



H₂-Konferenz Rheinfelden

Evonik

22. Oktober 2020

Ist die Produktion und der Einsatz von Wasserstoff technisch sicher möglich?

Dipl.-Ing. Andreas Brinner

Dr. Marc-Simon Löffler

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung

Baden-Württemberg (ZSW)

Regenerative Energieträger und Verfahren (REG)

Meitnerstr. 1, D-70563 Stuttgart

Vortragsinhalt:

- Kurzvorstellung des ZSW
- Grundsätzliches zum Wasserstoff
- Einführung in die Wasserstoff-Sicherheit
- Elektrolyse-Technologie
- Wasserstoff-Sicherheit in Elektrolyseanlagen
- Sichere Wasserstoffnutzung
- Betrieb von Elektrolyseanlagen

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



Kurzvorstellung des ZSW

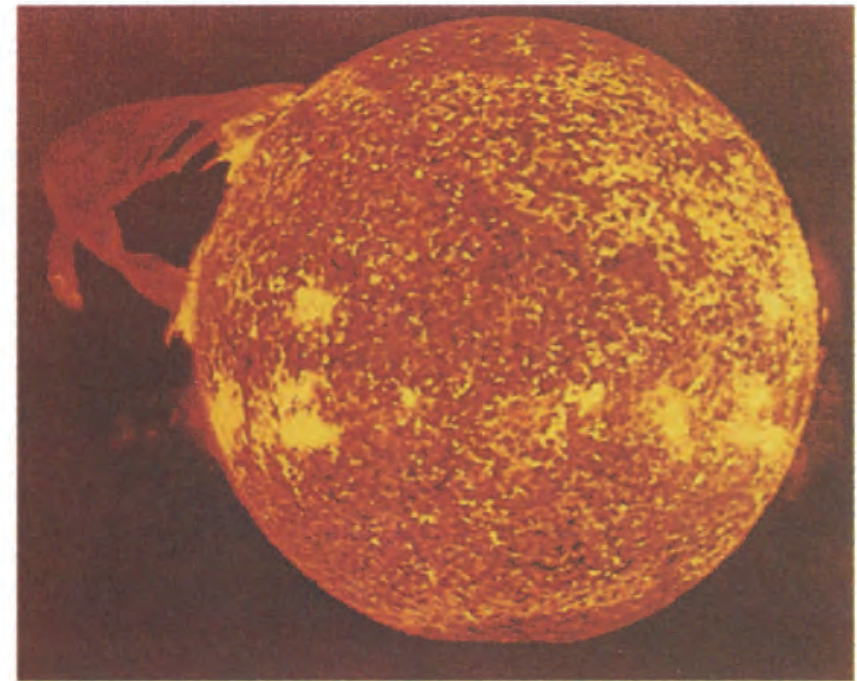
F&E-Themen des ZSW



Wasserstoff

Wasserstoff ist das häufigste Element im Kosmos

Das Universum besteht zu 75 % aus Wasserstoff und zu 23 % aus Helium. Alle anderen Elemente sind aus Wasserstoff und Helium entstanden: durch die Verschmelzung von Atomkernen im Inneren der Sterne. Alle auf der Erde vorkommenden Elemente wurden so vor Jahrmilliarden in Sternen gebildet.

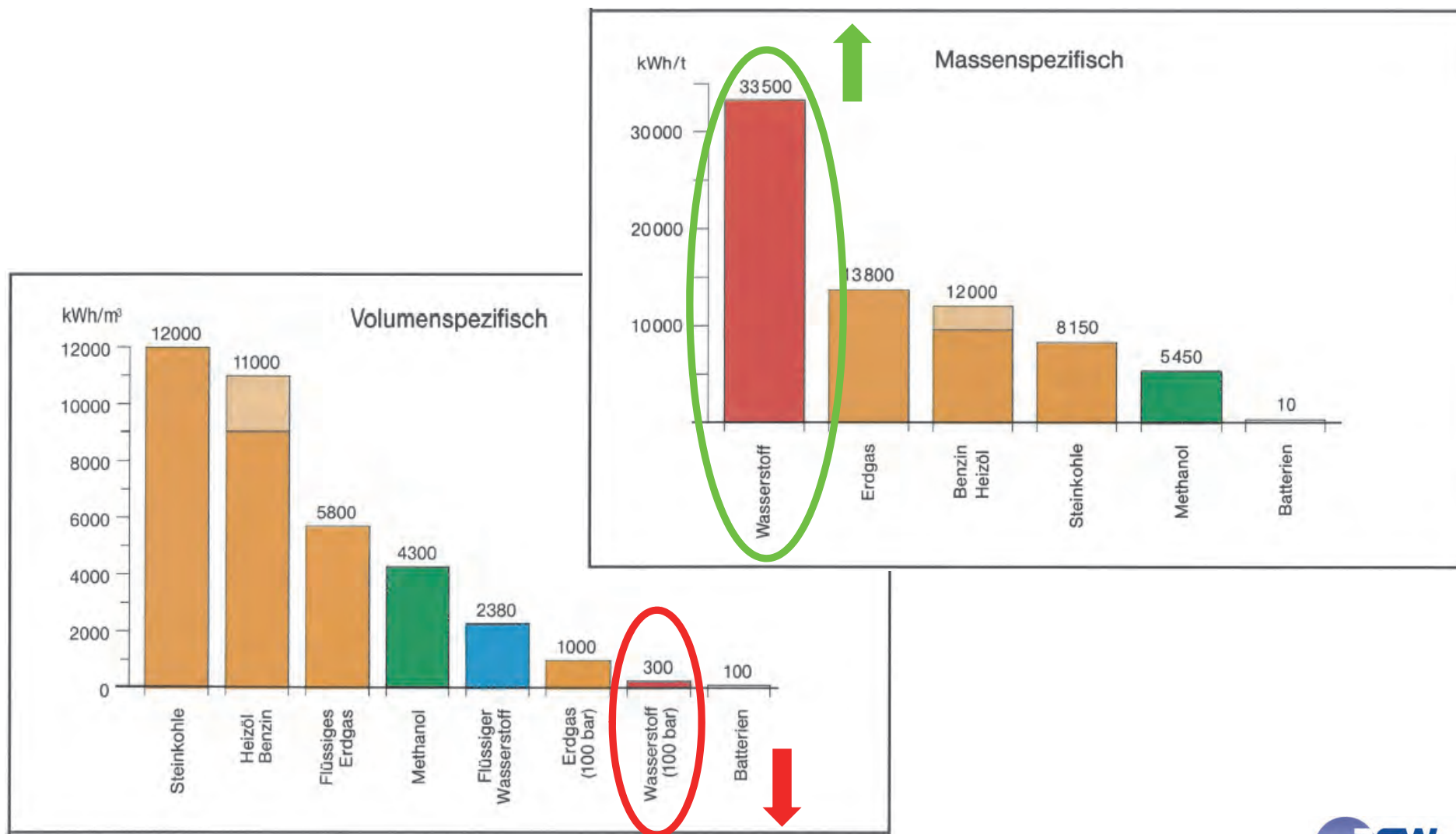


Protuberanz der Sonne

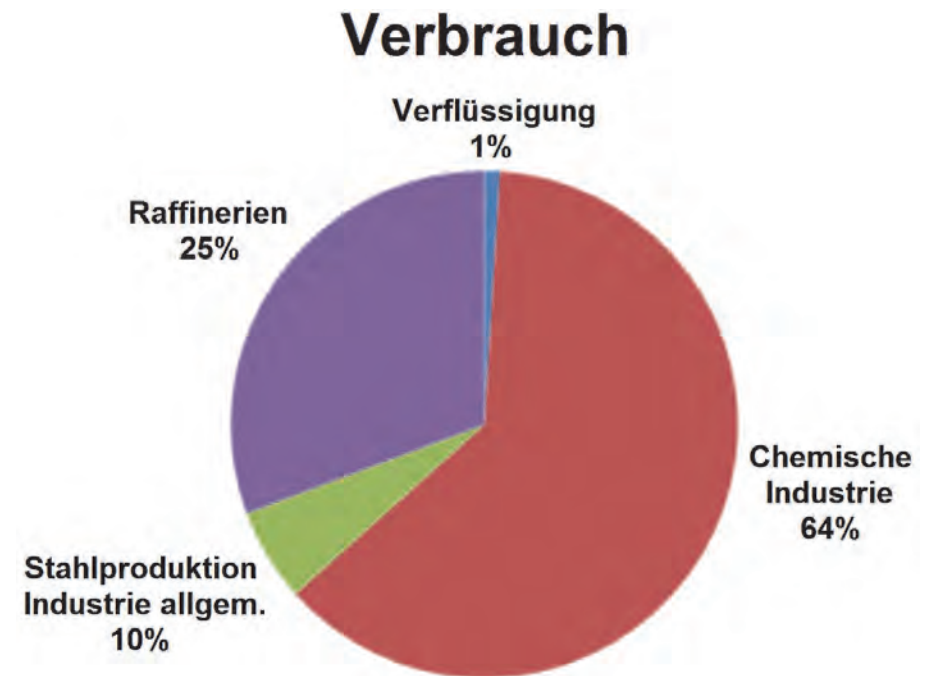
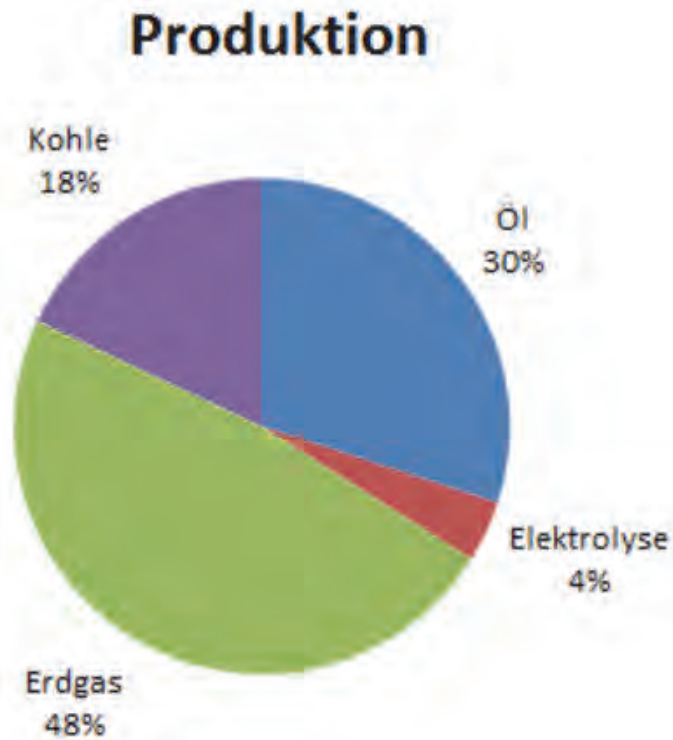
Foto: NASA

Warum Wasserstoff ?

Vergleich der Energieinhalte von Energieträgern



Produktion und Verbrauch von Wasserstoff Stand: 2019



Produktionsvolumen weltweit: ca. 70 Mio. t/a entspr. 778 Mrd. Nm³
Produktionsvolumen BRD: ca. 2,6 Mio. t/a entspr. 29 Mrd. Nm³

Sicherheitsspezifische Eigenschaften von Wasserstoff, Methan und Benzin

Kenngrößen		Wasserstoff		Methan (Erdgas)	Benzin
Unterer Heizwert	(kWs/g)	120	↑	50	44,5
Selbstentzündungstemperatur	(°C)	585		540	228 - 501
Flammentemperatur	(°C)	2045		1875	2200
Zündgrenzen in Luft	(Vol. %)	4 - 75	↓	5,3 - 15	1,0 - 7,6
Minimale Zündenergie	(mWs)	0,02	↓	0,29	0,24
Verbrennungsgeschwindigkeit in Luft (stöchiometrisches Gemisch)	(cm/s)	265	↓	40	40
Detonationsgrenzen	(Vol. %)	13 - 65	↓	6,3 - 13,5	1,1 - 3,3
Detonationsgeschwindigkeit	(km/s)	1,48 - 2,15		1,39 - 1,64	1,4 - 1,7
Theoretische Explosionsenergie	(kg TNT/m ³ Gas)	2,02	↑	7,03	44,22
Diffusionskoeffizient in Luft	(cm ² / s)	0,61	↑	0,16	0,05

Sicherheitstechnische Einordnung von Wasserstoff

Explosionsgruppe / Temperaturklasse von Wasserstoff



Explosions- gruppe \ Tempe- raturklasse	IIA	IIB	IIC
T1			Wasserstoff

Explosionsdruck

Der Druck, der bei der Verbrennung eines explosionsfähigen Gemisches infolge der thermisch bedingten Gasvolumen-Vergrößerung auf Hindernisse (Gehäusewände) ausgeübt wird.

Typische Überdruckwerte sind:

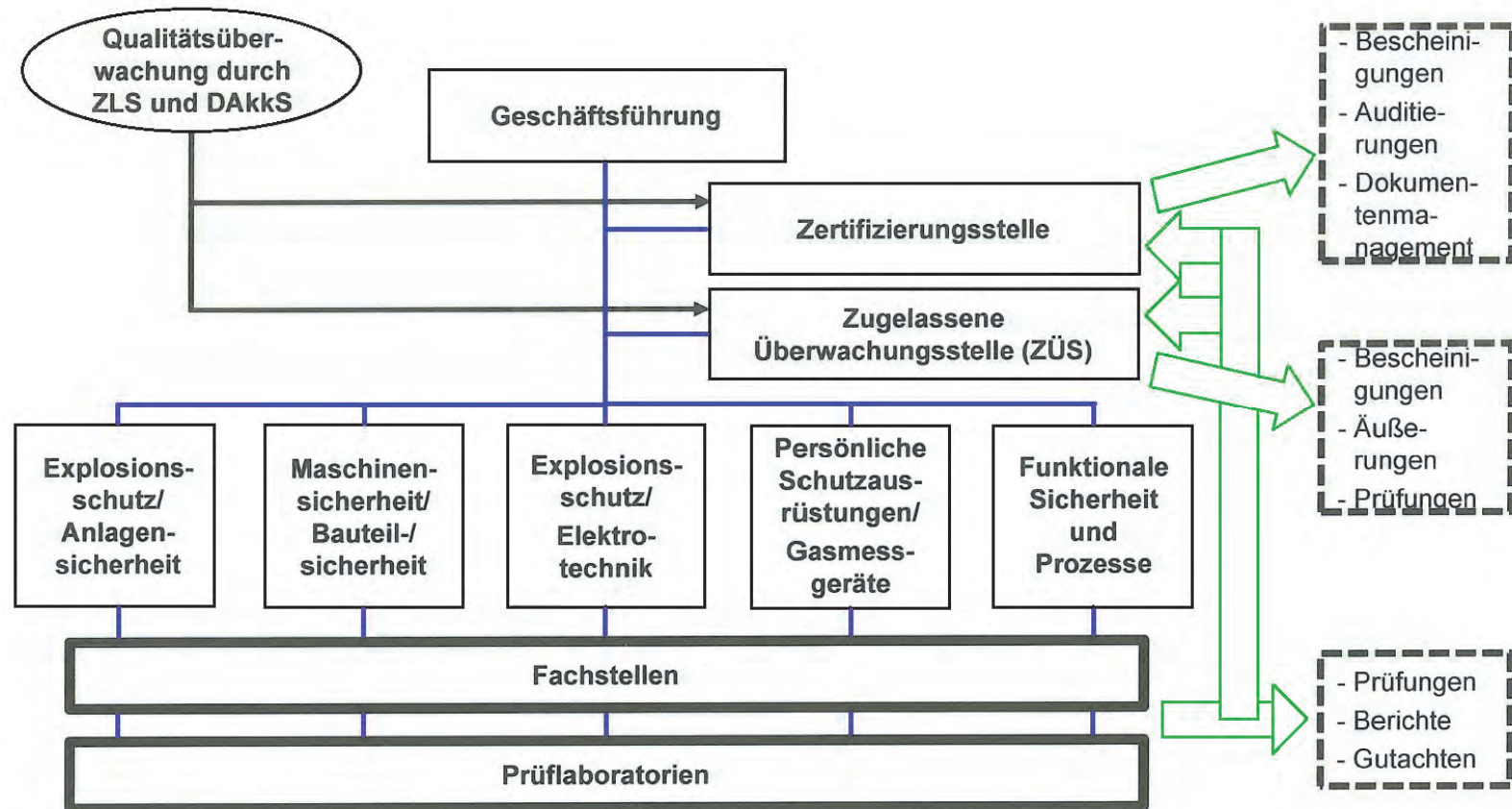
Wasserstoff	H ₂	7,3 bar
Methan	CH ₄	7,1 bar
Acetylen	C ₂ H ₂	10,1 bar

Zündtemperatur

Die Zündtemperatur gestattet die Einteilung brennbarer gasförmiger Stoffe entsprechend ihrer Neigung zur Entzündung an heißen Oberflächen in Temperaturklassen.

H ₂	Zündtemperatur T _{zünd} (in °C)		> 85	> 100	> 135	> 200	> 300	> 450
	Temperaturklasse		T6	T5	T4	T3	T2	T1

Wasserstoff-Sicherheit hat lange Tradition und ist gut durchorganisiert



ZLS: Zentralstelle der Länder für Sicherheitstechnik

DAkkS: Deutsche Akkreditierungsstelle

Nicht zuletzt gibt es für Konzeption, Bau, Überwachung und Betrieb solide Ausbildung von befähigten Personen



Teilnahmebestätigung

NN

hat an der Veranstaltung der WEKA-Akademie

Grundlagen und Maßnahmen des betrieblichen Explosionsschutzes

vom 01.03.2016 bis 02.03.2016 mit Erfolg teilgenommen.

Im Seminar wurden folgende Themen erarbeitet:

- Rechtliche Rahmenbedingungen im Explosionsschutz
- Beurteilen von Explosionsgefährdungen
- Sicherheitstechnische Kenngrößen für den Explosionsschutz
- Explosionsfähige Atmosphäre – Maßnahmen zur Vermeidung von g. e. A.
- Verwenden von Geräten in explosionsgefährdeten Bereichen
- Elektrische und mechanische Zündgefahren – Maßnahmen zur Zündquellenvermeidung
- Explosionsfeste Apparaten und Schutzsysteme – Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes

Ulm, den 02.03.2016


Dr.-Ing. **NN**
Referent



Teilnahmebestätigung

NN

hat an der Veranstaltung der WEKA-Akademie

„Zur Prüfung befähigte Personen (bP) Druckgeräte (BetrSichV)“

vom 14.03.2016 bis 15.03.2016 mit Erfolg teilgenommen.

Im Seminar wurden folgende Themen erarbeitet:

- Inverkehrbringen von Druckgeräten (EU)
- Betreiben von Druckgeräten (BRD)
- Herstellen von Druckgeräten (EU):
- Entwurf und Berechnungen
- Prüfungen an Druckgeräten (Betreiben)
- Bedienungsanleitung, Bedienungsanweisung, Gefahrenanalyse und Gefährdungsbeurteilung mit sicherheitstechnischer Bewertung
- Einführung in die BetrSichV
- Technisches Regelwerk (TRBS)

Ulm, den 15.03.2016

Die Unterweisung erfolgte durch
Herrn Dipl.- Ing. **NN** - Referent

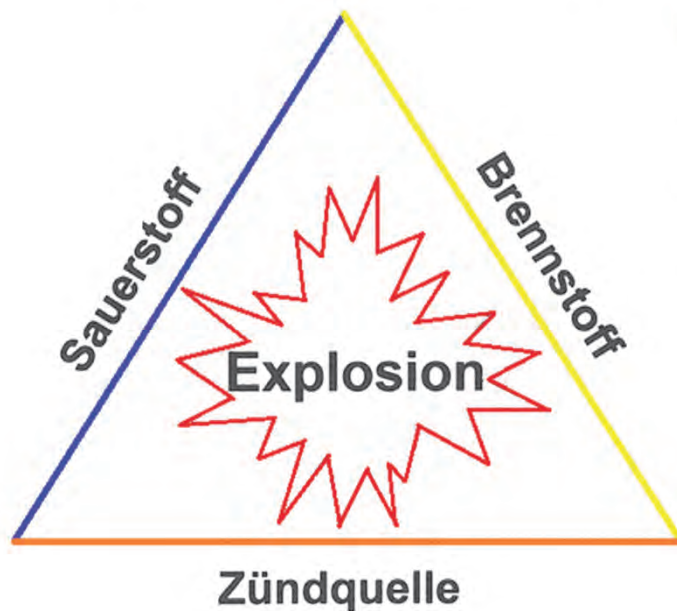

NN
WEKA MEDIA GmbH & Co. KG

Explosionsgefahr durch explosionsfähige Stoffe



Eine Explosion ist eine plötzliche Oxidations- oder Zerfallsreaktion mit Anstieg der Temperatur, des Druckes oder beides gleichzeitig.

Das Explosionsdreieck



Brennstoff

- Brennbare Gase, z.B. **Wasserstoff**
- Brennbare Flüssigkeiten
- Stäube brennbarer Stoffe

Es müssen alle drei Voraussetzungen, Vorhandensein von Brennstoff, Sauerstoff und Zündquelle, gegeben sein, damit es zur Explosion kommen kann.

Maßnahmen des Explosionsschutzes



System-Sicherheit Wasserstoff-Herstellung

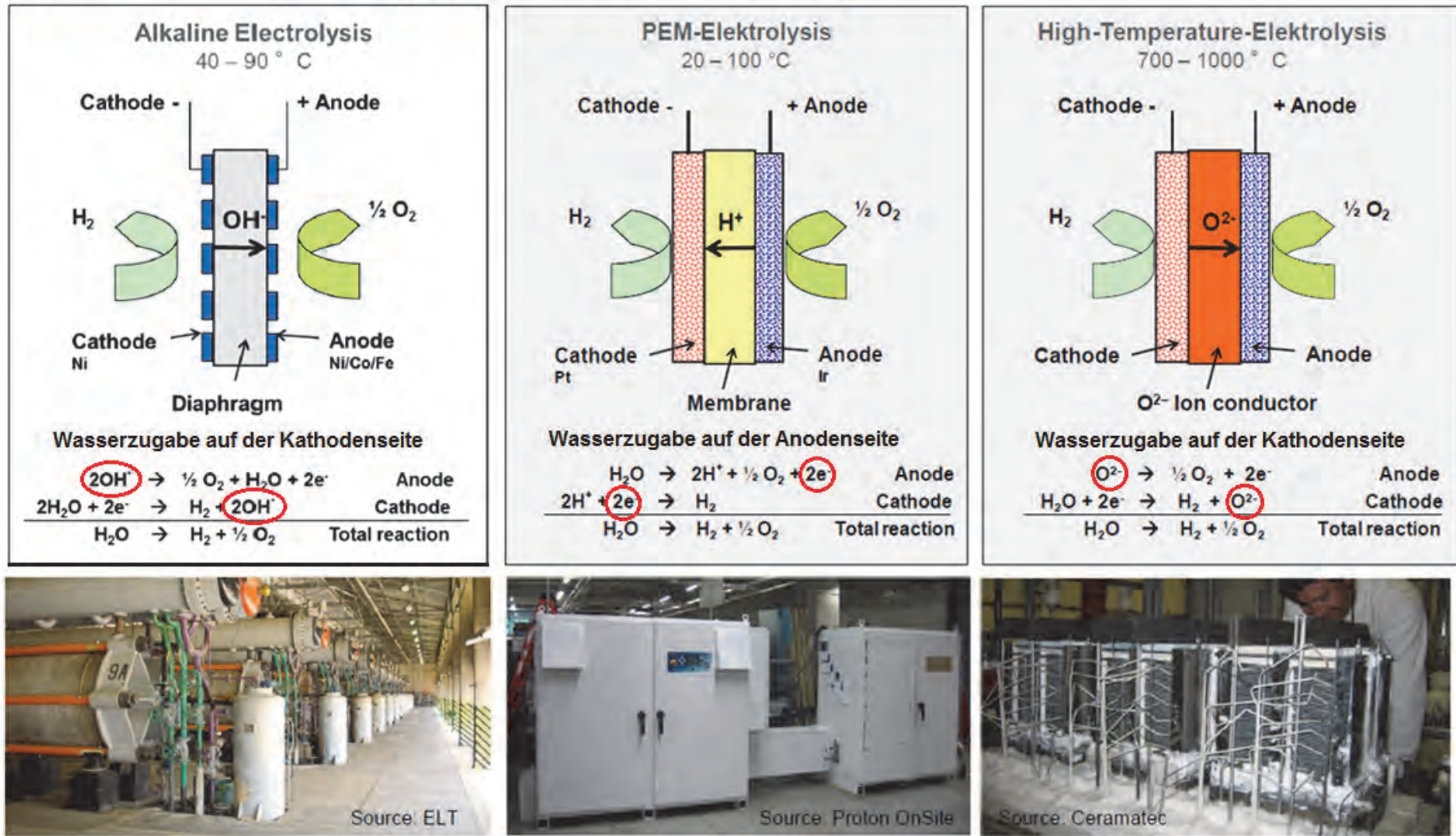
Wasserstoff-Sicherheit

für Hardware, Software und Betrieb der H₂-Herstellung
ist kein Hexenwerk da

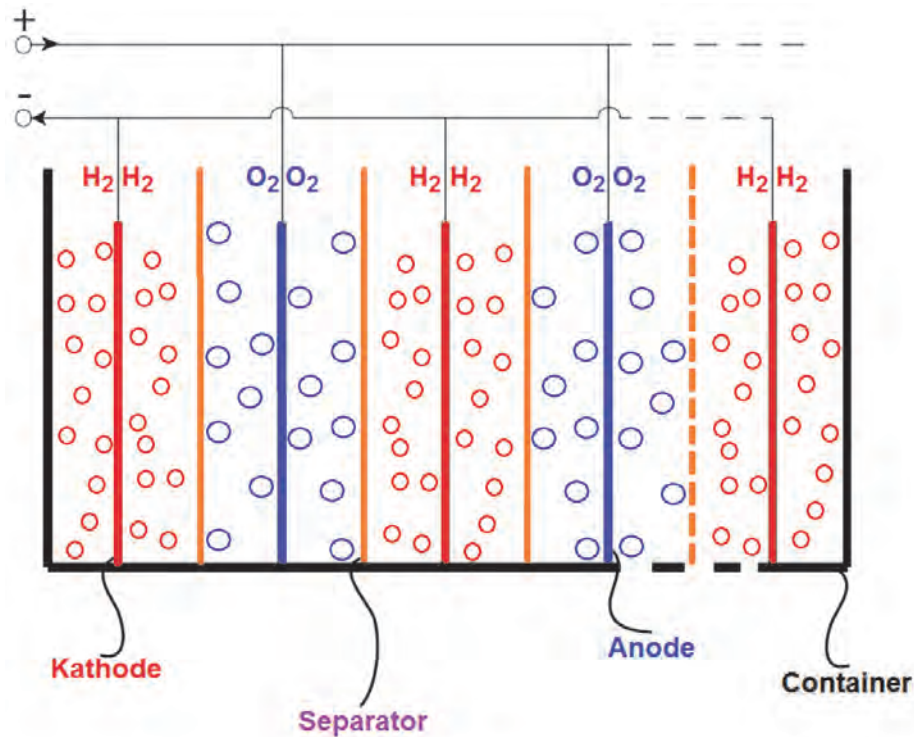
- gut bekannt,
- jahrzehntelang erprobt,
- kontinuierlich weiterentwickelt,
- gut aufeinander abgestimmt und
- jederzeit technisch verfügbar.

Konventionelle Prinzipien der Wasserelektrolyse

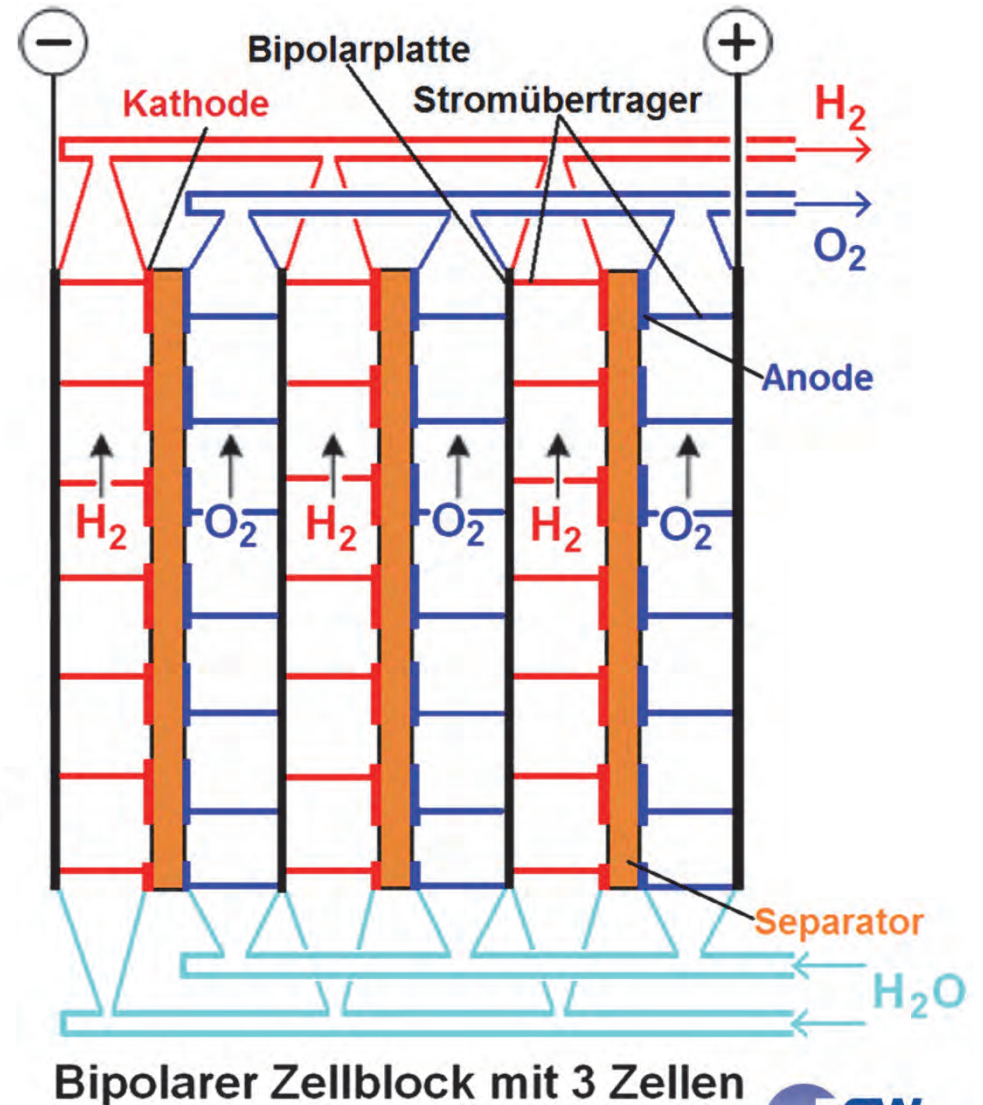
Functional principle of water electrolysis



Funktionsprinzipien von Elektrolyseblöcken, unipolar, bipolar



**Unipolarer Zellblock mit 3 Zellen,
in der Wasserelektrolyse
wenig verwendet**

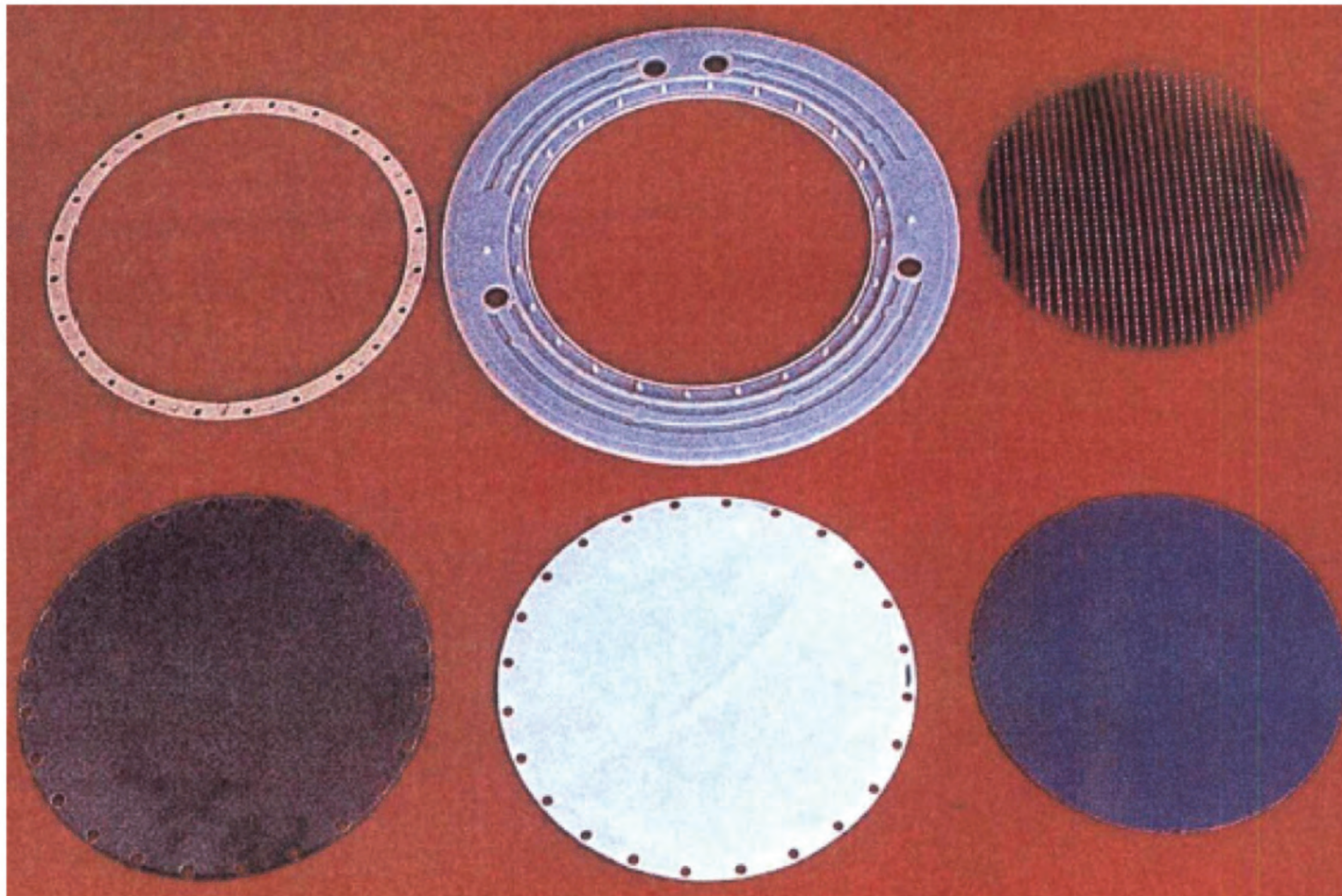


Bauelement einer alkalischen Druckelektrolysezelle

Befestigungs-Druckring

Elektrolyse-Zellrahmen

Stromübertrager

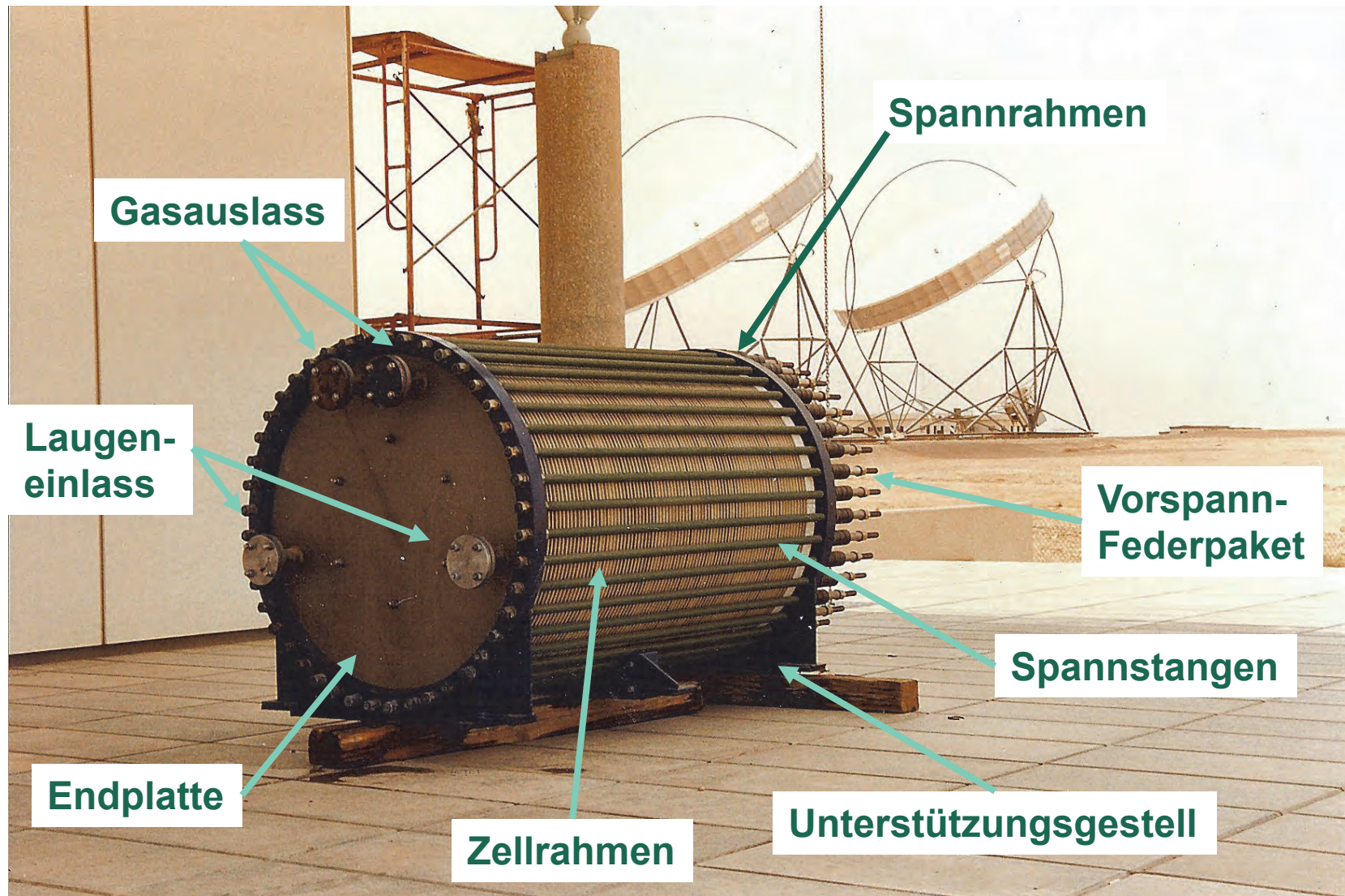


Bipolarplatte

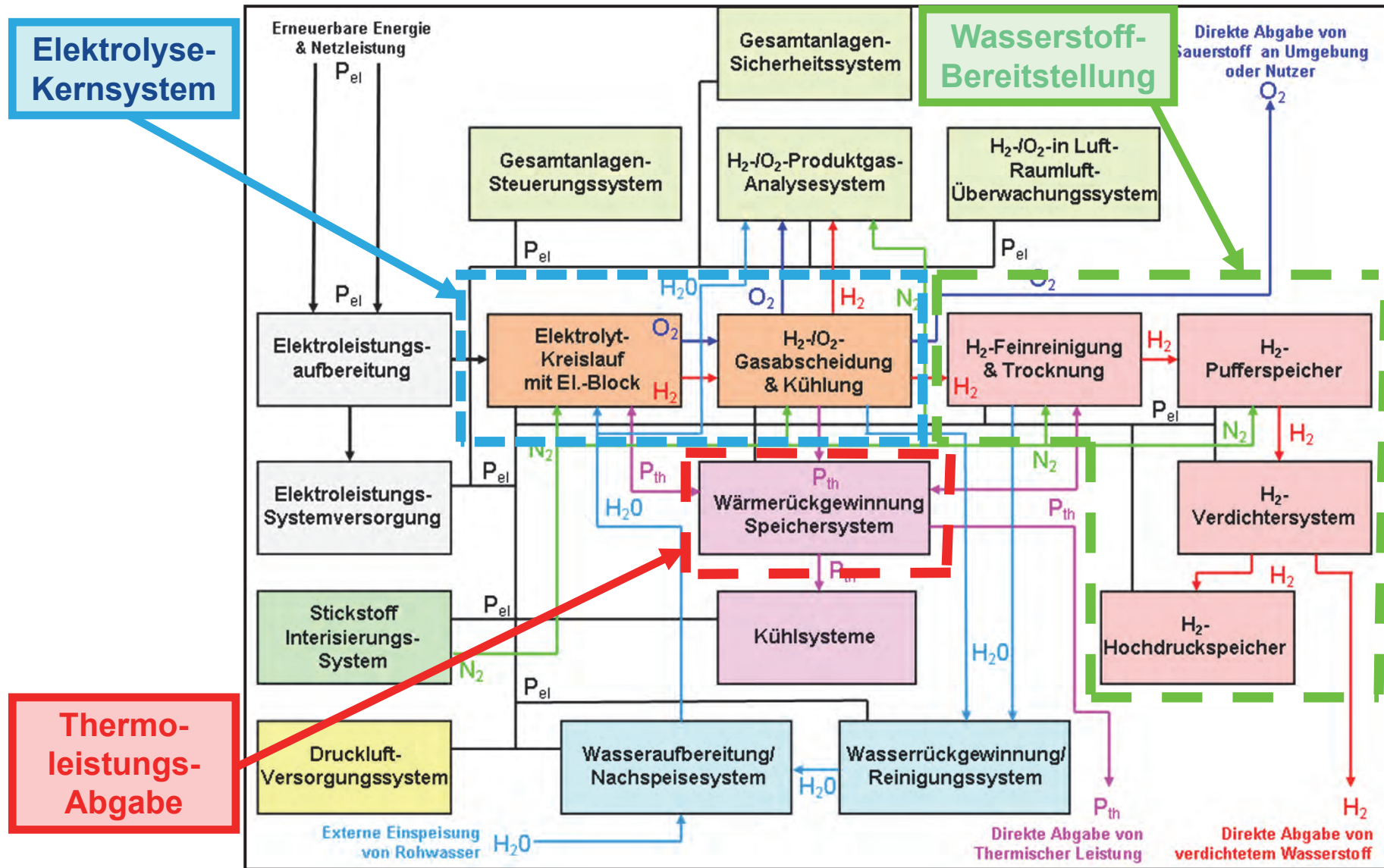
Zellmembran

Elektrode

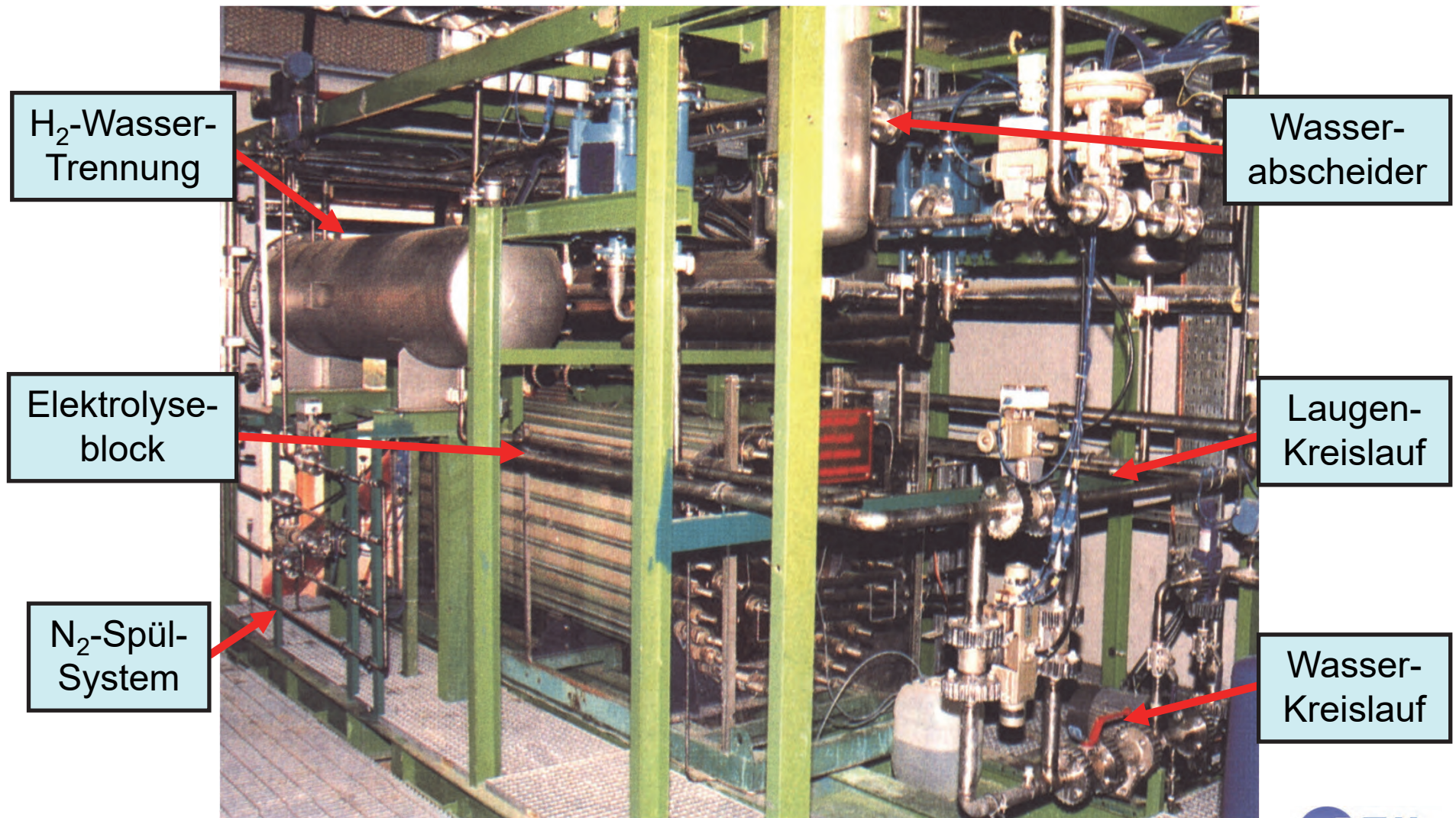
5000 cm²/ 0,5 MW alkalischer Druckelektrolyseblock, Projekt HYSOLAR, Riyadh, Saudi Arabien



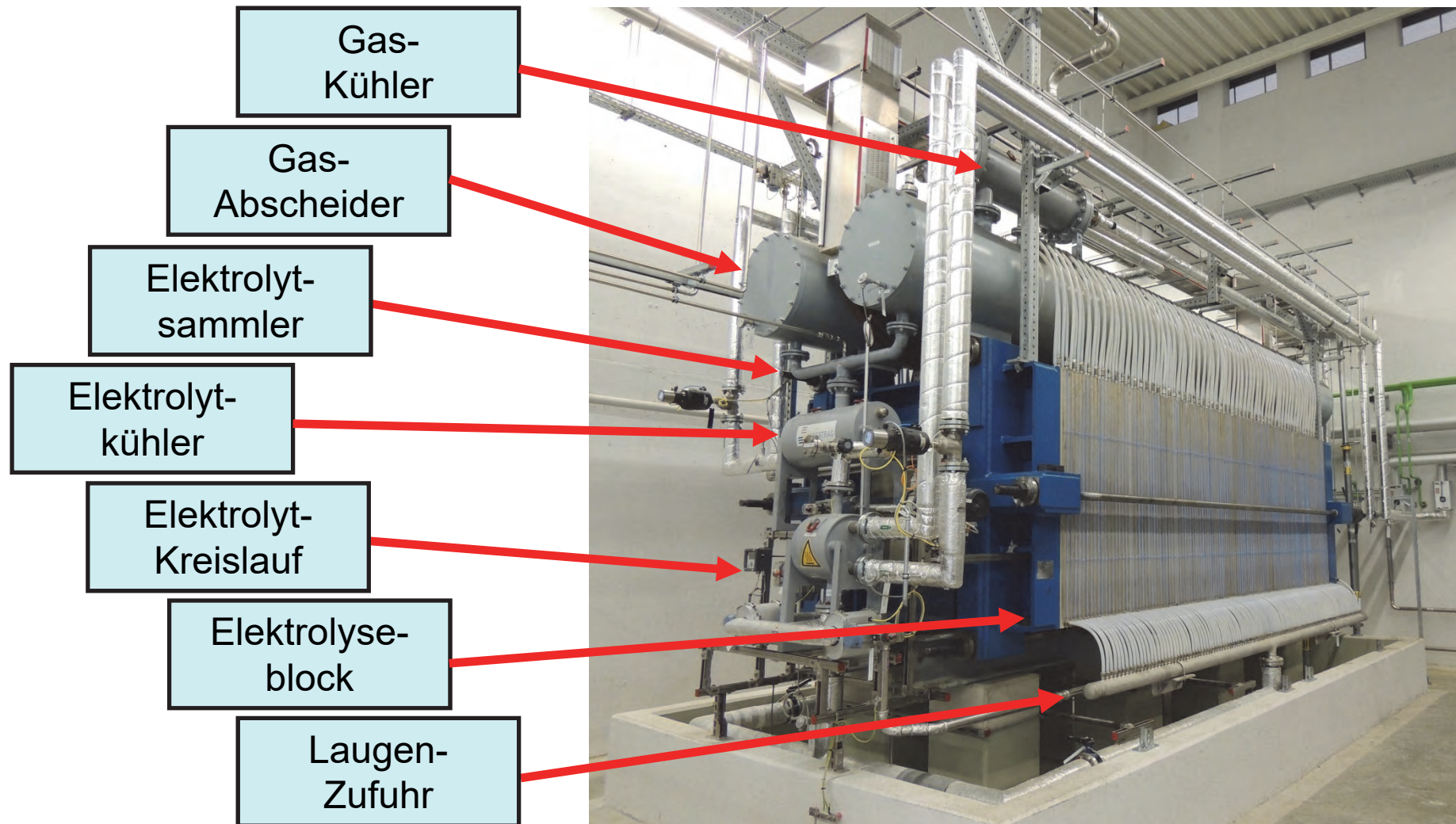
H₂-Versorgungsanlage mit Elektrolyse



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

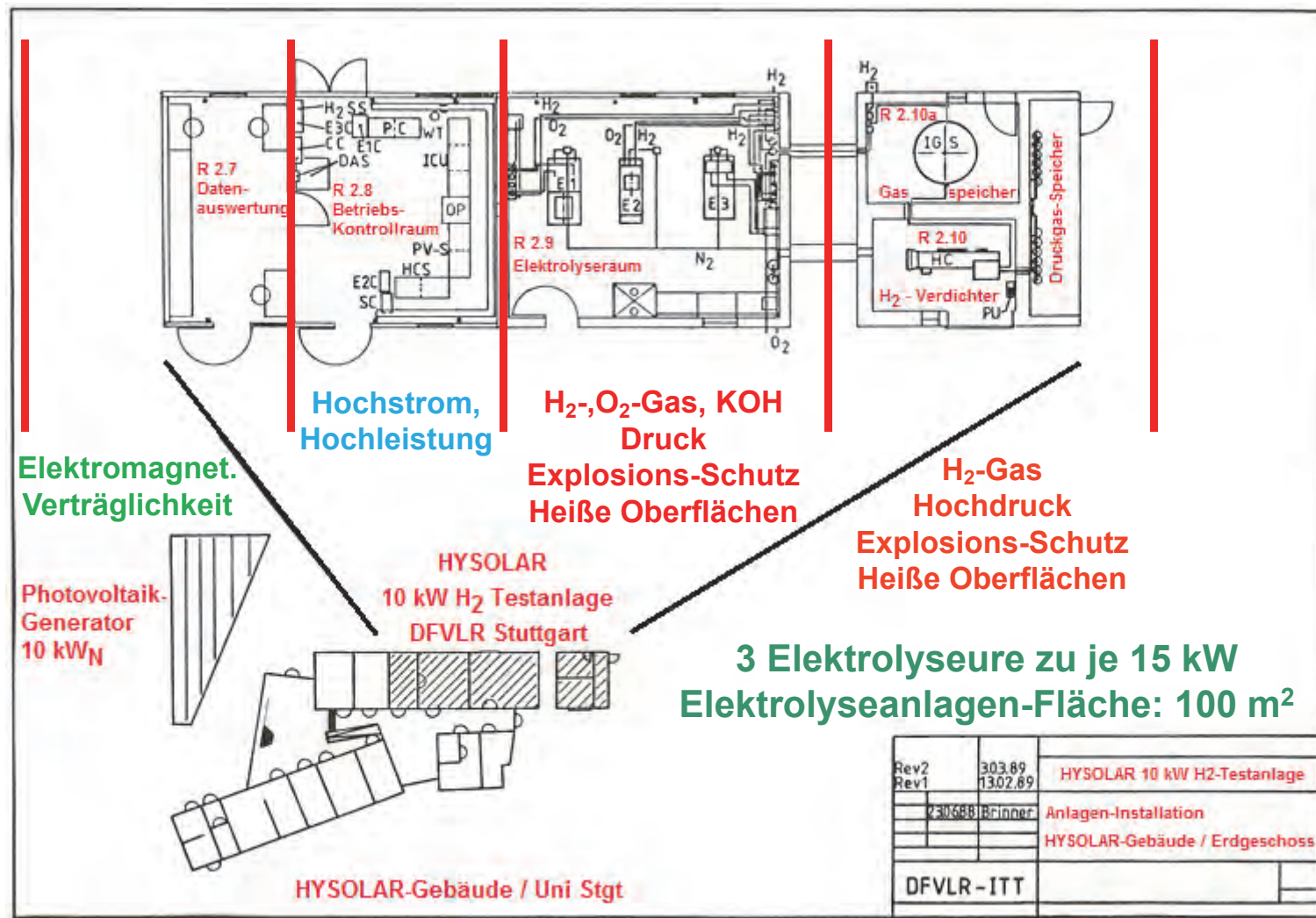


Fortschrittlicher atmosphärischer, alkalischer Elektrolyseur mit 2400 kW elektrische Leistung



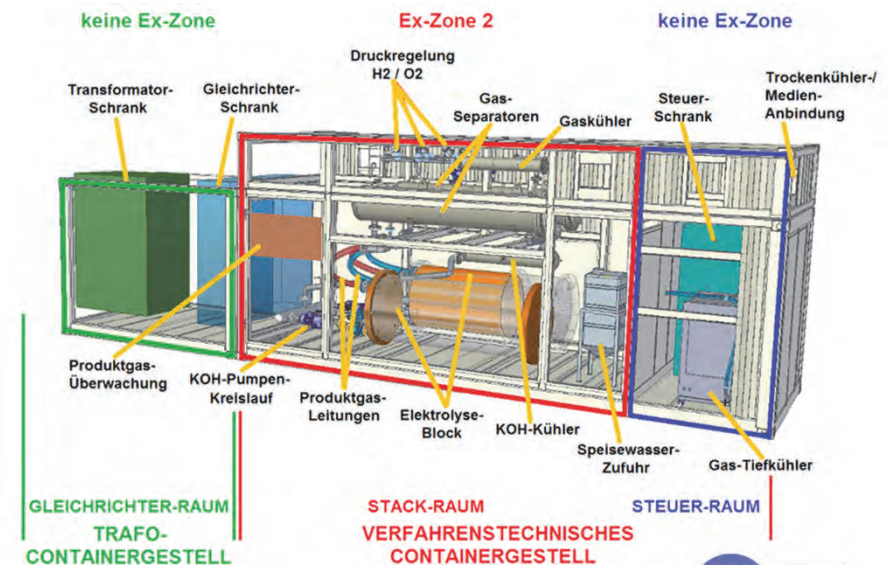
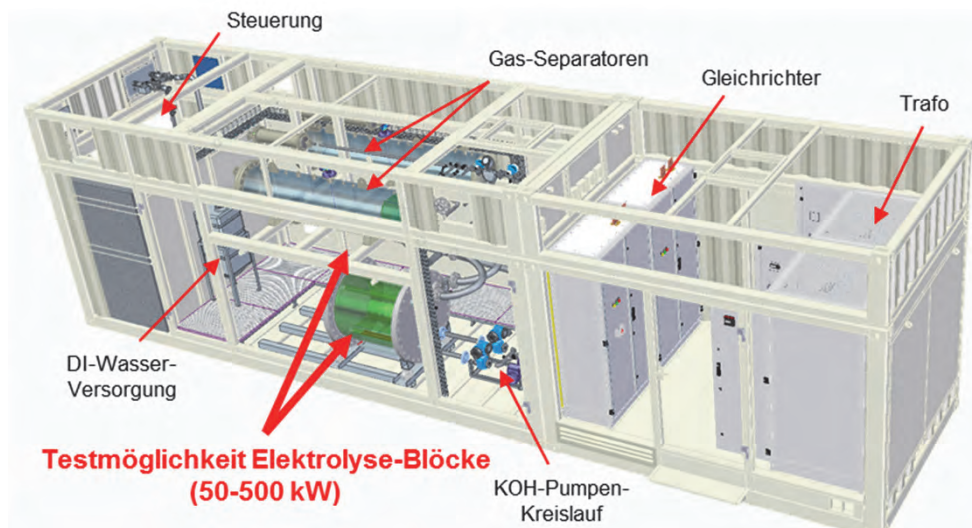
HYSOLAR 10 kW PV-Elektrolyse-Versuchsanlage von 1985

Anforderungen an die Betriebsräume

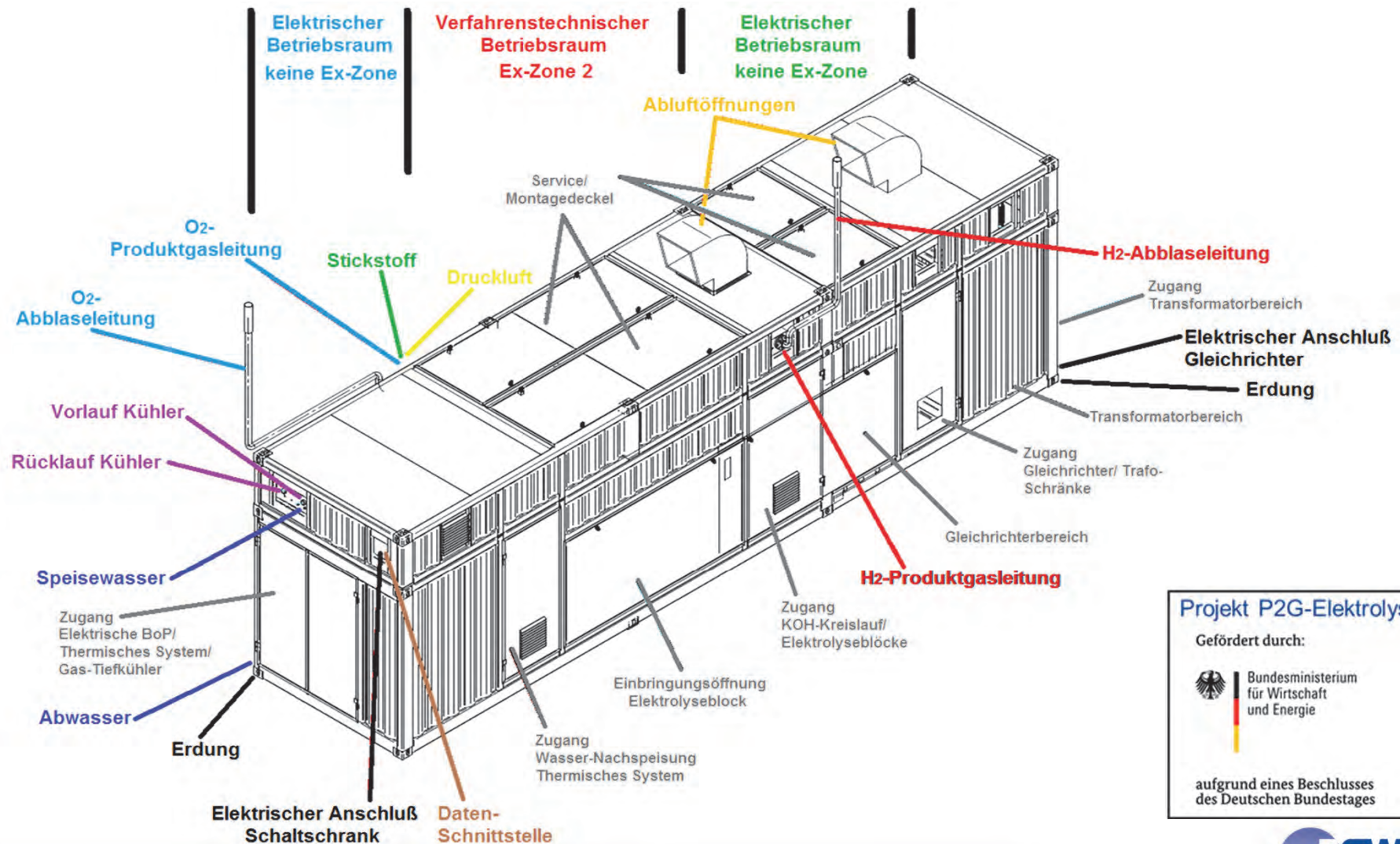


Elektrolyse am Wasserkraftwerk der Energiedienst in Grenzach-Wyhlen

Leuchtturmprojekt
"Power-to-Gas"



Anschluss- & Zugangskonzept einer modernen alkalischen 1MW Druckelektrolyseanlage



Bewährtes Vorgehen im Anlagen-Entwicklungsprozess

Gutachterliche Begleitung der Systementwicklung

- Systematische Gefahrenanalyse
- Systematische MSR-Einrichtungsanalyse
- SIL-Kreis-Berechnung
- Beurteilung Raumluf- & Produktgas-Überwachung
- Beurteilung Sicherheitsabschaltungs-Konzept
- Fachgutachten Ex-/ Flüssigkeits-Schutz.
- Fachgutachten Einbau, Dichtigkeit, Lebensdauer?
- Abnahme nach BetrSichV

Systemkonzept

Systemkonzept

technische Unterlagen

Systemkonzept / technische Unterlagen

Systemkonzept / technische Unterlagen

technische Unterlagen

technische Unterlagen

vor Inbetriebnahme (ZÜS)

Abkürzungen

NoBo: Notified Body

ZÜS: zugelassene
Überwachungsstelle

Begleitung des CE-Konformitätsverfahrens für die System-Zertifizierung

- Konformitätsprüfung Elektrolyse-Stack / Elektrolyseur
 - Konformitätsprüfung ATEX-Baugruppen
 - Konformitätsprüfung nach Maschinen-Richtlinie
 - Konformitätsprüfung nach Niederspannungs-Richtlinie
 - Fachgutachten Verfahren & Bewertung der Zertifizierung
- technische Unterlagen (muss NoBo)
technische Unterlagen (muss NoBo)
technische Unterlagen (soll NoBo)
technische Unterlagen (kann NoBo)
Durchführungs-Unterlagen (kann NoBo)

Unterlagen-Hinterlegung nach 2014/34/EU (10y)

- Pflicht zur Hinterlegung der Konformitätsunterlagen bei NoBo

Beispiel eines Elektrolyse-Sicherheitskonzepts

- **Systemdruck**
< 500 mbar (drucklos)
- **Raumlufüberwachung**
Elektrolyseräume: H₂-in-Luft-Sensor, Stack-Raum O₂-in-Luft-Sensor + Belüftung & Abschaltung
- **Raumtemperaturüberwachung der Betriebsbereiche**
Lufttemperatur-Überwachung Elektrolyse-/ Elektroanlagen-Raum + Belüftung & Abschaltung
- **Flüssigkeitsüberwachung**
WHG-Wanne in Stack- und Verfahrens-Raum mit Flüssigkeitssensoren & Abschaltung
- **Stickstoff-Versorgung**
Inertisierungs-Prozedur mit externem Stickstoff-Anschluss
- **Flüssigkeitskreislaufüberwachung**
Überwachung Flüssigkeitsumlauf mit Durchflusssensoren & Abschaltung
- **Elektrolytniveauüberwachung der Separatoren/ Abscheider**
Überwachung der Flüssigkeitsstände in den Behältern & Abschaltung
- **Temperaturüberwachung von Flüssigkeiten und Gasen**
Überwachung der Temperatur in allen relevanten Elektrolyse-Kreisläufen & Abschaltung
- **Gasqualitätsüberwachung**
Überwachung der Gasqualität der Produktgase H₂/ O₂ & Abschaltung

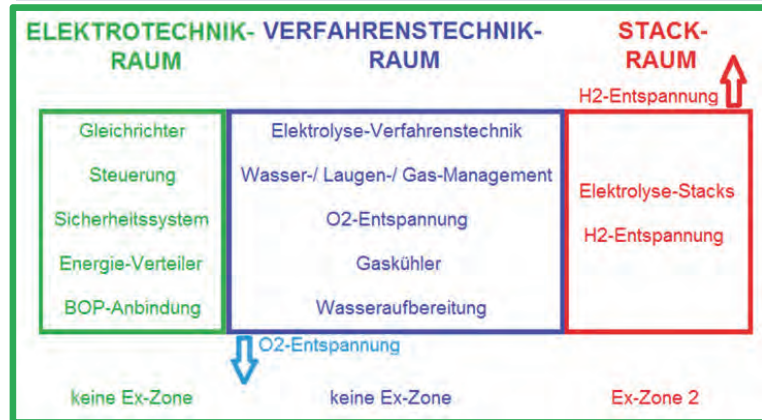
Beispielhafte Ergebnisse einer Systematischen MSR-Bewertung

Liste der sicherheitsrelevanten MSR-Einrichtungen eines Containersystems

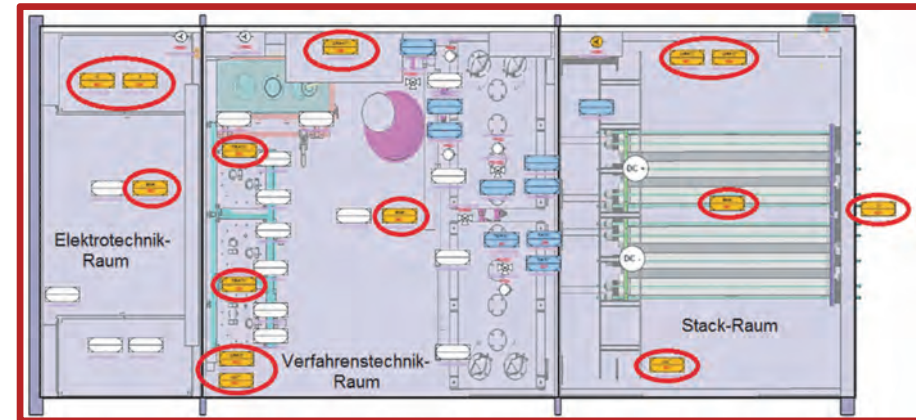
H2-in-Luft-Konzentration, Raumluf-Ü, QIRA+Z+ 901		SIL-Level: 2
Einbauort	Stackraum	
Funktion:	Anlagen-Abschaltung bei H2-Konz.> 40 % UEG	
O2-in-Luft-Konzentration, Raumluf-Ü, QIRA+Z+ 904		SIL-Level: 1
Einbauort	Stackraum	
Funktion:	Anlagen-Abschaltung bei O2-Konz.> 23% Vol.-% im Raum	
H2-in-Luft-Konzentration, Raumluf-Ü, QIRA+Z+ 902		SIL-Level: 2
Einbauort	Verfahrenstechnikraum	
Funktion:	Anlagen-Abschaltung bei H2-Konz.> 40 % UEG	
Sauerstoff-Temperatur Ausgang Stack 1 TIA+S++ 203		SIL-Level: 1
Einbauort	Sauerstoffleitung RL 209	
Funktion:	Anlagen-Abschaltung bei zu hoher Gastemperatur	
Sauerstoff-Temperatur Ausgang Stack 2 TIA+S++ 206		SIL-Level: 1
Einbauort	Sauerstoffleitung RL 210	
Funktion:	Anlagen-Abschaltung bei zu hoher Gastemperatur	
H2-in-O2-Analyse, Sauerstoff-Reinheit QIRA+Z++ 505		SIL-Level: 1
Einbauort	Abgang Sauerstoffleitung RL 504	
Funktion:	Anlagen-Abschaltung bei zu hoher H2-Konz. im O2	
O2-in-H2-Analyse, Wasserstoff-Reinheit QIRA+Z++ 503		SIL-Level: 2
Einbauort	Abgang Wasserstoffleitung RL 503	
Funktion:	Anlagen-Abschaltung bei zu hoher O2-Konz. in H2	

7 Sensoren wurden als sicherheitstechnisch relevant eingestuft

Technische Umsetzung des Konzepts in eine funktionsfähige Anlage

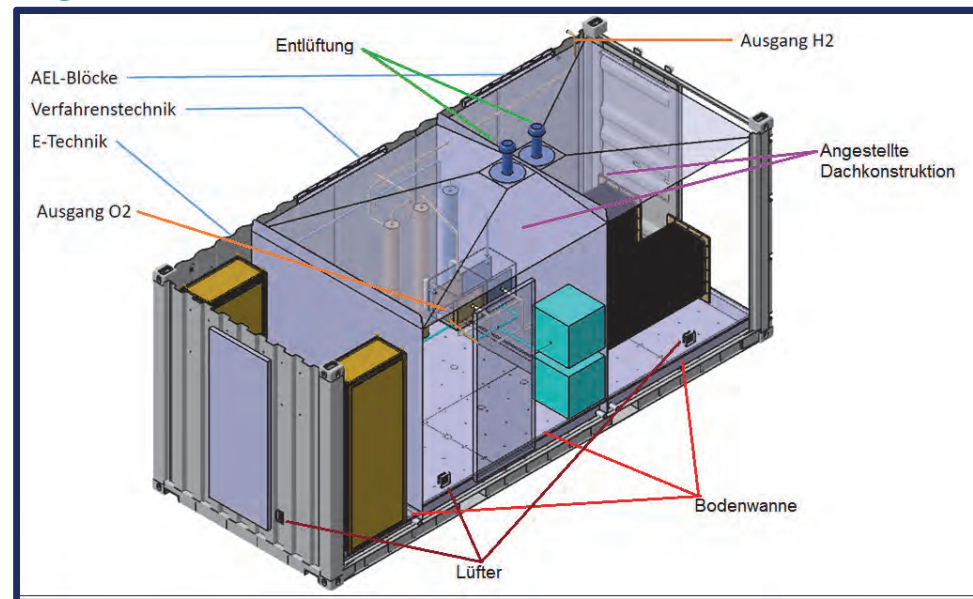


Raum- / Funktionsaufteilung



Sicherheitsausstattung

3D-Ansicht des Containeraufbaus



System-Sicherheit Wasserstoff-Nutzung

Wasserstoff-Sicherheit im Fahrzeug-Bereich

für Hardware, Software und Betrieb wie im industriellen Bereich ist altbekannt,

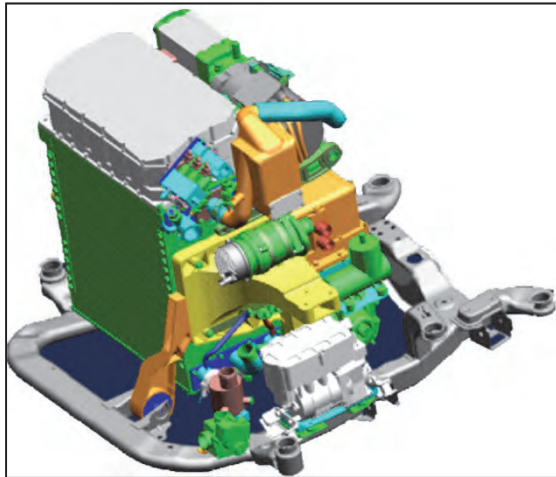
- aber nach Fahrzeugnormen mit Zulassung nach StVZO mit Allgemeiner Betriebserlaubnis (ABE) geregelt.
- Normenwerk ist durchgängig vorhanden.

Wasserstoff-Sicherheit als Kraftstoff

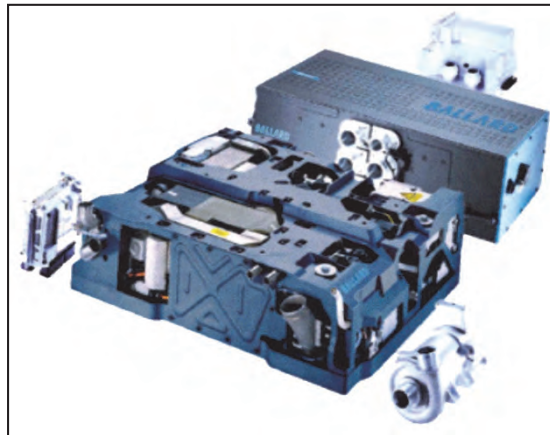
gut, eindeutig und weltweit geregelt nach den Normen

- SAE J2719 „Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicles“
- DIN EN 17124 „Wasserstoff als Kraftstoff“
- ISO 14687 Typ I Grad D „Wasserstoff für Brennstoffzellen in Fahrzeugen“

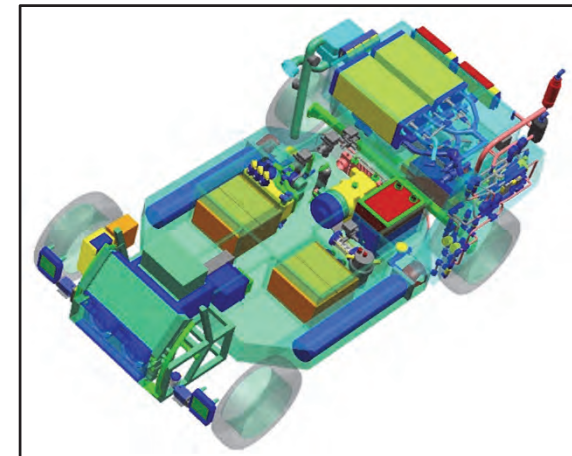
Brennstoffzellen-Systemstrukturen für Fahrzeuge



Kompaktsystem im Motorraum

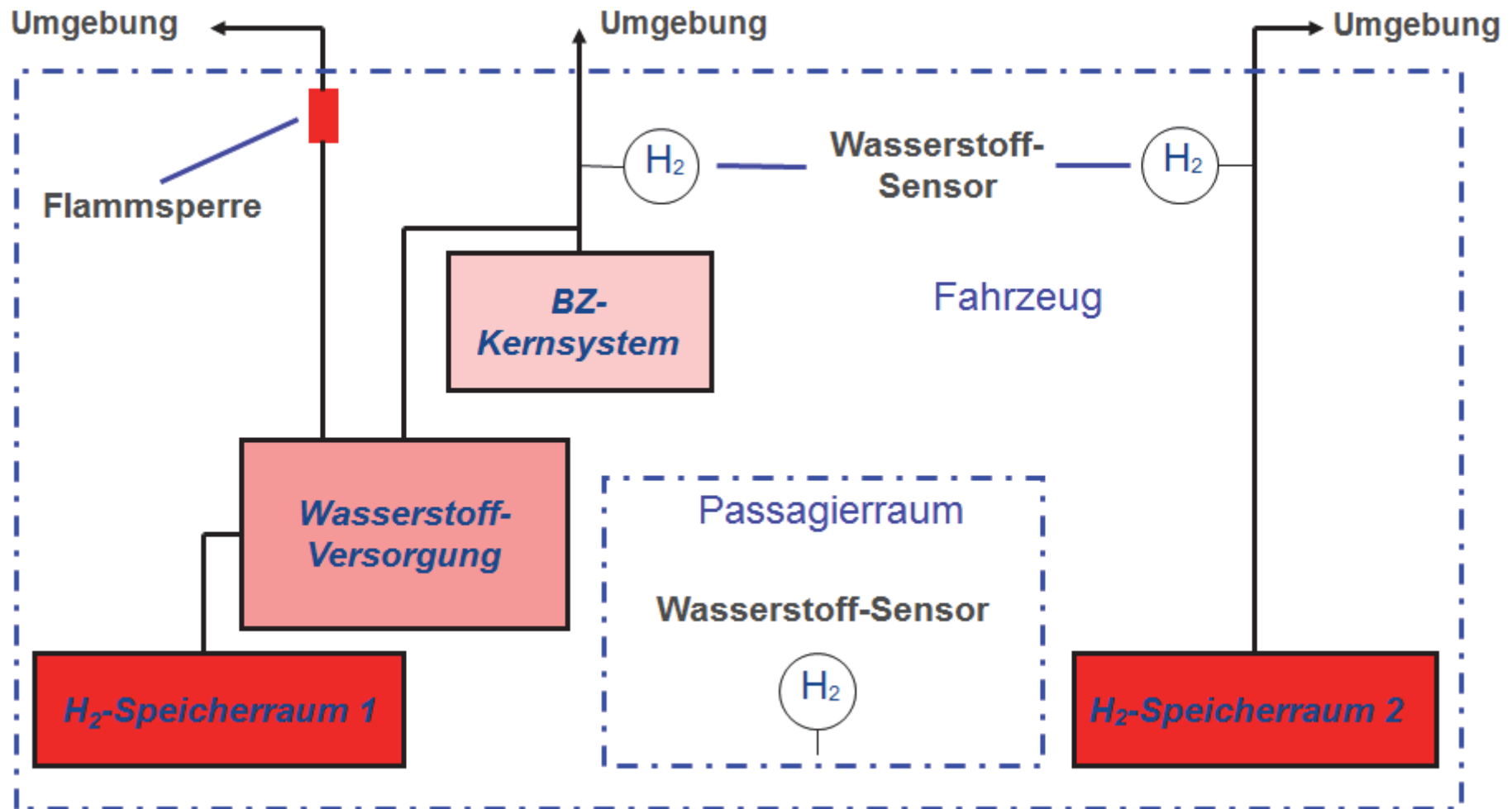


Subsystem-Struktur
Wagenbodenaufbau



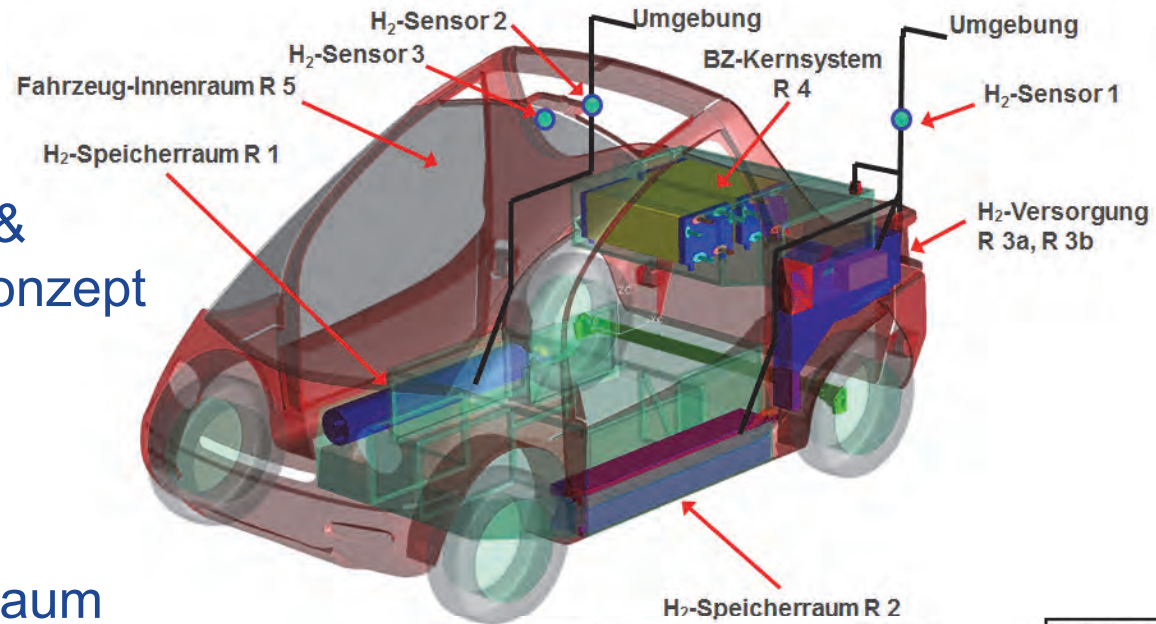
Einbauraum-angepasste
Subsystem-Struktur

Beispielhafte H₂-Sicherheitsstruktur eines Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug

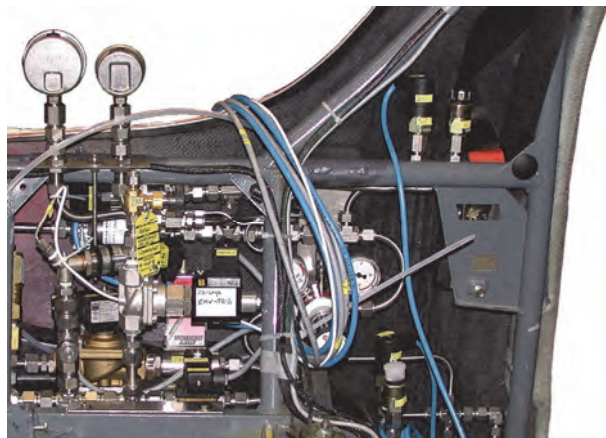


Technische Umsetzung der Wasserstoff-Sicherheit in einem Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug

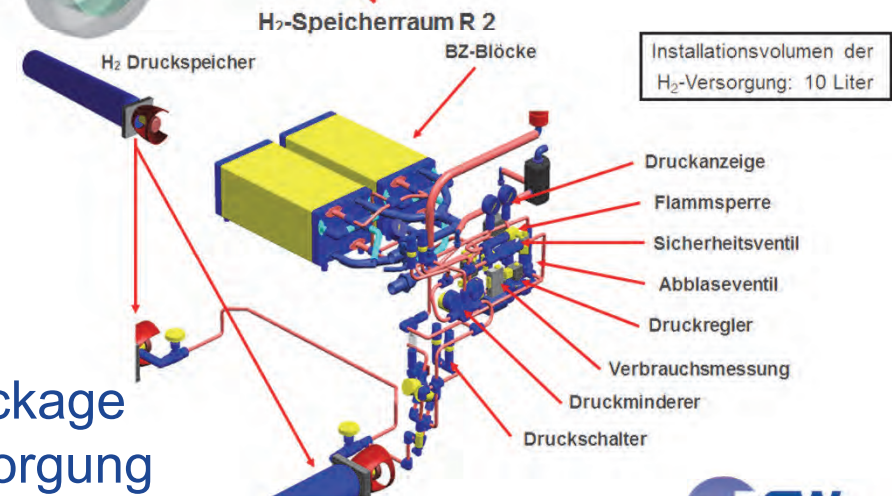
System-Package & Fahrzeug-Sicherheitskonzept



H₂-Versorgung, Linker hinterer Kotflügelraum



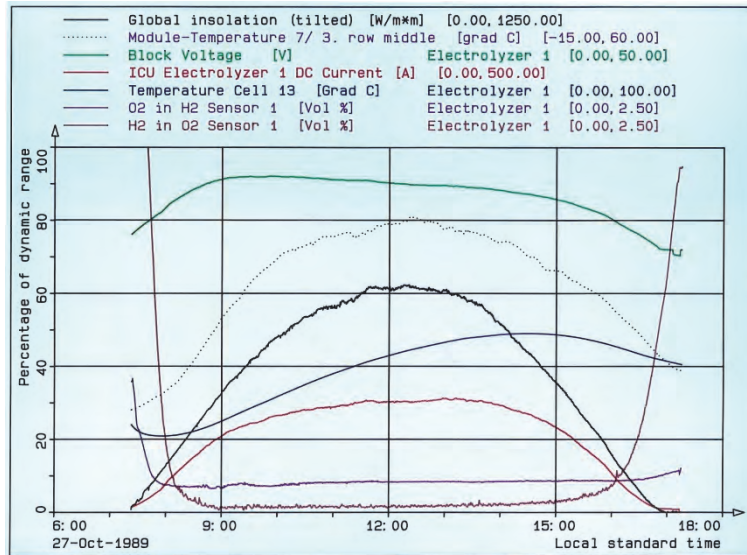
3D-Package H₂-Versorgung



Betrieb von Elektrolyseuren

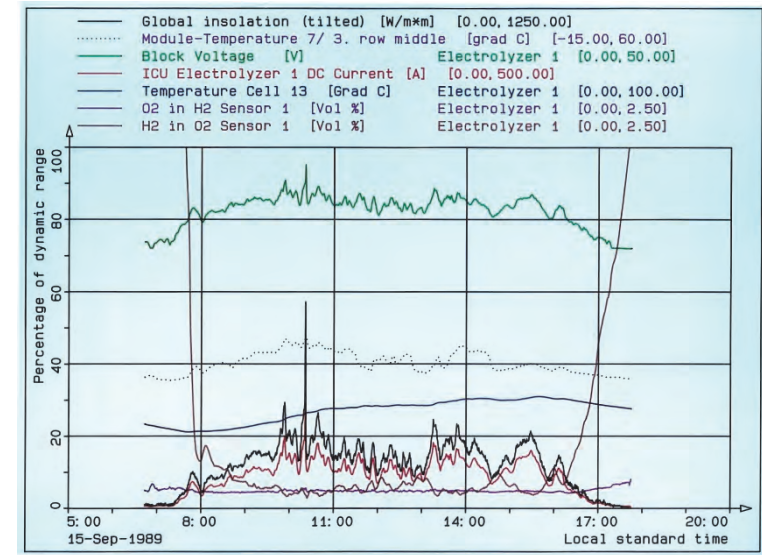
Dynamischer Betrieb von Elektrolyseuren, AEL, PEM,
ist kein prinzipielles Problem

Dynamischer, vorhersehbarer Photovoltaik-Elektrolysebetrieb



27.10.89

Optimaler Betrieb

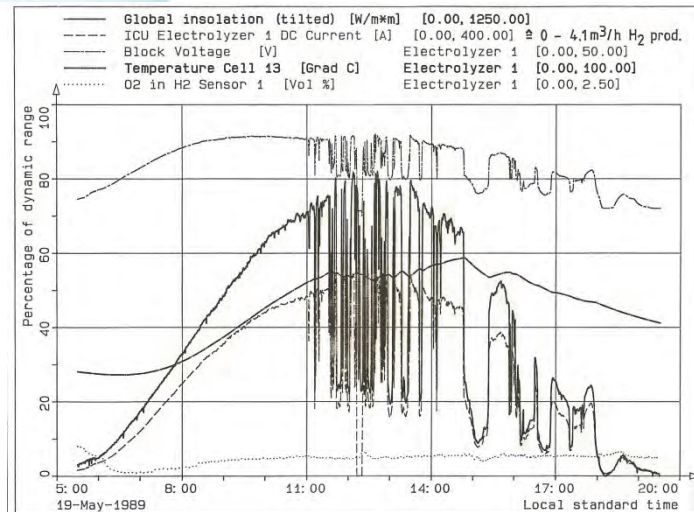


19.09.89

Minimalbetrieb

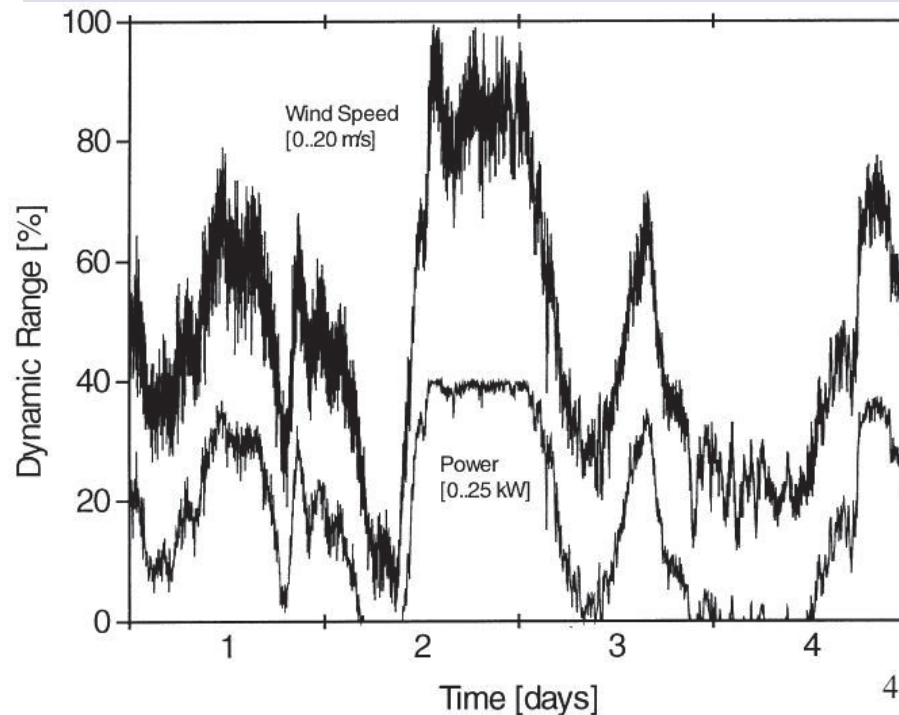
19.05.89

Dynamischer Betrieb



**Messungen im Rahmen
des
Deutsch – Saudi Arabischen
HYSOLAR-Projektes**

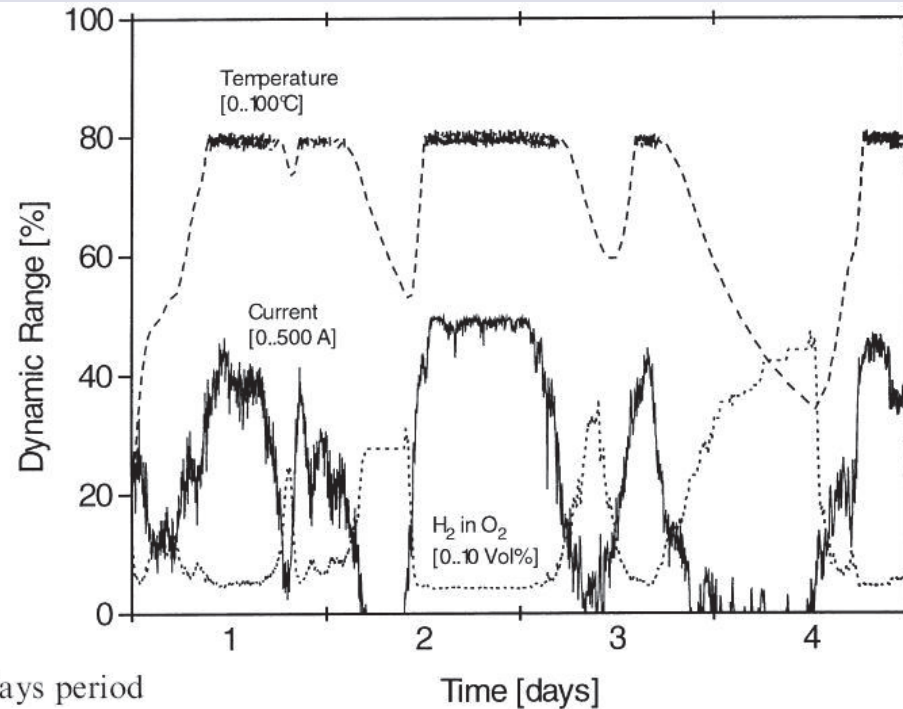
Dynamischer, nicht vorhersehbarer Wind-Elektrolysebetrieb



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

Noch Fragen?

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

Dipl.-Ing. Andreas Brinner

Dr. Marc-Simon Löffler

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

Tel: ++49 (0)711 7870-233, Email: marc-simon.loeffler@zsw-bw.de

