druck-Elektrolyseur mit 500 kW elektrische Leistung in Saudi Arabien



Fortschrittlicher atmosphärischer, alkalischer Elektrolyseur in Werlte mit 2400 kW elektrische Leistung



Systemsisicherheit

Haupt-Gefahren / Sicherheitsmechanismen

Leckage von Wasserstoff -> Gefahr einer Explosion

- Vermeidung Zündquellen (Atex Zone 2)
- Raumluftüberwachung (Stopp Gasproduktion, Warnung von Personal, Abschaltung von Zündquellen)

Leckage von Sauerstoff -> Gefahr von Brand

- Raumluftüberwachung (Stopp Gasproduktion, Warnung von Personal)

Leckage von Kalilauge -> ätzend, leicht wassergefährdend

- AwSV-Wanne
- Leckage-Sensor

Gasunreinheiten / Vermischung O_2 und H_2 -> Gefahr einer Explosion

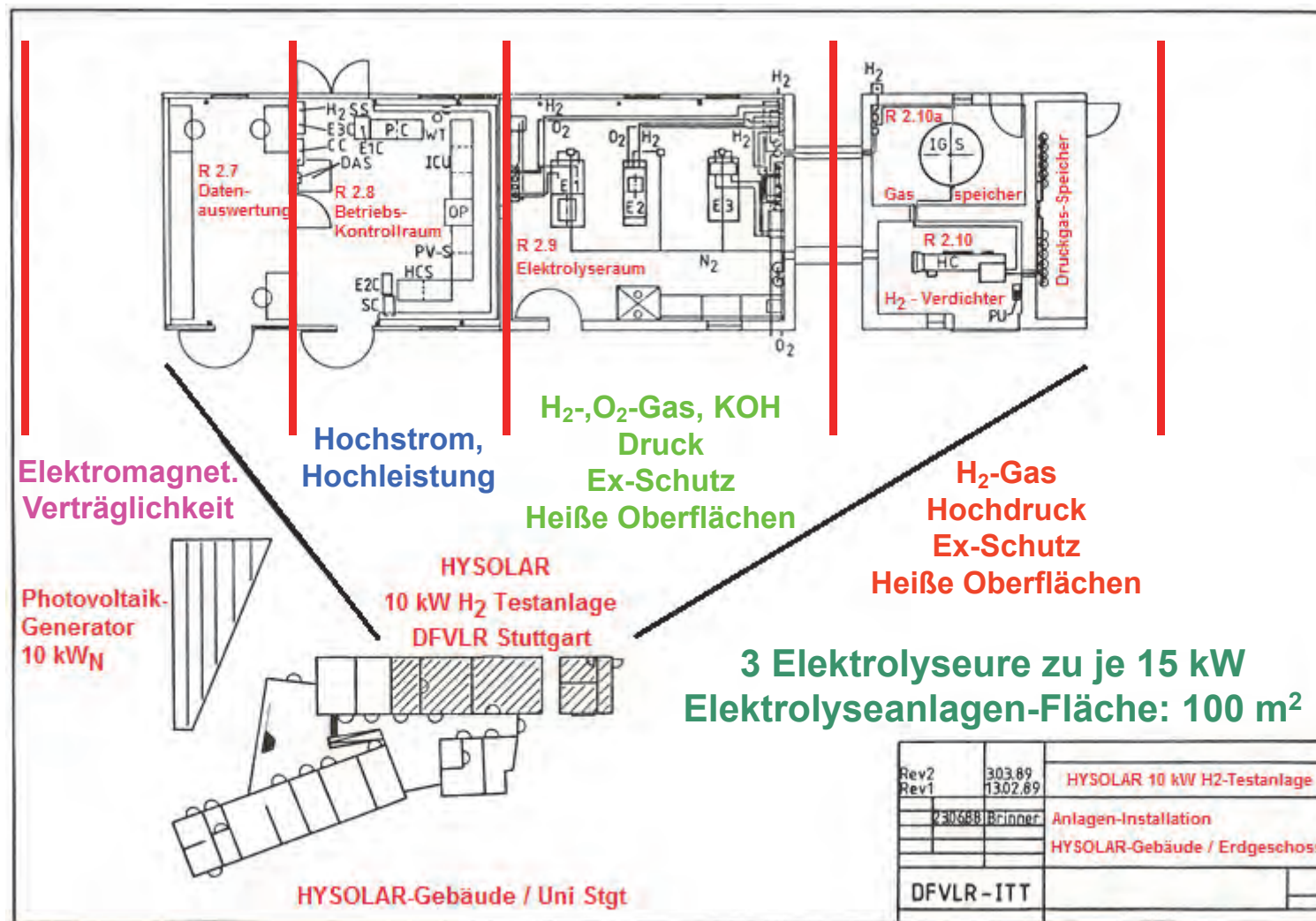
- Füllstands-Überwachung in den Separatoren
(Gewährleistung der Trennung von H_2 und O_2)
- Produktgasanalyse (H_2 -in- O_2 und O_2 -in- H_2 -Messung, Stopp Gasproduktion)

Hochstrom/ EMV -> Gefahr einer Explosion, Netzurückwirkung, Betriebsversagen

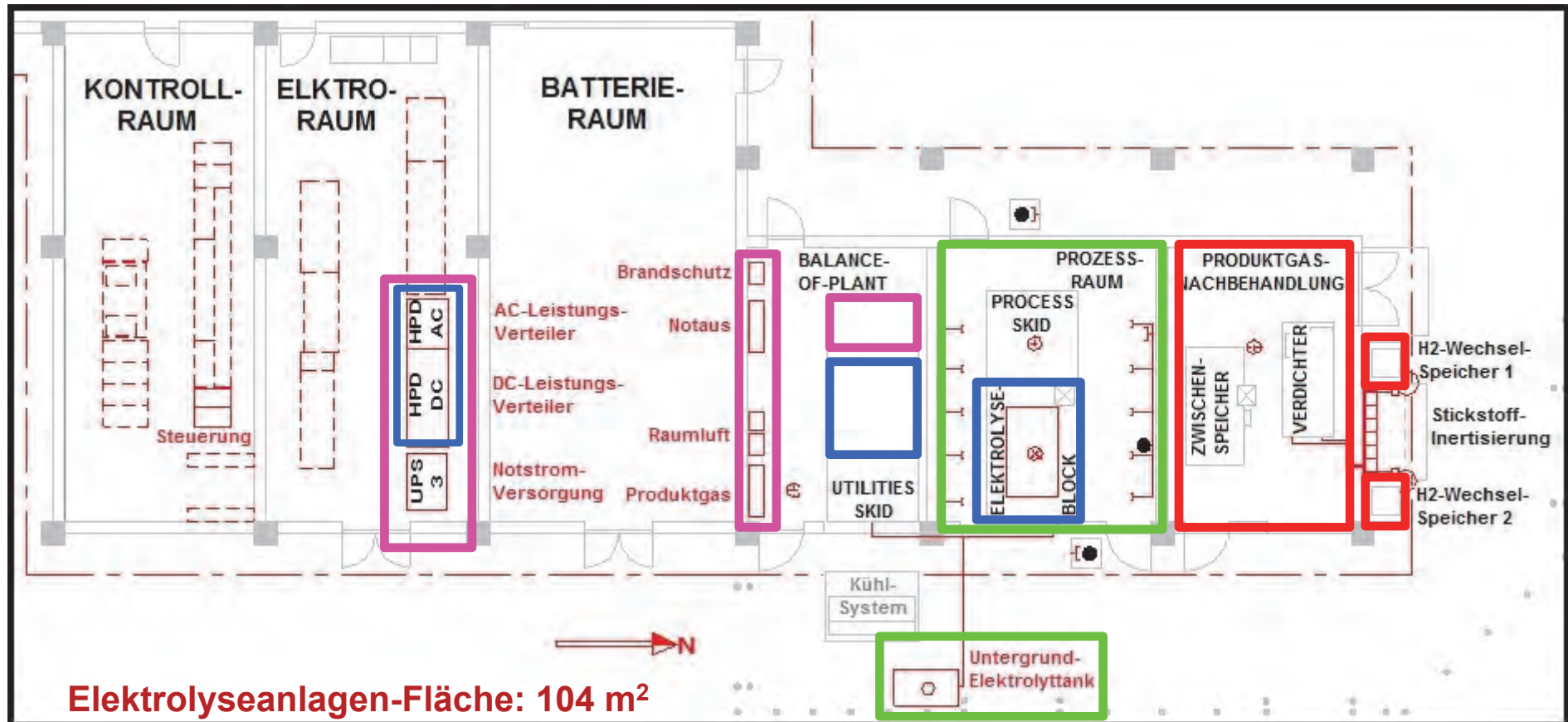
- Nicht lösbare Verbindung, sichere Abschaltung, Blindstromkompensation
- EMV-Sicherheit, Abschirmung, sichere Trennung AC – DC - Kleinspannung

HYSOLAR 10kW PV-Elektrolyseanlage von 1985

Anforderungen an die Betriebsräume, Gebäude



Gebäudeinstallation der 350kW PV-Elektrolyseanlage in Riyadh / Saudi Arabien, Gebäude, Skid



**Elektromagnet.
Verträglichkeit**

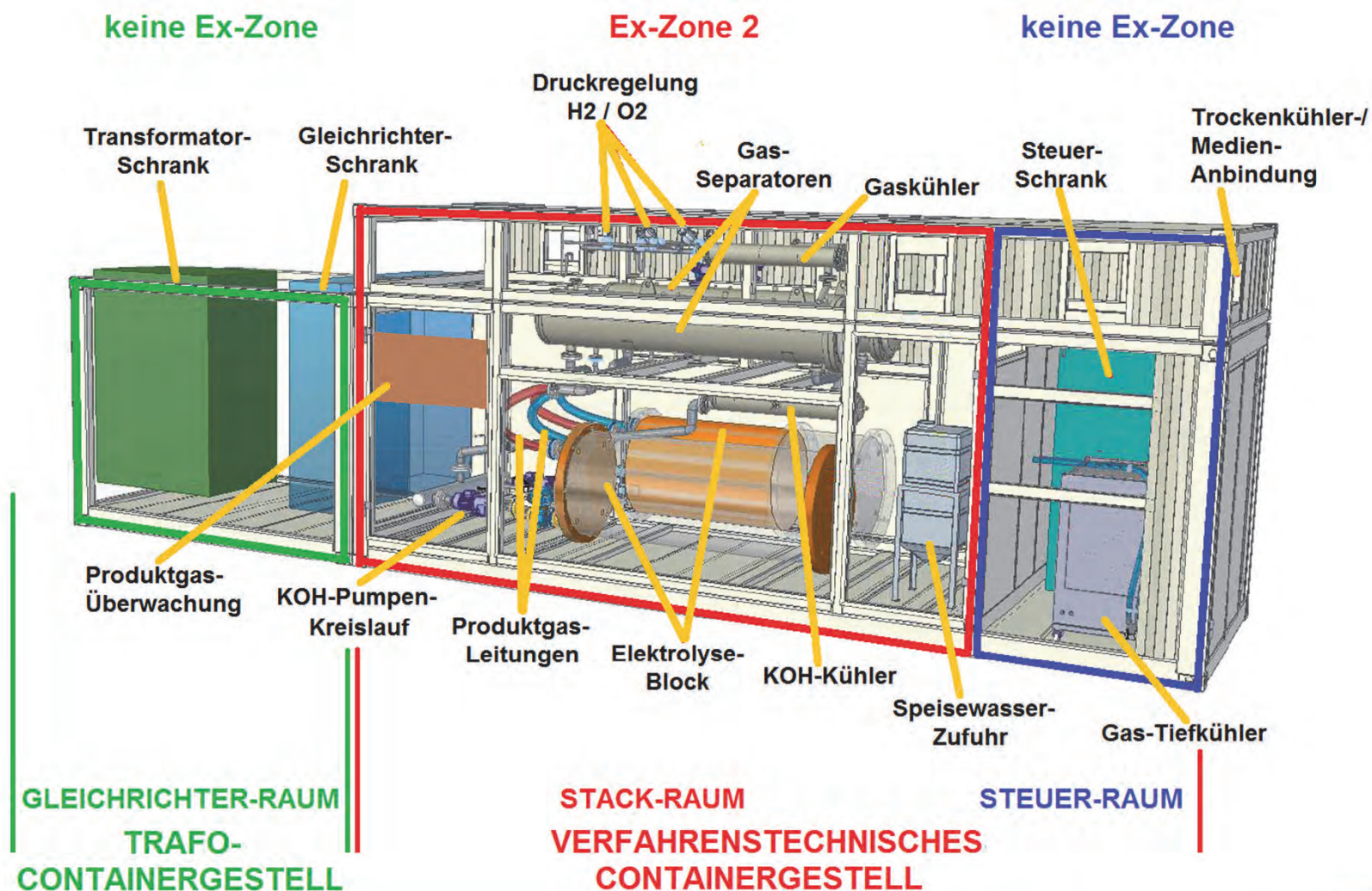
**Hochstrom,
Hochleistung**

**H₂-, O₂-Gas, KOH
Druck
Ex-Schutz
Heiße Oberflächen**

**H₂-Gas
Hochdruck
Ex-Schutz
Heiße Oberflächen**

Quelle: A. Brinner, DLR-FK, Stuttgart

Aufbaukonzept einer modernen alkalischen 1MW Container-Druckelektrolyseanlage



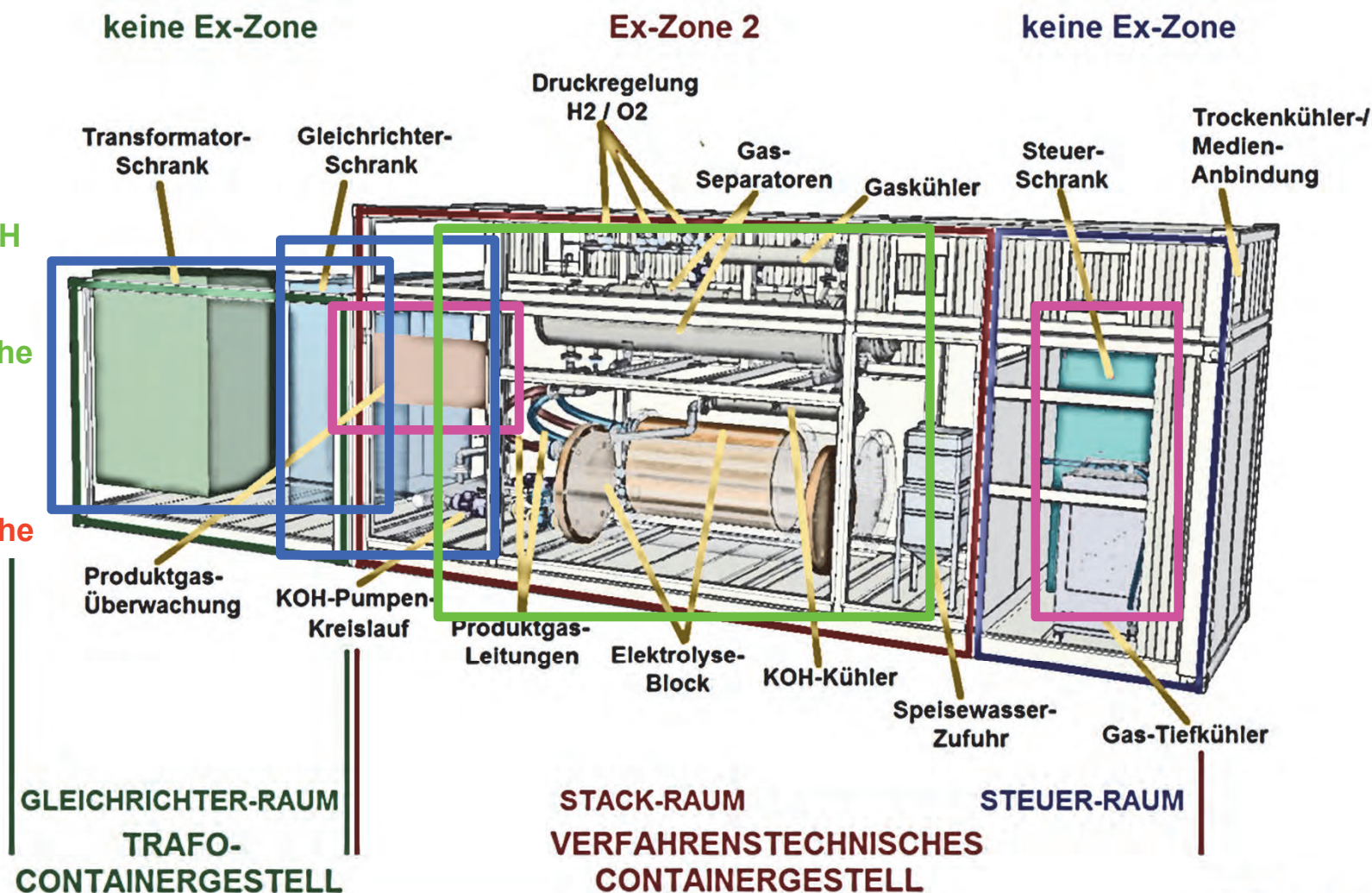
Sicherheitsanforderungen einer alkalischen 1MW Druckelektrolyseanlage, Container

Elektromagnet.
Verträglichkeit

Hochstrom,
Hochleistung

H₂-, O₂-Gas, KOH
Druck
Ex-Schutz
Heiße Oberfläche

H₂-Gas
Hochdruck
Ex-Schutz
Heiße Oberfläche



Die Entwicklung der e-gas-Anlage aus dem All betrachtet



2011

6,3 MW-Elektrolyse-
Methanisierungsanlage
kombiniert mit
Schlachtabfall-Biogasanlage



Sicher eine der
ersten PtG-
Anlagen mit
einem eigenen
Hinweisschild an
einer Kreisstraße

2020



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



- Referenzstandort für strombasierten Wasserstoff in Baden-Württemberg
 - > 1 MW_{el} („H₂ für 1.000 BZ-PKW“)
 - Technologie-Benchmark
- Weiterentwicklung Technologie und Demonstration in Realumgebung
- enge Zusammenarbeit Industrie, F&E
- Anschlussperspektive

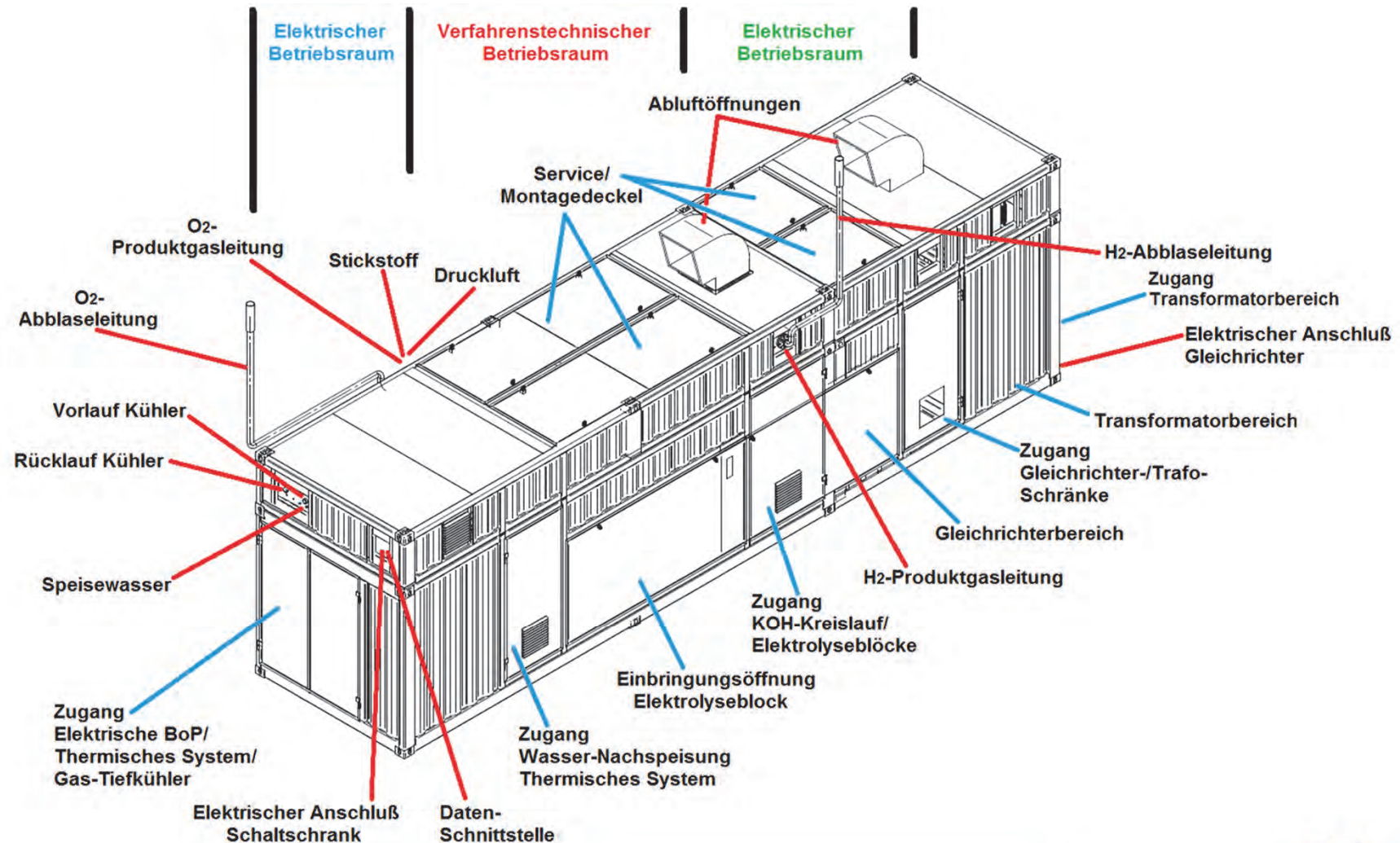
Projekt-Kenndaten

- Laufzeit: 07/2015 – 10/2020
- 12 Partner: 4 F&E, 8 Industrie-Ptr assoziiert
- Finanzierung: Wirtschaftsministerium BW

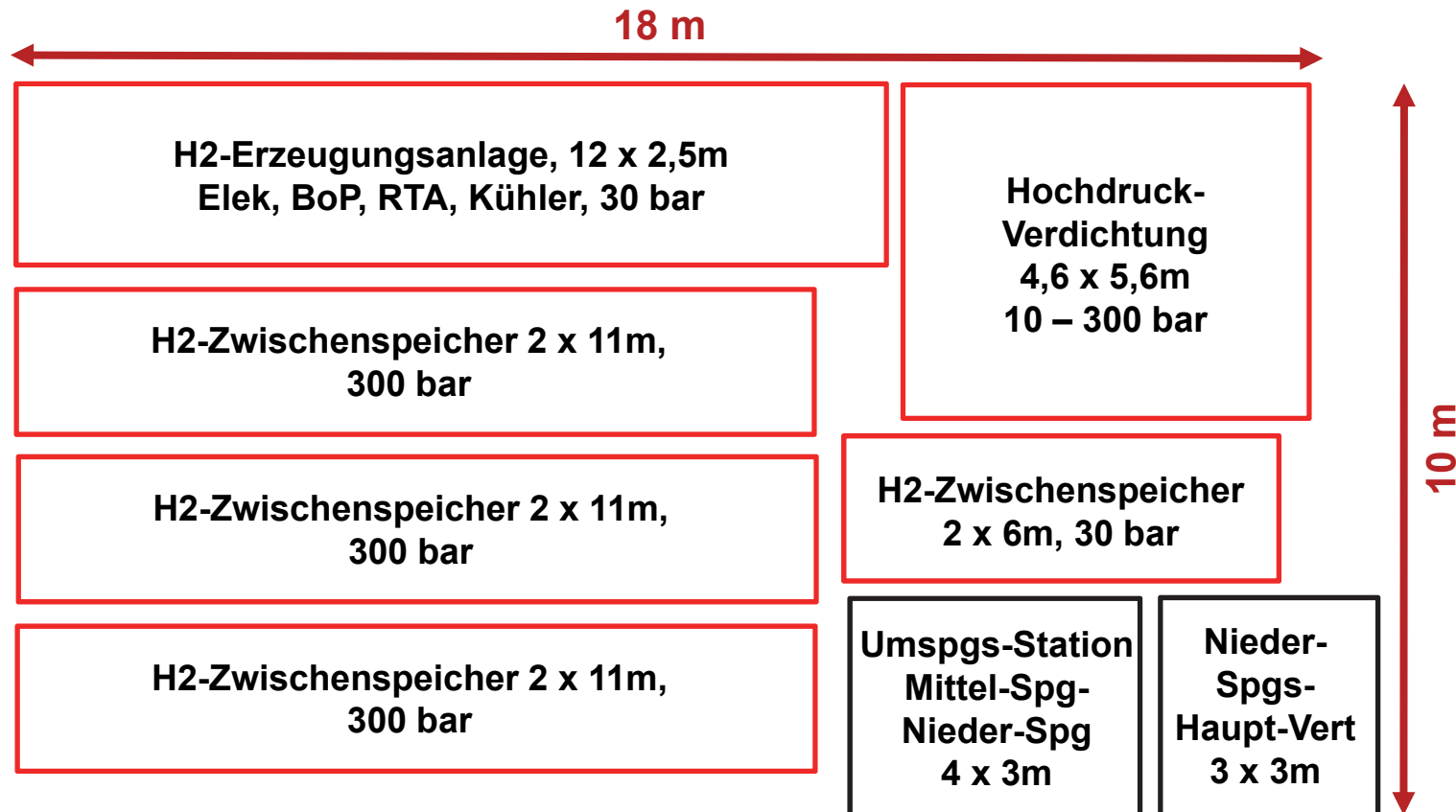
Aufgaben ZSW

- Unterstützung Engineering/Standortplanung
- Technisches Monitoring
- Forschungsbetrieb (300 kW F&E-Anlage)
- Geschäftsmodell-Analyse

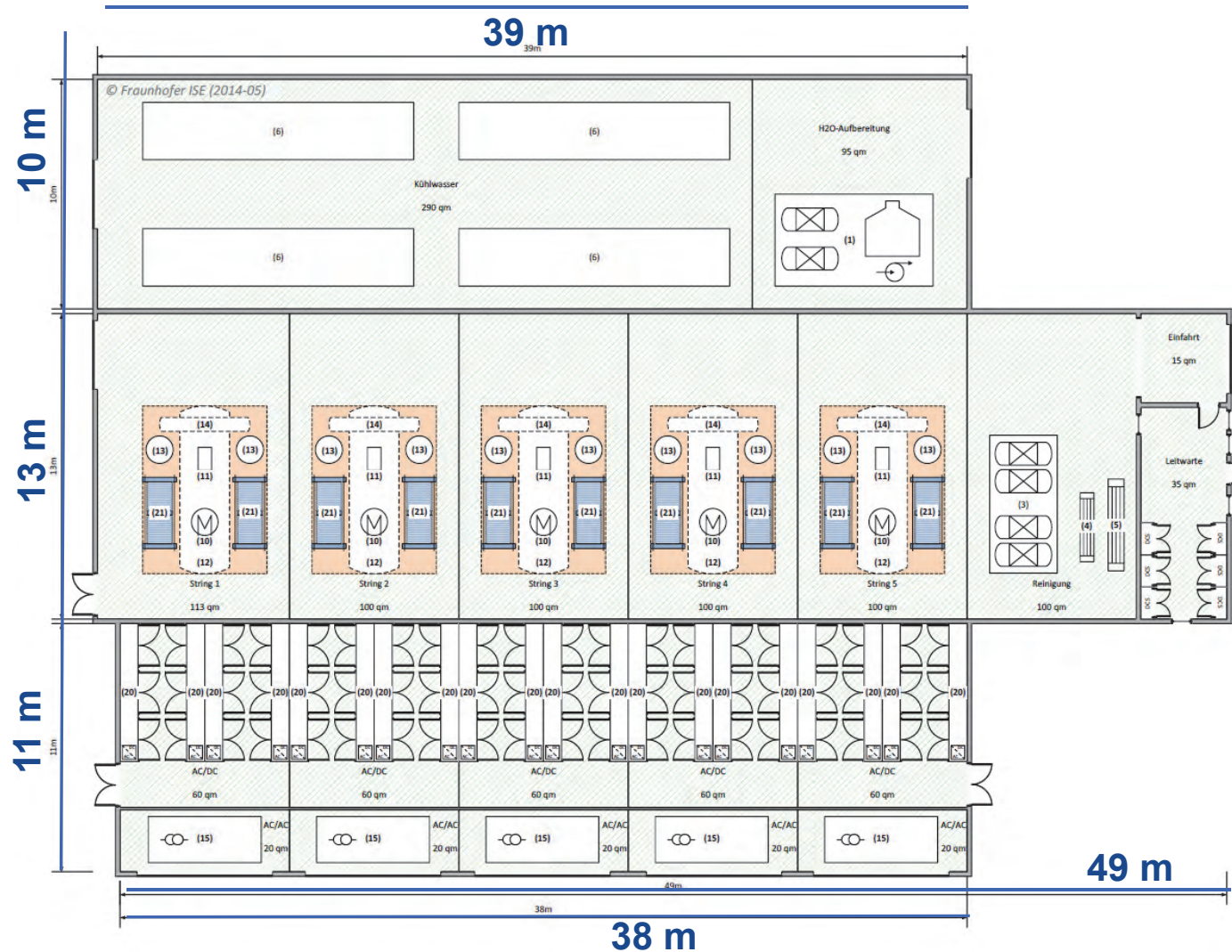
Technische Perspektive der PEM-Elektrolysetechnologie einer alkalischen 1MW Druckelektrolyseanlage



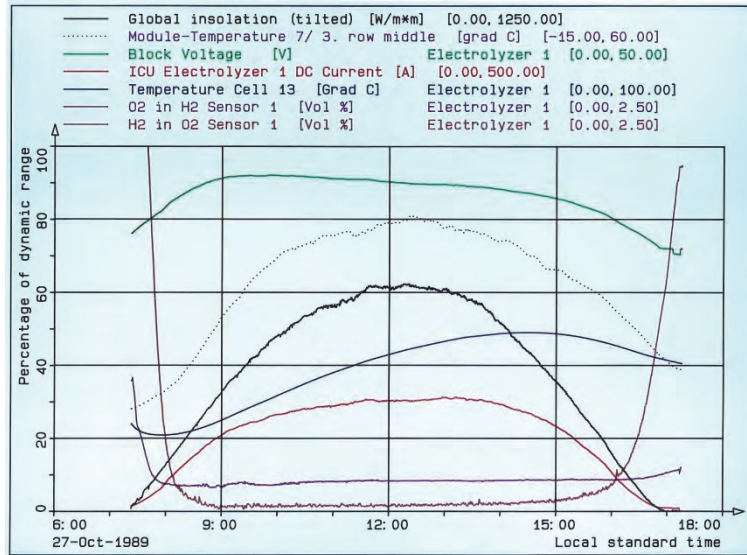
Footprint einer Hochdruckspeicher-Elektrolyseanlage, 1-2 MW mit ND-Speicher 50kg, HD-Speicher 1225kg



Footprint einer geplanten 100 MW-Wasserstoffanlage mit Balance-of-Plant

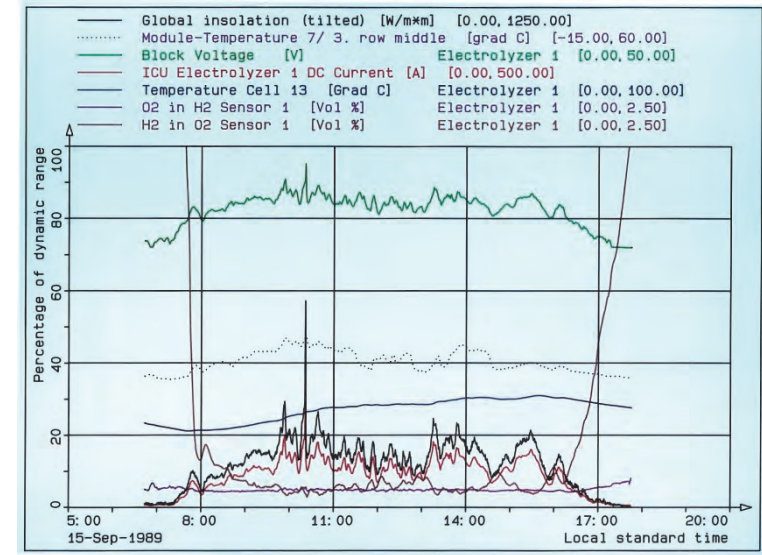


Dynamischer, vorhersehbarer Photovoltaik-Elektrolysebetrieb



27.10.89

Optimaler Betrieb

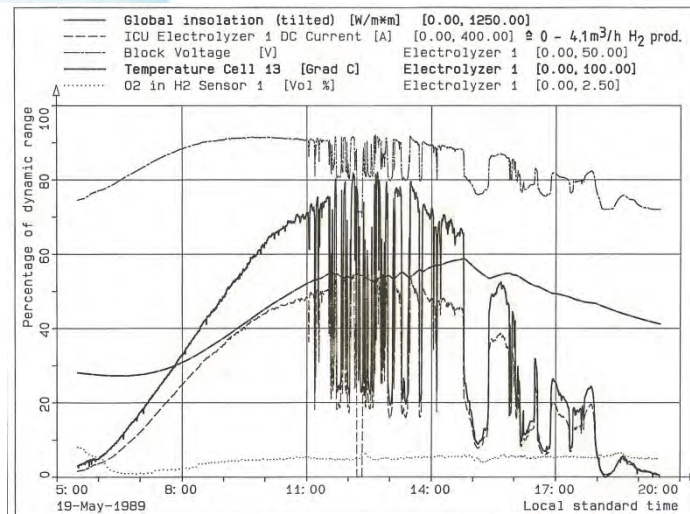


19.09.89

Minimalbetrieb

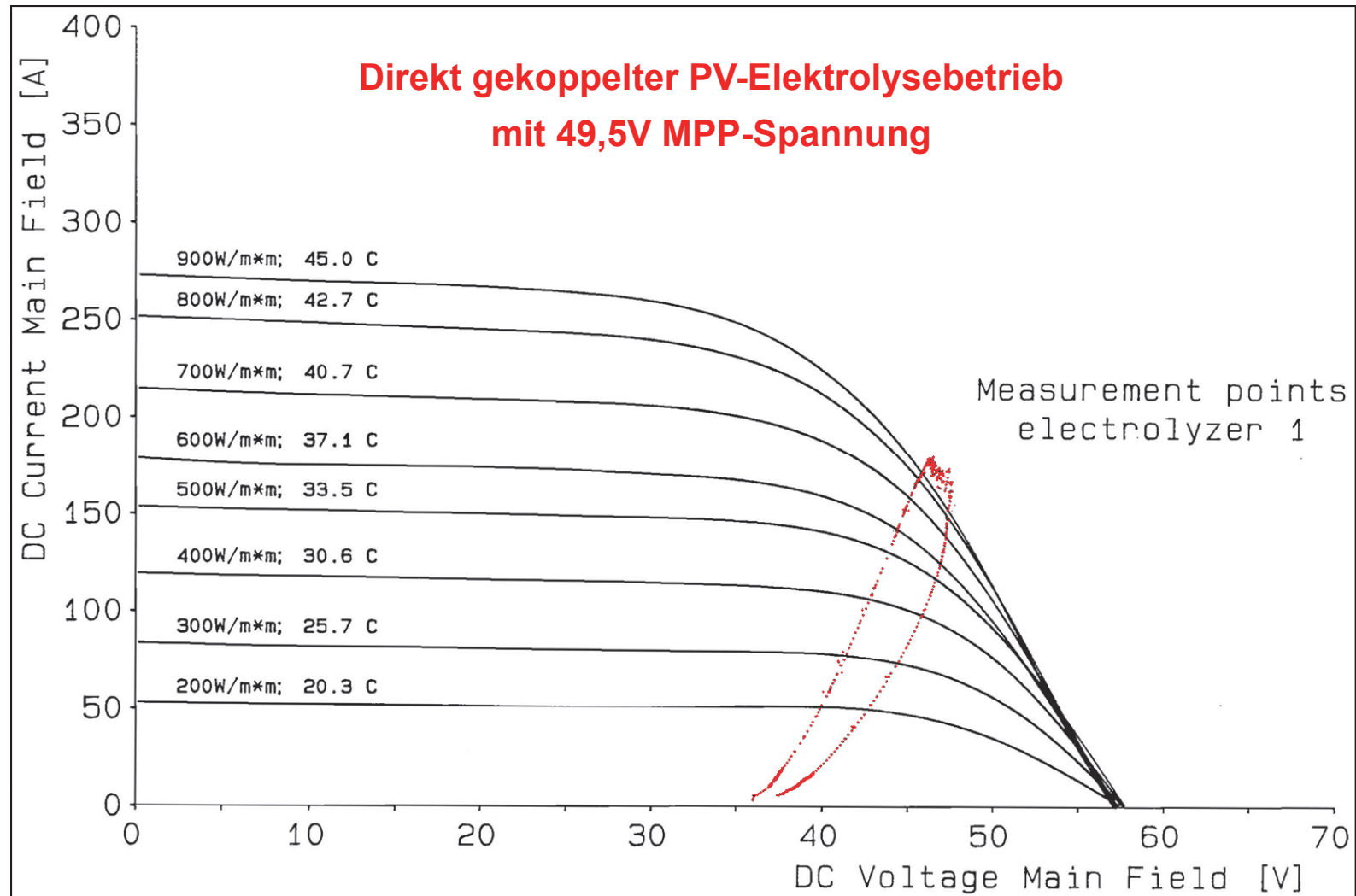
19.05.89

Dynamischer Betrieb

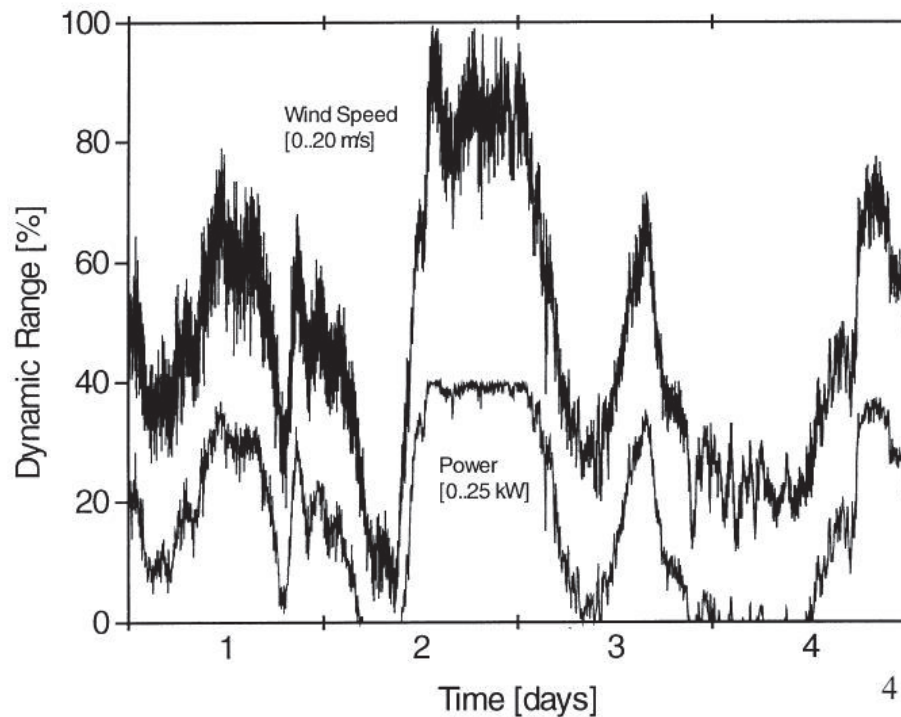


Messungen im Rahmen
des
Deutsch – Saudi Arabischen
HYSOLAR-Projektes

Direkt gekoppelter PV-Elektrolysebetrieb ohne elektrischen Zwischenspeicher



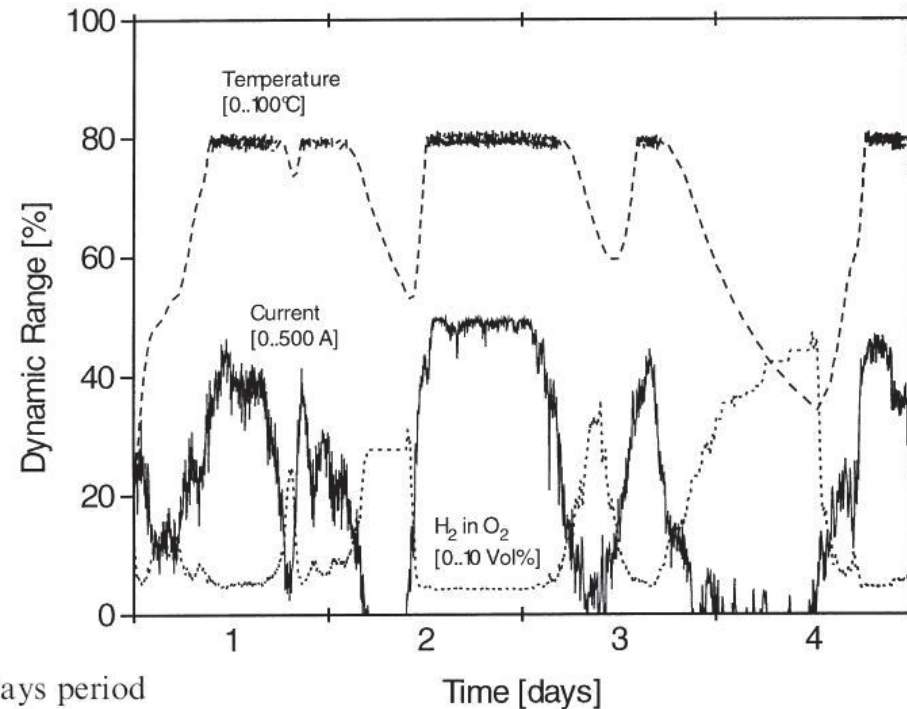
Dynamischer, nicht vorhersehbarer Wind-Elektrolysebetrieb



Measured wind speed time series and typical wind power time series (rated power 10 kW).

1996

Windanlagen-Testbetrieb

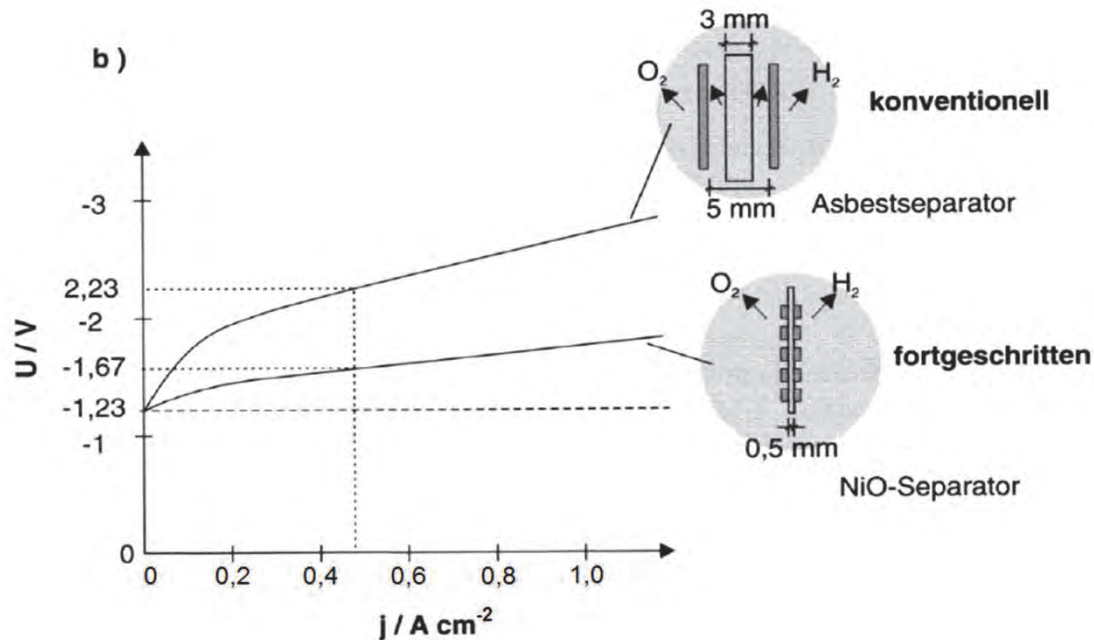


Operation of the electrolyser HE2 using the wind power time series — current, stack temperature, gas impurity level of hydrogen in oxygen.

1997

Dynamischer Elektrolysebetrieb

Ansatzpunkte zur Minimierung des spezifischen Energieverbrauchs einer Elektrolysezelle



- **Nullabstandszelle**
- **Dünnere Membran**
- Minimierung des ionischen Widerstandes im Separator
- **Katalytische aktive Elektrodenbeschichtungen**
- **Hohe innere Elektroden-Oberflächen**
- **Optimierung der Gasabfuhr/ Elektrolyt-Zufuhr zur Elektroden-Oberfläche**
- Minimierung der elektronischen Widerstände
- Minimierung der Oberflächen-Übergangs-Widerstände
- u.v.m

Noch Fragen?

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

Dipl.-Ing. Andreas Brinner

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

Regenerative Energieträger und Verfahren

Meitnerstr. 1, D-70563 Stuttgart

Tel: ++49 (0)711 7870-338, Email: andreas.brinner@zsw-bw.de

