Update vom 26.09.2022 wegen Änderungen in der Qualitätsnorm für Brennstoffzellen-geeigneten Wasserstoff

Herzlich Willkommen zur 1. Themenworkshop-Reihe

„Elektrolyse made in Baden-Württemberg“

WORKSHOP 4: Gasbereitstellung

Update 26.09.2022

Stuttgart, 03.11.2020

Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND WOHNUNGSBAU

innBW INNOVATIONSALLIANZ BADEN-WÜRTTEMBERG

Hahn Schickard

DLR

DITF DEUTSCHE INSTITUTE FÜR TEXTIL+FASERFORSCHUNG

ZSW

Dipl.-Ing. Andreas Brinner

Gasbereitstellung

// Gasbereitstellung

- Grundsätzliches zum Wasserstoff
- Basis der Wasserstoff-Sicherheit
- Grundlagen des Explosionsschutzes
- Wasserstoffspeichermöglichkeiten
- Wasserstoffspeicherung im Vergleich zu anderen Energieträgern
- Wasserstoffbereitstellung in versch. Formen
- Wasserstoffqualitäten und Lieferarten für Endkunden
- Wasserstoffqualität/ Druck in diesem Projekt für potenzielle Tankstellenkunden
- Energiebedarf der Wasserstoff-Bereitstellung
- Szenarien der Wasserstoff-Bereitstellung für Tankstellen
- Prinzip/ Technik der Wasserstoff-Reinigung/ Verdichtung
- Die Wasserstoff-Tankstelle
- Prinzipien von Wasserstoff-Tankstellen
- Tankstellenkonzeptbeispiele für den wirtschaftlichen Betrieb

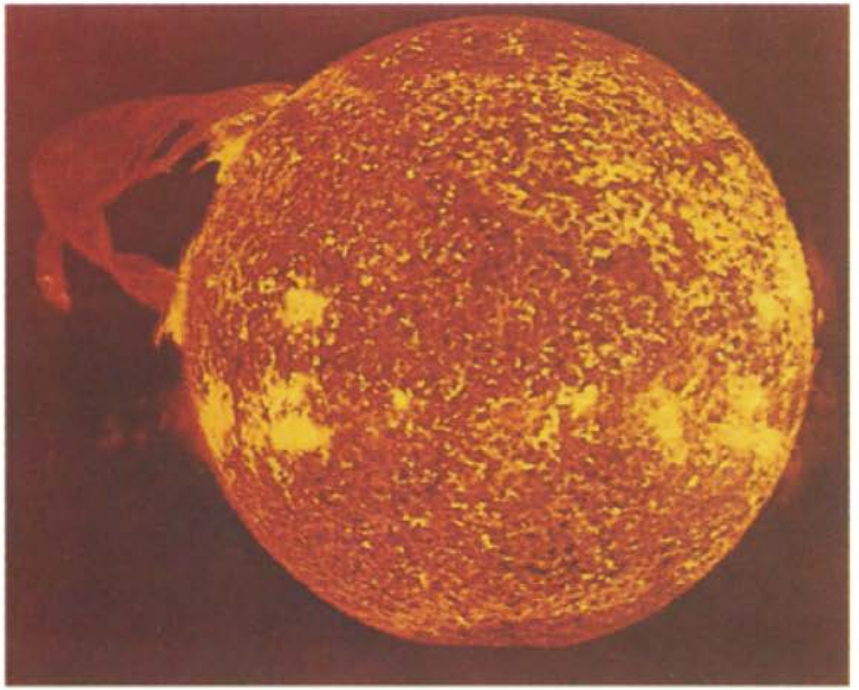
// Gasbereitstellung

- **Grundsätzliches zum Wasserstoff**
- Basis der Wasserstoff-Sicherheit
- Grundlagen des Explosionsschutzes
- Wasserstoffspeichermöglichkeiten
- Wasserstoffspeicherung im Vergleich zu anderen Energieträgern
- Wasserstoffbereitstellung in versch. Formen
- Wasserstoffqualitäten und Lieferarten für Endkunden
- Wasserstoffqualität/ Druck in diesem Projekt für potenzielle Tankstellenkunden
- Energiebedarf der Wasserstoff-Bereitstellung
- Szenarien der Wasserstoff-Bereitstellung für Tankstellen
- Prinzip/ Technik der Wasserstoff-Reinigung/ Verdichtung
- Die Wasserstoff-Tankstelle
- Prinzipien von Wasserstoff-Tankstellen
- Tankstellenkonzeptbeispiele für den wirtschaftlichen Betrieb

// Wasserstoff - Grundsätzliches

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*

ABER: Die Erde ist nicht so reich gesegnet.

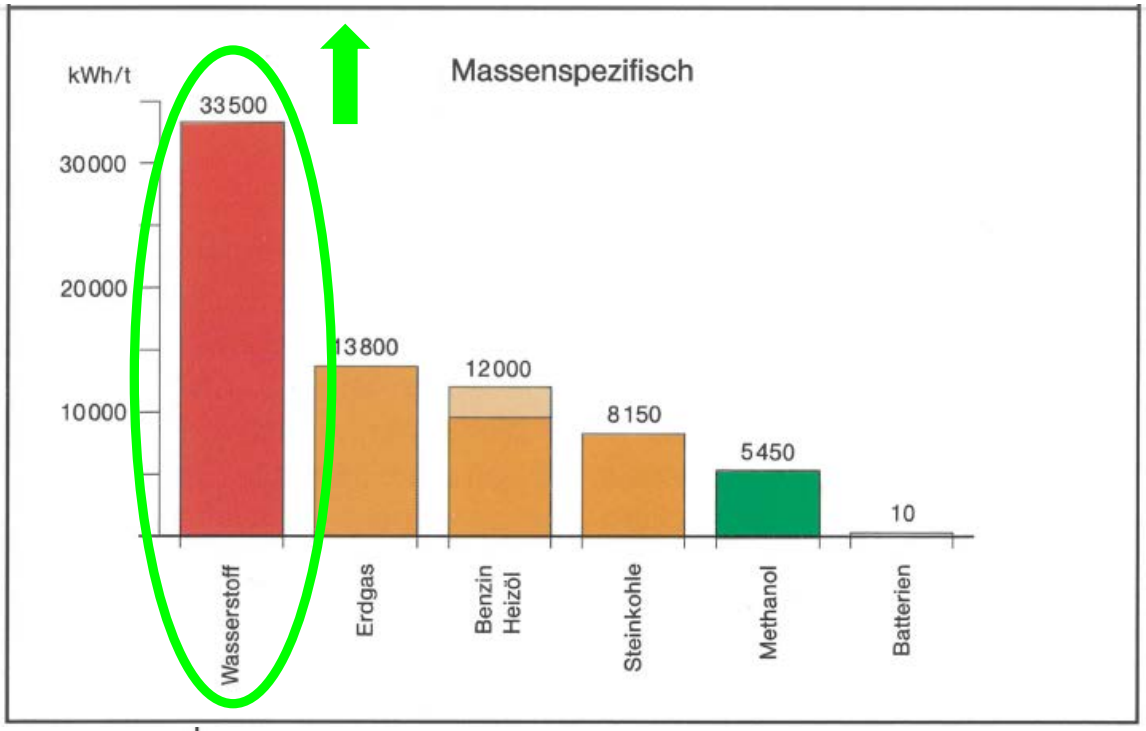
- Wasserstoff kommt natürlich in reiner Form nicht vor.
- Der Masseanteil auf der Erde beträgt nur 0,12 %.
- Der größte Anteil ist in knapp 1,4 Mrd. Kubik-km Wasser gespeichert.
- Die Gewinnung von Wasserstoff aus Wasser ist energieaufwändig.
- Der weltweite Süßwasseranteil beträgt nur 2,5 %.

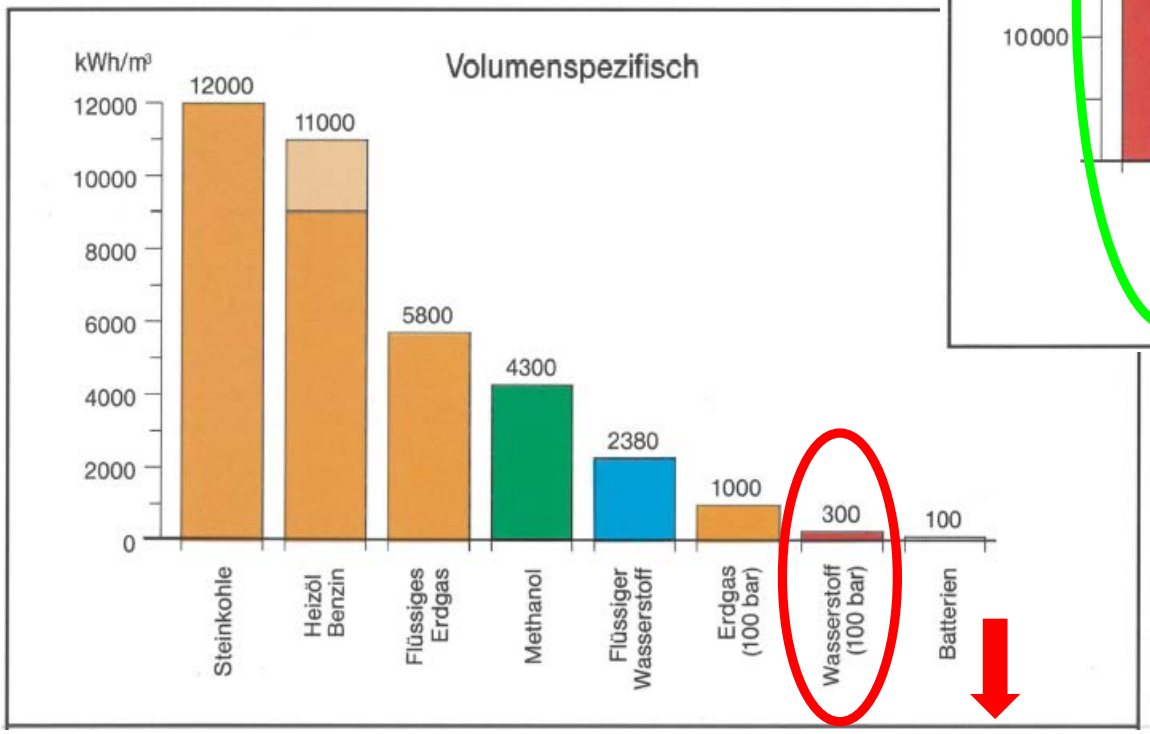
DAFÜR:

- Wasserstoff verbrennt rückstand- und schadstofffrei zu Wasser

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

// Warum Wasserstoff?
Wasserstoff im Vergleich zu anderen Energieträgern





Quelle: Solarer Wasserstoff – ein möglicher Energieträger der Zukunft, 5. Auflage, 1992, WiMi BaWü, DLR, ZSW

// Gasbereitstellung

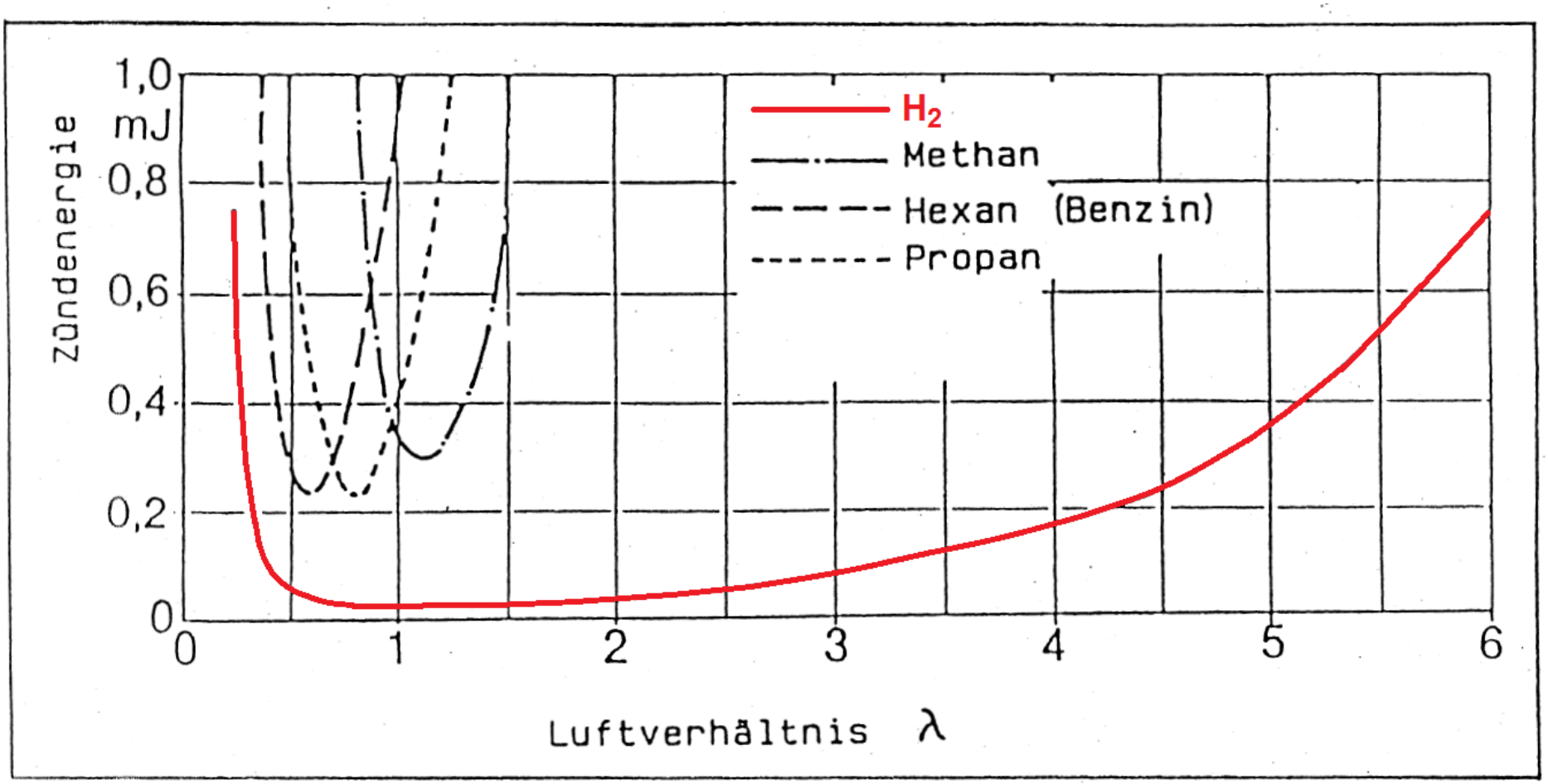
- Grundsätzliches zum Wasserstoff
- **Basis der Wasserstoff-Sicherheit**
- Grundlagen des Explosionsschutzes
- Wasserstoffspeichermöglichkeiten
- Wasserstoffspeicherung im Vergleich zu anderen Energieträgern
- Wasserstoffbereitstellung in versch. Formen
- Wasserstoffqualitäten und Lieferarten für Endkunden
- Wasserstoffqualität/ Druck in diesem Projekt für potenzielle Tankstellenkunden
- Energiebedarf der Wasserstoff-Bereitstellung
- Szenarien der Wasserstoff-Bereitstellung für Tankstellen
- Prinzip/ Technik der Wasserstoff-Reinigung/ Verdichtung
- Die Wasserstoff-Tankstelle
- Prinzipien von Wasserstoff-Tankstellen
- Tankstellenkonzeptbeispiele für den wirtschaftlichen Betrieb

// Sicherheitsspezifische Eigenschaften von Wasserstoff, Methan und Benzin im Vergleich

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

Nach Quelle: Solarer Wasserstoff – ein möglicher Energieträger der Zukunft, 5. Auflage, 1992, WiMi BaWü, DLR, ZSW

// Zündenergien verschiedener Brennstoff-Luft-Gemische



Zündenergien verschiedener Gemische in Abhängigkeit vom Luftverhältnis λ bei Atmosphärendruck und Umgebungstemperatur

Quelle: 2004, HDT-Essen, Lehrgang Wasserstoffspeicherung für bef. Personen

// Sicherheitstechnische Einordnung von Wasserstoff

Explosionsgruppe / Temperaturklasse von Wasserstoff

DEKRA

Explosionsgruppe / Temperaturklasse	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
Acethylen	C_2H_2	10,1 bar

Zündtemperatur

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

H2

Zündtemperatur $T_{zünd}$ (in °C)		> 85	> 100	> 135	> 200	> 300	> 450
Temperaturklasse		T6	T5	T4	T3	T2	T1

Nach Quelle: Dr. J Hübner, Dekra-Exam GmbH, Sicherheitstechnische Kenngrößen für den Explosionsschutz

// Gasbereitstellung

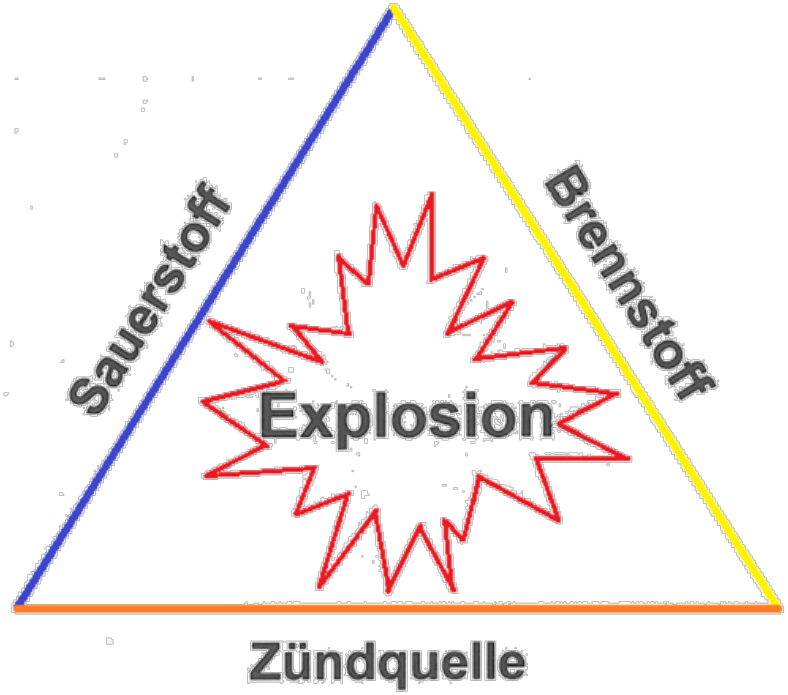
- Grundsätzliches zum Wasserstoff
- Basis der Wasserstoff-Sicherheit
- **Grundlagen des Explosionsschutzes**
- Wasserstoffspeichermöglichkeiten
- Wasserstoffspeicherung im Vergleich zu anderen Energieträgern
- Wasserstoffbereitstellung in versch. Formen
- Wasserstoffqualitäten und Lieferarten für Endkunden
- Wasserstoffqualität/ Druck in diesem Projekt für potenzielle Tankstellenkunden
- Energiebedarf der Wasserstoff-Bereitstellung
- Szenarien der Wasserstoff-Bereitstellung für Tankstellen
- Prinzip/ Technik der Wasserstoff-Reinigung/ Verdichtung
- Die Wasserstoff-Tankstelle
- Prinzipien von Wasserstoff-Tankstellen
- Tankstellenkonzeptbeispiele für den wirtschaftlichen Betrieb

// Explosionsgefahr durch explosionsfähige Stoffe

DEKRA

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

Das Explosionsdreieck



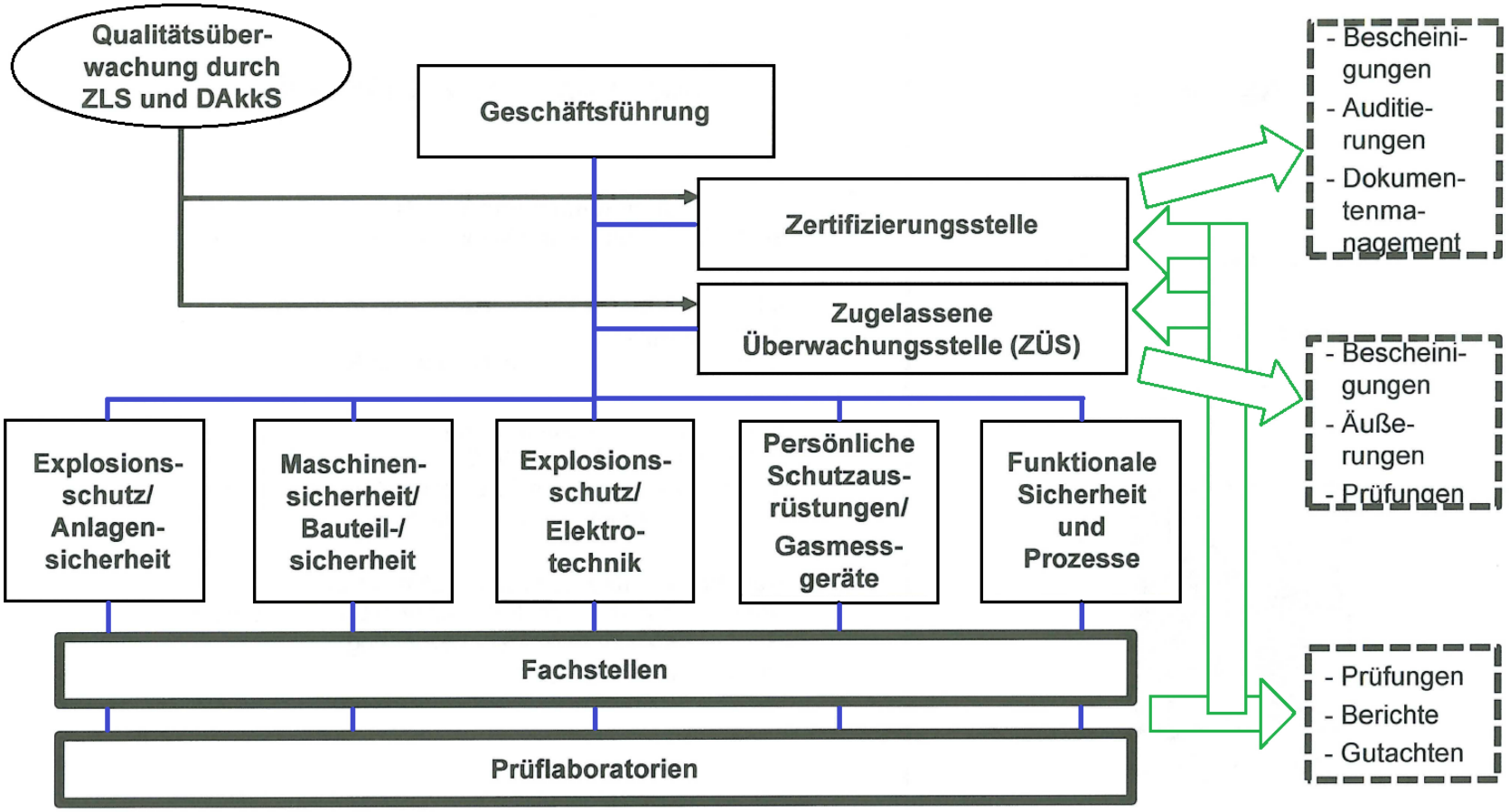
Brennstoff

- 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.

Nach Quelle: Dr. J Hübner, Dekra-Exam GmbH, Sicherheitstechnische Kenngrößen für den Explosionsschutz

// Wasserstoff-Sicherheit hat lange Tradition und ist gut durchorganisiert



DAkkS: Deutsche Akkreditierungsstelle
ZLS: Zentralstelle der Länder für Sicherheitstechnik
ZÜS: Zugelassene Überwachungsstelle

Nach Quelle: Dr. J Hübner, Dekra-Exam GmbH, Sicherheitstechnische Kenngrößen für den Explosionsschutz

// Es gibt für Konzeption, Bau, Überwachung und Betrieb eine solide Ausbildung von befähigten Personen

WEKA AKADEMIE

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

WEKA AKADEMIE

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 undGefährdungsbeurteilung 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

Was ist Explosionsschutz?

- Der Explosionsschutz ist ein Teilgebiet der Technik, das sich mit dem Schutz vor der Entstehung von Explosionen und deren Auswirkungen beschäftigt.

- Der Explosionsschutz zählt zum Bereich der Sicherheitstechnik und definiert/ beschreibt alle technischen, konstruktiven, organisatorischen Maßnahmen, die der Verhütung von Schäden an Personen oder Sachen dienen.

// Was sind Explosionsschutzzonen?

Zur Entwicklung und Anwendung der technischen konstruktiven und organisatorischen Maßnahmen des Explosionsschutzes wurden 3 Gefährdungszonen für Gase (n) und Stäube (2n) definiert:

Ex-Schutzzone 0/20 > 50 % Betriebsdauer

Bereich, in dem gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln ständig, über lange Zeiträume oder "häufig" vorhanden ist.

Ex-Schutzzone 1/21 < 50% Betriebsdauer

Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln bilden kann

Ex-Schutzzone 2/22 einmal pro Jahr

Bereich, in dem bei Normalbetrieb eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln normalerweise nicht oder aber nur kurzzeitig auftritt.

Quelle: BGR 104 Explosionsschutzregeln, Januar 2007

// Methodik des Explosionsschutzes

Die Maßnahmen des Explosionsschutzes sind folgendermaßen eingeteilt:

PRIMÄRER EXPLOSIONSSCHUTZ

Maßnahmen, welche eine Bildung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre (geA) verhindern oder einschränken (Vermeiden explosionsfähiger Atmosphäre).

SEKUNDÄRER EXPLOSIONSSCHUTZ

Maßnahmen, welche die Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre verhindern (Vermeiden wirksamer Zündquellen).

TERTIÄRER EXPLOSIONSSCHUTZ (KONSTRUKTIVER EXPLOSIONSSCHUTZ)

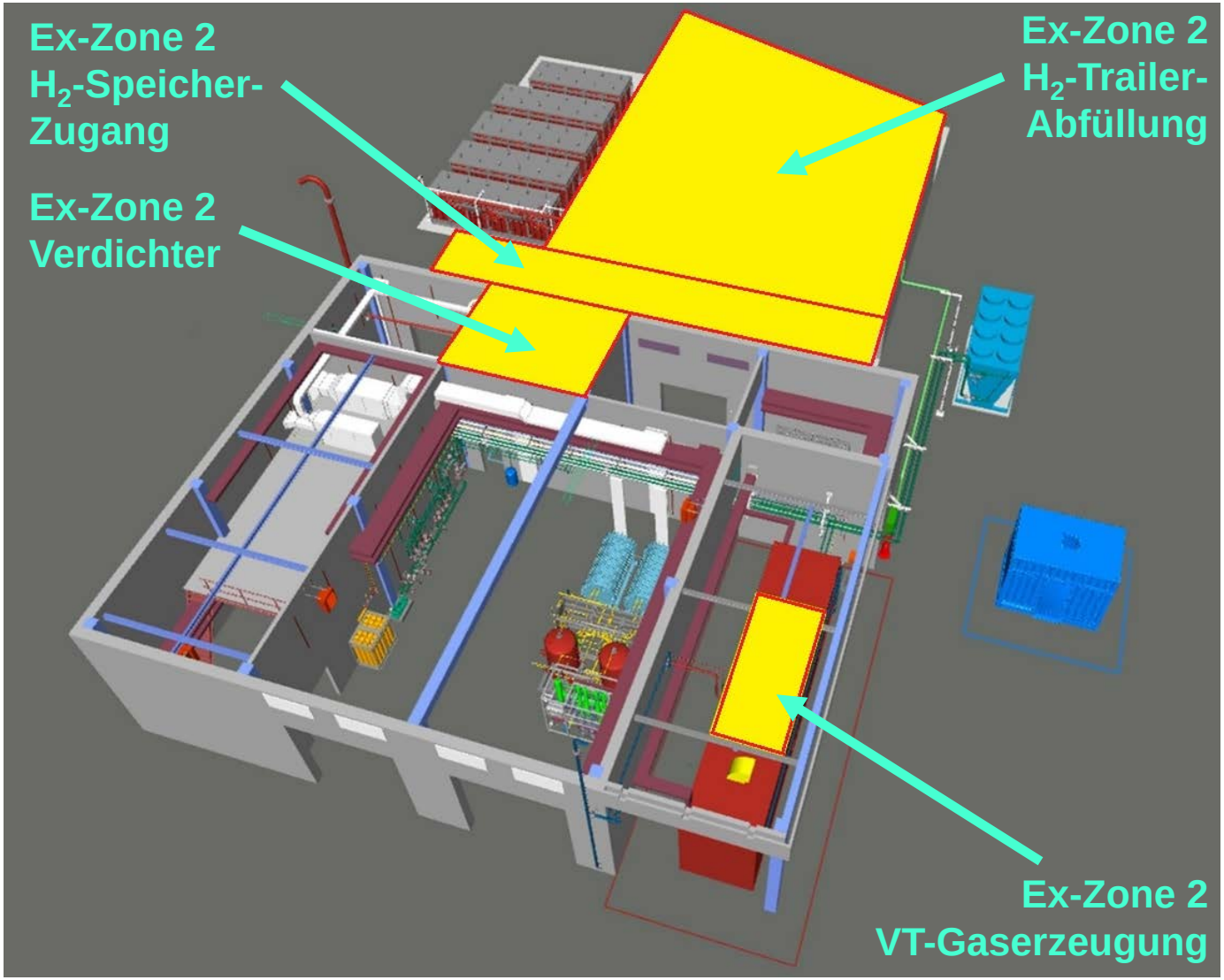
Maßnahmen, welche die Auswirkungen einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken.

Nach Quelle: Dr. J Hübner, Dekra-Exam GmbH, Sicherheitstechnische Kenngrößen für den Explosionsschutz

// Maßnahmen des Explosionsschutzes

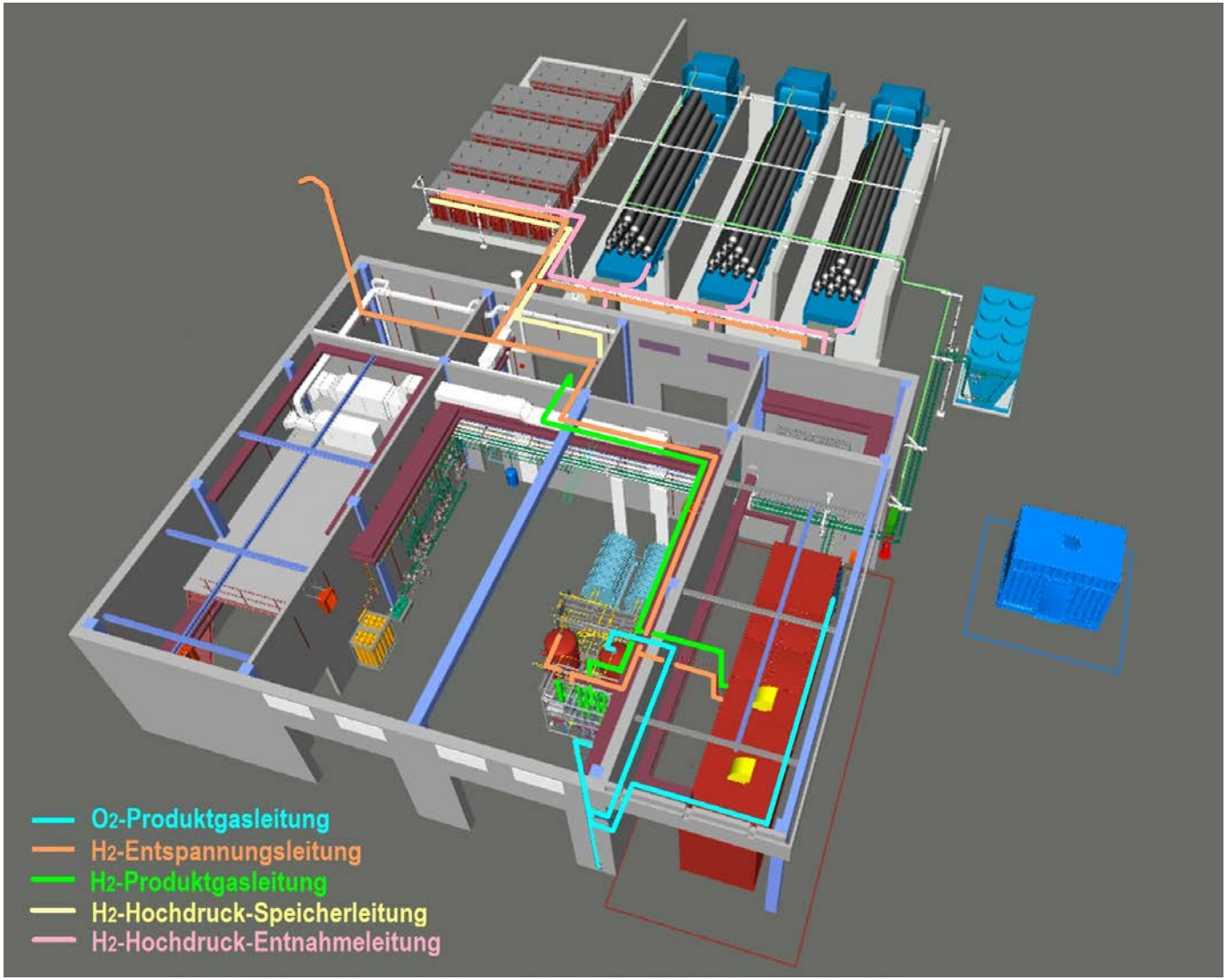
Nach Quelle: Dr. J Hübner, Dekra-Exam GmbH, Sicherheitstechnische Kenngrößen für den Explosionsschutz

// Leuchtturmprojekt “PtG-BW”
PtG-Anlage in Wyhlen, Ex-Bereiche



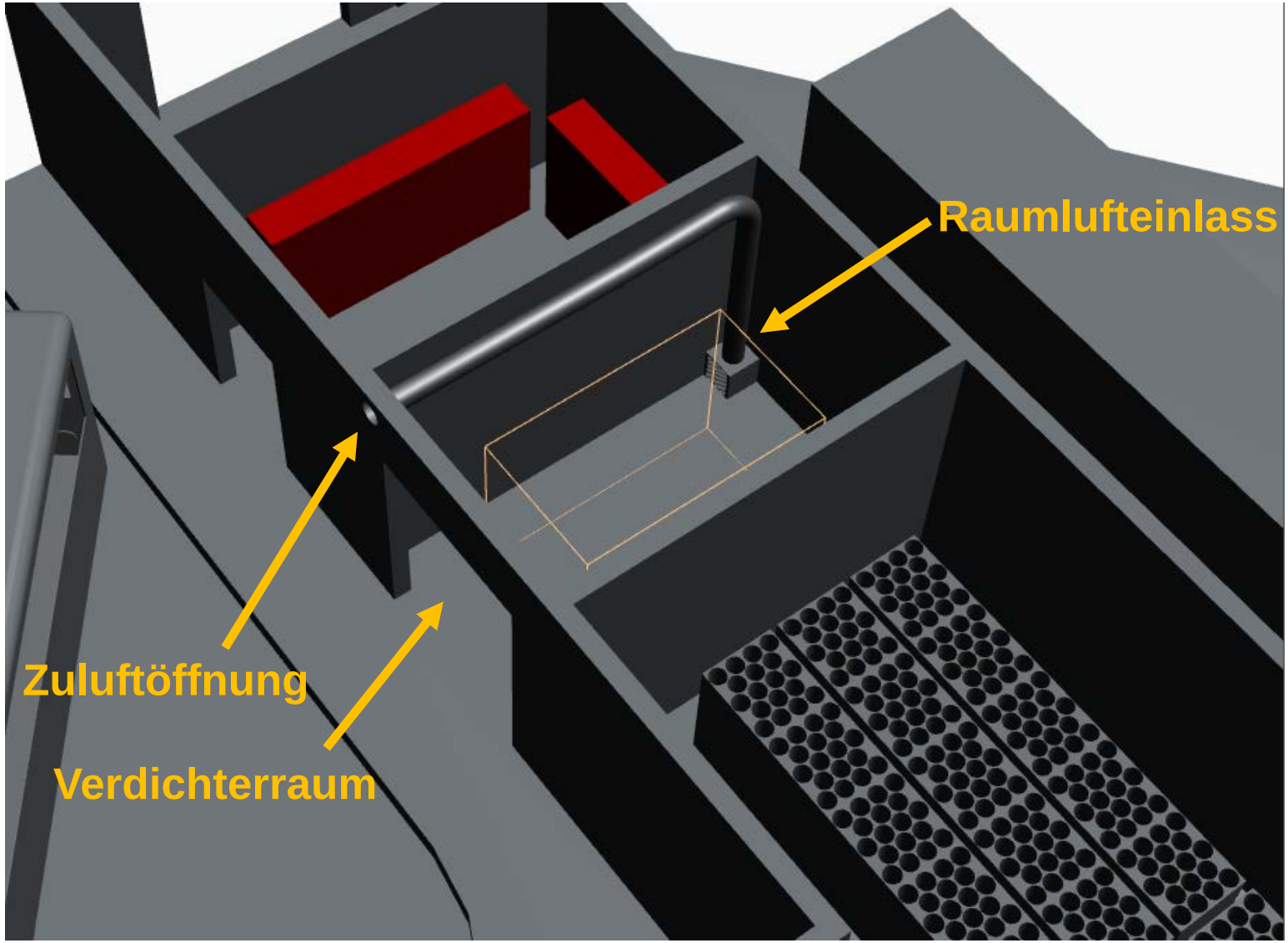
Nach Quelle:
Energiedienst /
Haas Engineering

// Leuchtturmprojekt “PtG-BW”
PtG-Anlage in Wyhlen, Gaswege

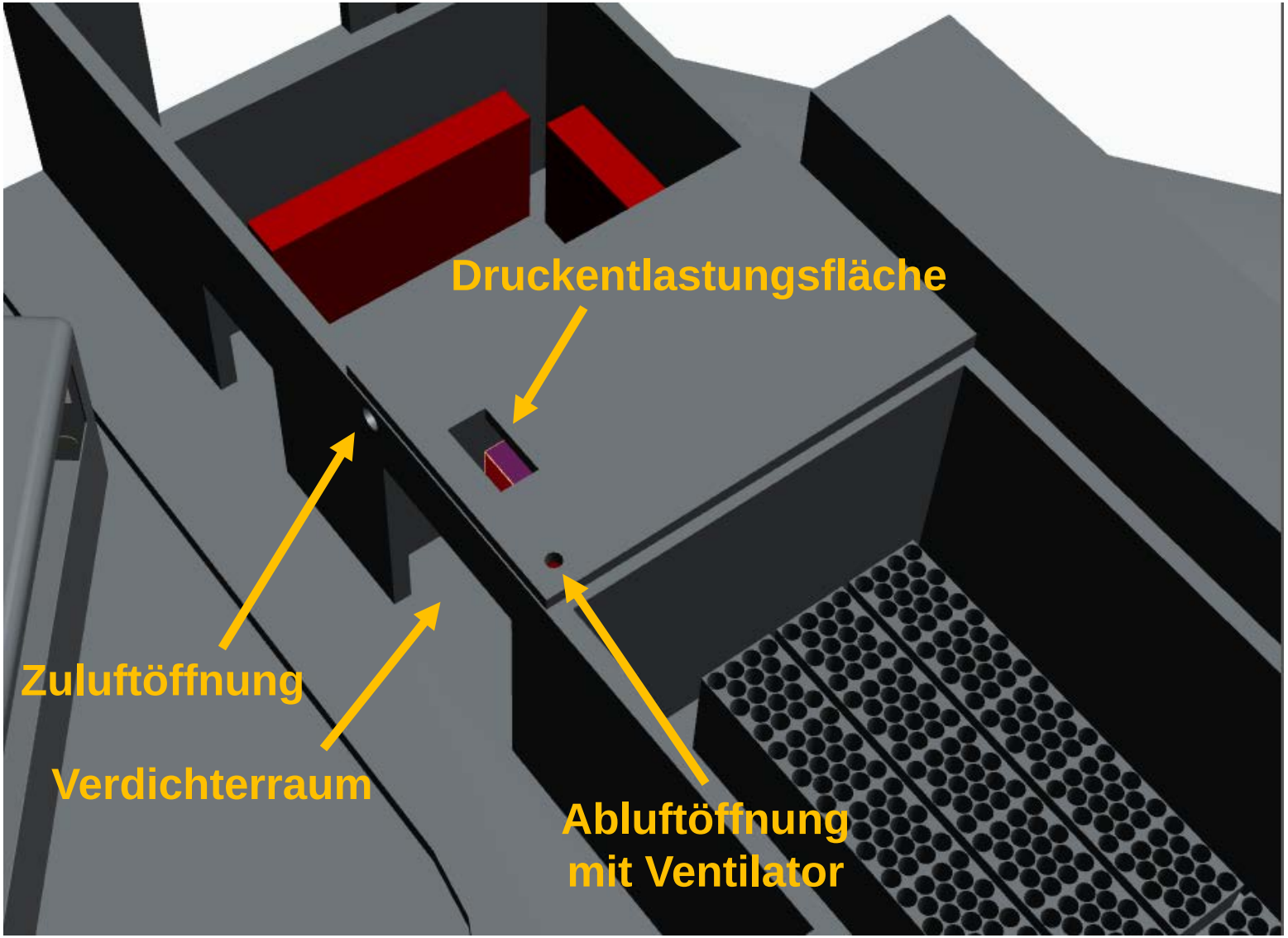


Nach Quelle:
Energiedienst /
Haas Engineering

// H_2-Anlagenkonzept, Detail-Raumkonzept Verdichterraum-Beispiel ohne Dach - 1

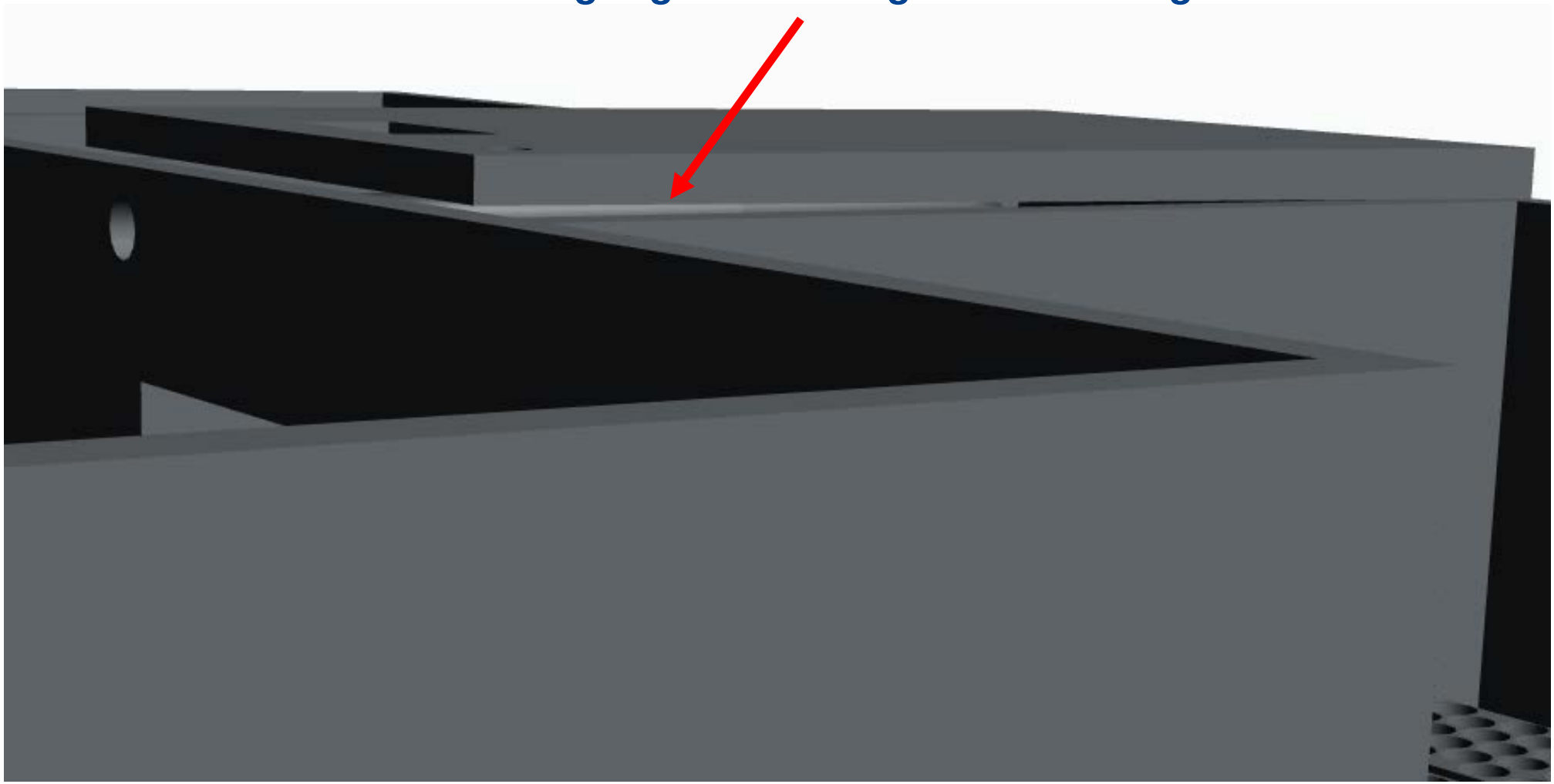


// H_2-Anlagenkonzept, Detail Raumkonzept Verdichterraum-Beispiel mit Dach - 2



// H_2-Anlagenkonzept, Detail Raumkonzept Verdichterraum-Beispiel mit Dach - 3

Schräge Dachflächen-Untersicht ca. 1% Steigung in Richtung Abluftöffnung



// Systemsicherheit Wasserstoff in Herstellung & Nutzung

Wasserstoff-Sicherheit

für Hardware, Software und Betrieb der H_2-Herstellung und Nutzung ist kein Hexenwerk da

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

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 bei 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“

// Gasbereitstellung

- Grundsätzliches zum Wasserstoff
- Basis der Wasserstoff-Sicherheit
- Grundlagen des Explosionsschutzes
- **Wasserstoffspeichermöglichkeiten**
- Wasserstoffspeicherung im Vergleich zu anderen Energieträgern
- Wasserstoffbereitstellung in versch. Formen
- Wasserstoffqualitäten und Lieferarten für Endkunden
- Wasserstoffqualität/ Druck in diesem Projekt für potenzielle Tankstellenkunden
- Energiebedarf der Wasserstoff-Bereitstellung
- Szenarien der Wasserstoff-Bereitstellung für Tankstellen
- Prinzip/ Technik der Wasserstoff-Reinigung/ Verdichtung
- Die Wasserstoff-Tankstelle
- Prinzipien von Wasserstoff-Tankstellen
- Tankstellenkonzeptbeispiele für den wirtschaftlichen Betrieb

// Wasserstoff-Speicherarten

Arten der Speicherung

Wasserstoff dient als Speicher- und Transportmedium für Energie.
Es gibt vier grundsätzliche Möglichkeiten, Wasserstoff zu speichern

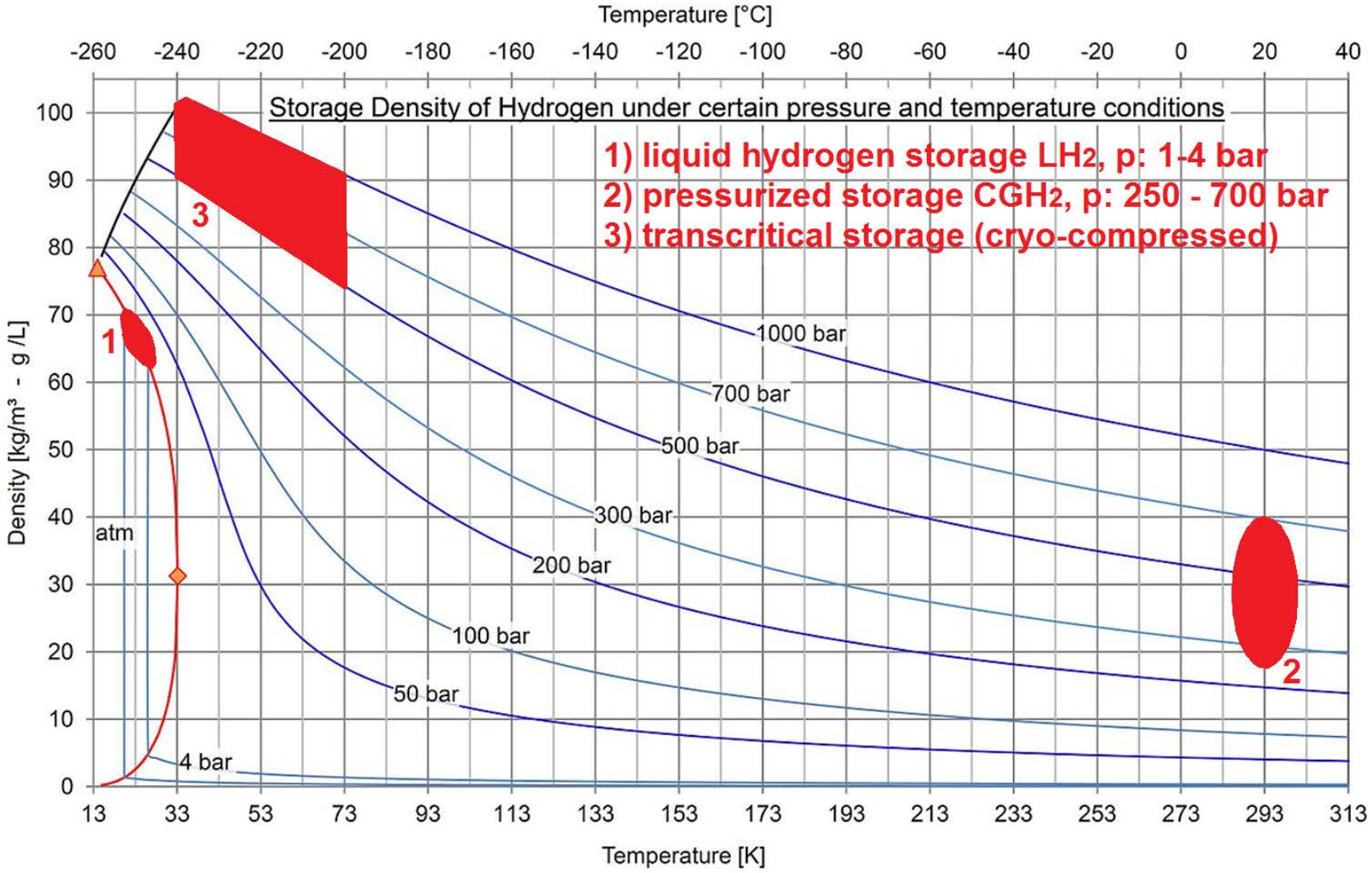
- die Druckspeicherung,
- die Speicherung von flüssigem Wasserstoff,
- Absorptionsspeicher,
- Speicherung in chemisch gebundener Form

Alle Speichermethoden haben Vor- und Nachteile, die sie für bestimmte Aufgaben qualifizieren

- **Druckwasserstoff-Speicherung** ist, wenn ein Gas unter einem höheren Druck als dem Normaldruck gespeichert wird.
- **Flüssigwasserstoff-Speicherung** ist, wenn das Gas bei ≤ -253 °C in flüssiger Form vorliegt. Diese Form hat die die höchste Speicherdichte bezogen auf das reine Speichervolumen.
- **Adsorptionsspeicher**, bestimmte Metalllegierungen können Wasserstoff mit Druck im Metall adsorbieren; es bilden sich Metallhydride, die Wasserstoff unter Wärmezufuhr wieder abgeben.
- **Adsorptionsspeicher**, Materialien mit großer innerer Oberfläche und geeigneter Porengröße wie z.B. poröser Kohlenstoff oder Zeolithe können Gase in ihrem Innern bevorzugt anlagern oder den Ablauf chemischer Reaktionen beschleunigen.
- **Chemische Speicher** wie in LOHC speichern Wasserstoff sicher langfristig mit hoher Energiedichte als reversibel nutzbarer Kohlenwasserstoff.

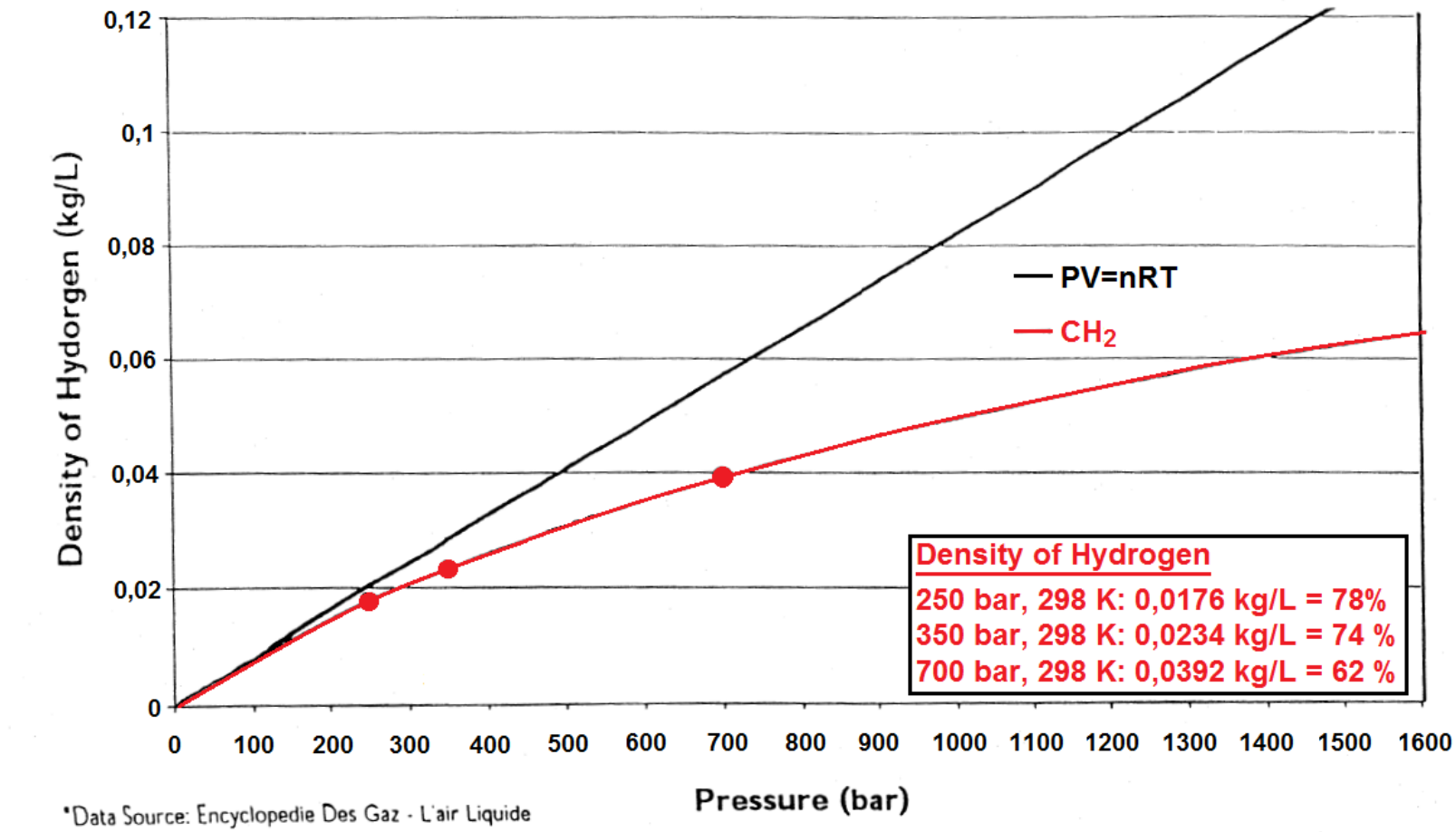
LOHC: Liquid Organic Hydrogen Carrier

// Speicherdichten für Wasserstoff



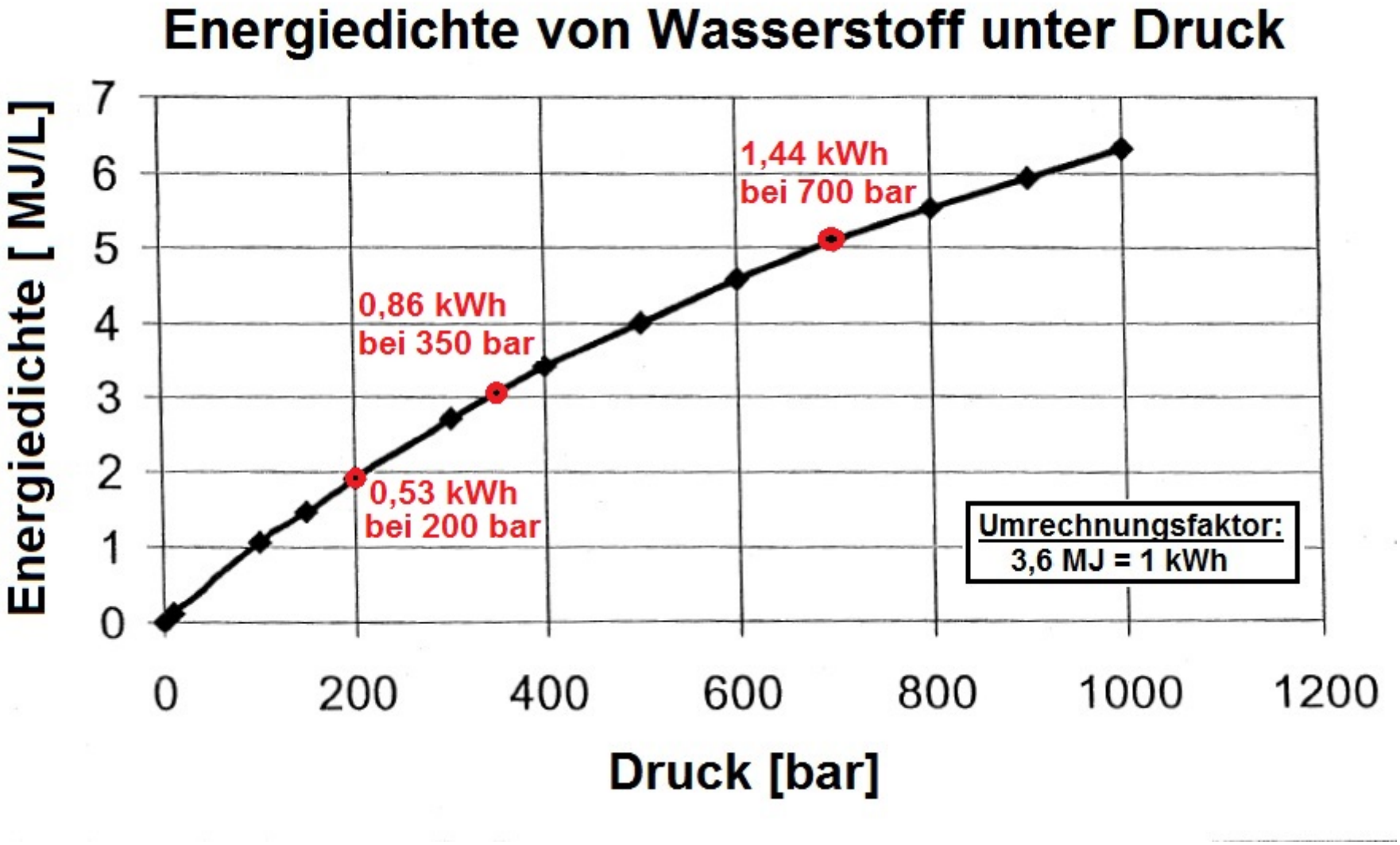
Nach http://www.ilkdresden.de/en/service/research-and-development/project/hydrogen-test-area-at-ilk-dresden//

// Wasserstoff-Kompressibilität bei verschiedenen Drücken



Quelle:2004, HDT-Essen, Lehrgang Wasserstoffspeicherung für bef. Personen

// Energiedichte von gasförmigem Wasserstoff (GH2) bei verschiedenen Drücken

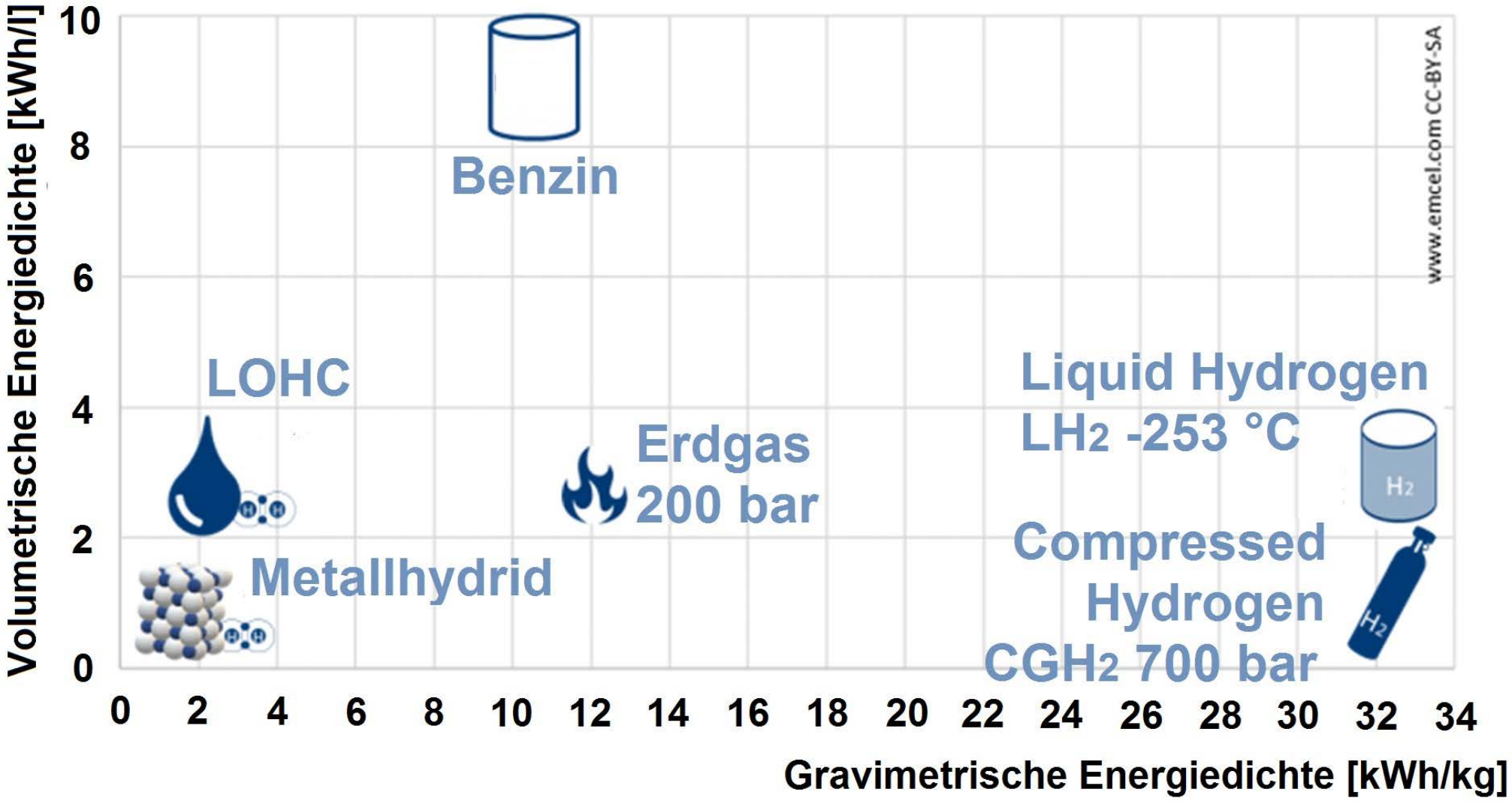


Quelle:2004, HDT-Essen, Lehrgang Wasserstoffspeicherung für bef. Personen

// Gasbereitstellung

- Grundsätzliches zum Wasserstoff
- Basis der Wasserstoff-Sicherheit
- Grundlagen des Explosionsschutzes
- Wasserstoffspeichermöglichkeiten
- **Wasserstoffspeicherung im Vergleich zu anderen Energieträgern**
- Wasserstoffbereitstellung in versch. Formen
- Wasserstoffqualitäten und Lieferarten für Endkunden
- Wasserstoffqualität/ Druck in diesem Projekt für potenzielle Tankstellenkunden
- Energiebedarf der Wasserstoff-Bereitstellung
- Szenarien der Wasserstoff-Bereitstellung für Tankstellen
- Prinzip/ Technik der Wasserstoff-Reinigung/ Verdichtung
- Die Wasserstoff-Tankstelle
- Prinzipien von Wasserstoff-Tankstellen
- Tankstellenkonzeptbeispiele für den wirtschaftlichen Betrieb

// Vergleichende Wasserstoff-Bereitstellung



Nach Quelle:19/10/2020, https://emcel.com/de/wasserstoffspeicherung/

LOHC: Liquid Organic Hydrogen Carrier

// Gasbereitstellung

- Grundsätzliches zum Wasserstoff
- Basis der Wasserstoff-Sicherheit
- Grundlagen des Explosionsschutzes
- Wasserstoffspeichermöglichkeiten
- Wasserstoffspeicherung im Vergleich zu anderen Energieträgern
- **Wasserstoffbereitstellung in versch. Formen**
- Wasserstoffqualitäten und Lieferarten für Endkunden
- Wasserstoffqualität/ Druck in diesem Projekt für potenzielle Tankstellenkunden
- Energiebedarf der Wasserstoff-Bereitstellung
- Szenarien der Wasserstoff-Bereitstellung für Tankstellen
- Prinzip/ Technik der Wasserstoff-Reinigung/ Verdichtung
- Die Wasserstoff-Tankstelle
- Prinzipien von Wasserstoff-Tankstellen
- Tankstellenkonzeptbeispiele für den wirtschaftlichen Betrieb

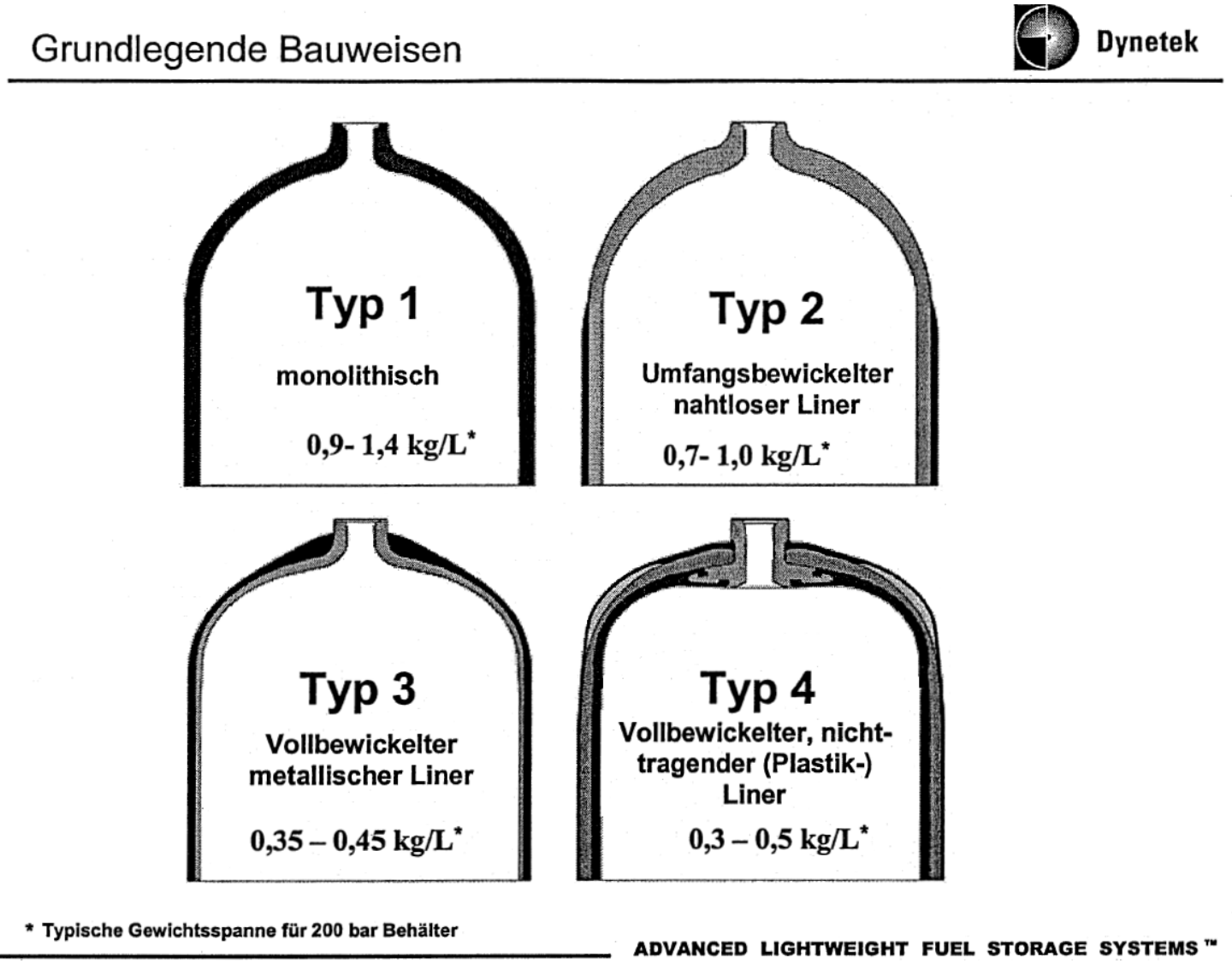
// Technische Wasserstoff-Bereitstellung

- **Bereitstellungsform**
  - Gasförmig bei versch. Drücken: 10, 40, 80, 200, 300, 350, 700 bar
  - Flüssig bei <-253 °C
- **Speicherung am Produktionsort**
  - Zwischenspeicher: gasförmig, atmosphärisch, 16, 30 bar
  - Umfüllspeicher für Abgabe: gasförmig, 200, 300, (500) bar
  - Trailer-Direktabfüllung: gasförmig, 200, 300, (500) bar
  - Umfüllspeicher für Abgabe: flüssig, <-253 °C
- **Transport**
  - LKW-Trailer, Röhrenspeicher: gasförmig, 200, 300 bar — ca. 315 - 675 kg
  - LKW-Trailer, Bündelspeicher: gasförmig, 200, 300, (500) bar — ca. 230 - 320 (1100) kg
  - LKW-Trailer, Einzelflaschen, Bündel: gasförmig, 200, 300 bar — ca. 230 - 320 kg
  - LKW-Trailer, DEWAR-Behälter, flüssig, <-253 °C — ca. 4000 kg
  - LKW-Trailer, Flüssigbehälter: chemisch gebunden in LOHC
  - Pipeline-Transport, gasförmig
- **Transportmedien-Wahl**
  - LKW-Trailer, gasförmig: ≤ 10 to/d / < 200 km
  - LKW-Trailer, flüssig: > 20 to/d / > 200 km
  - Pipeline, gasförmig: 10 to/d / < 200 km - > 70 to/d / > 100km

Quelle:2008, Yang, C., Ogden, J., Determining the Lowest-Cost Hydrogen Delivery Mode

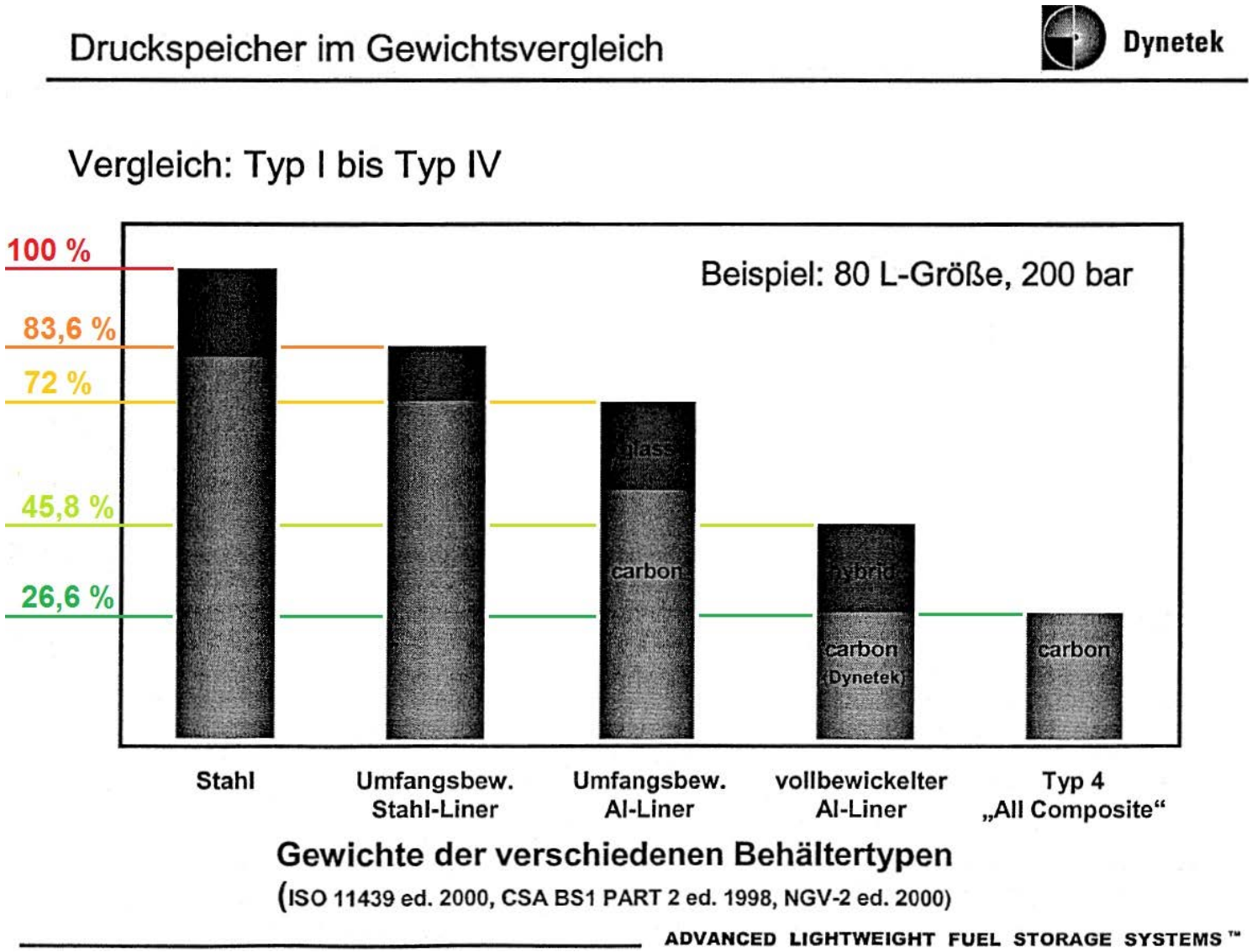
LOHC: Liquid Organic Hydrogen Carrier

// Wasserstoff-Druckbehältertypen
Grundlegende Bauweisen



Quelle:2004, HDT-Essen, Lehrgang Wasserstoffspeicherung für bef. Personen

// Wasserstoff-Druckbehältertypen Gewichtsvergleich

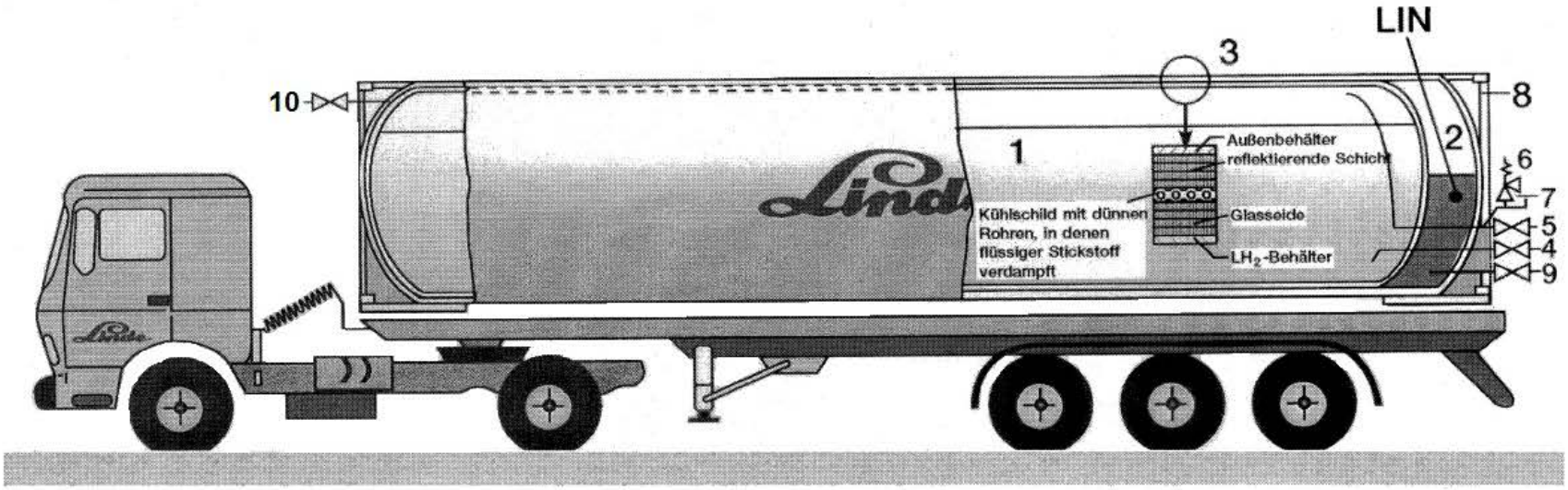


Quelle:2004, HDT-Essen, Lehrgang Wasserstoffspeicherung für bef. Personen

// Fortschrittlicher Flüssig-Wasserstoff-Transport

Linde Gas | Linde

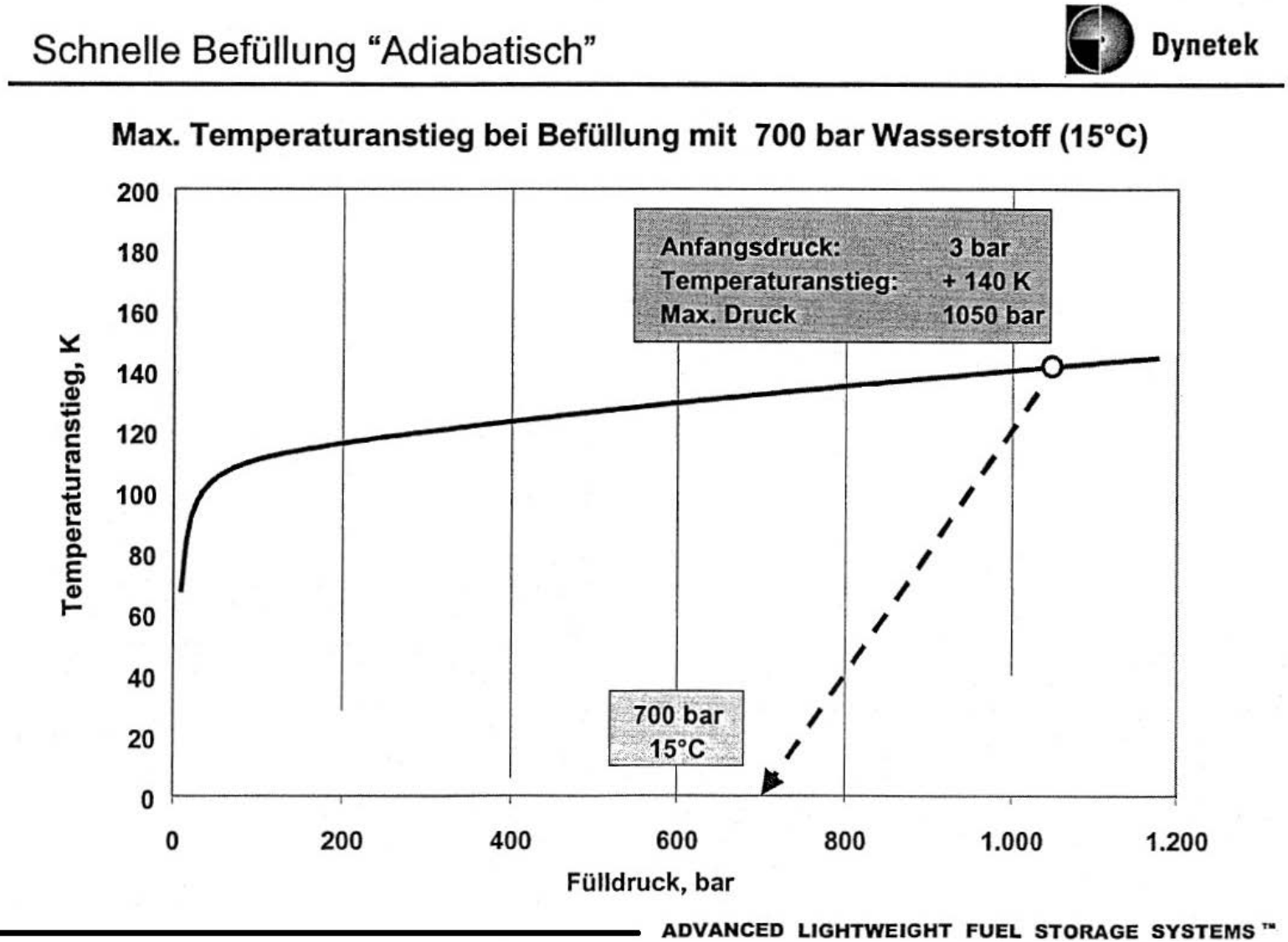
Kryogener Flüssig Transport mit LIN Schild



Abkürzungen:
LIN: Liquid Nitrogen
LH2: Liquid Hydrogen

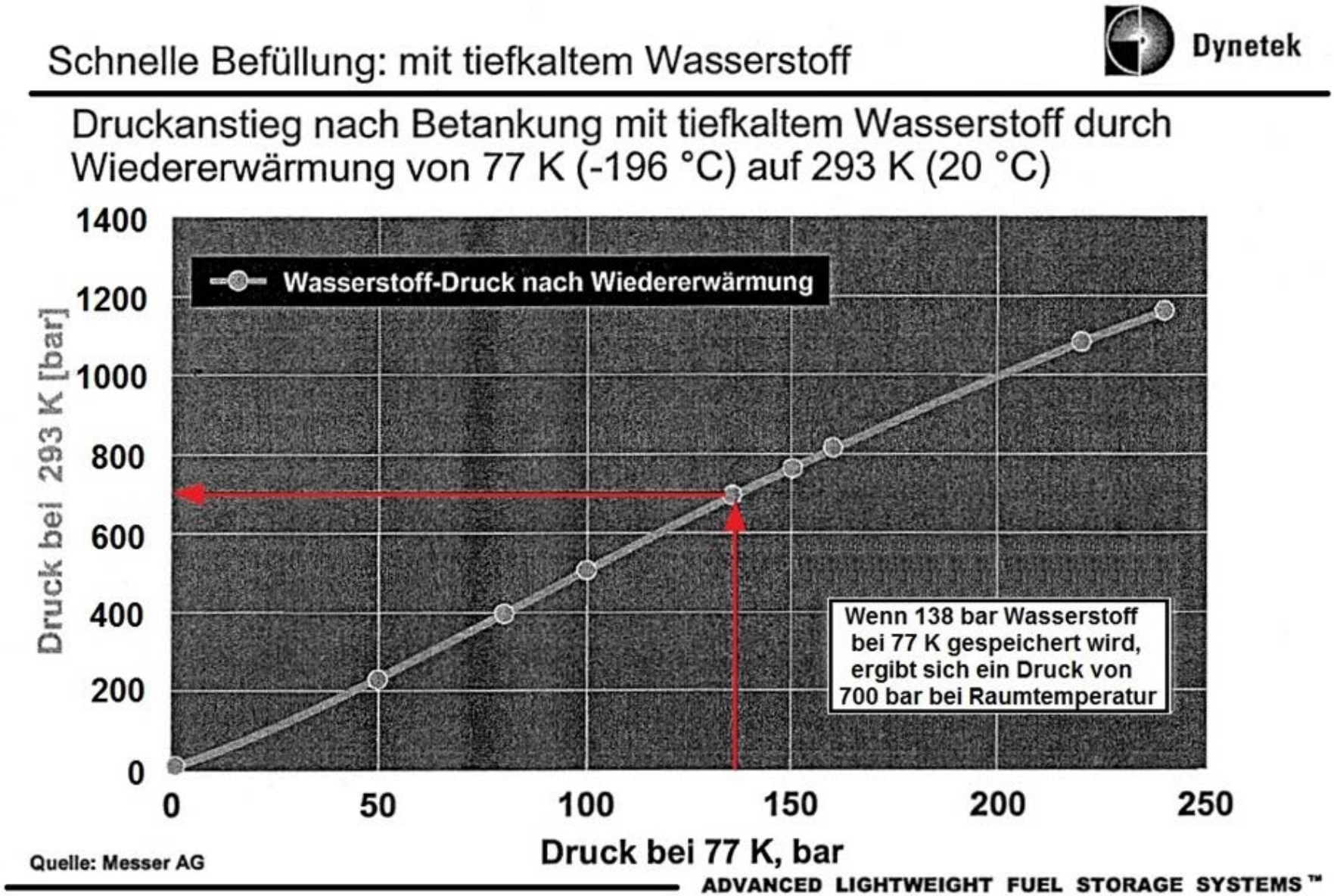
Quelle:2004, HDT-Essen, Lehrgang Wasserstoffspeicherung für bef. Personen

// Wasserstoff-Umfüllung, Schnellbefüllung - 1



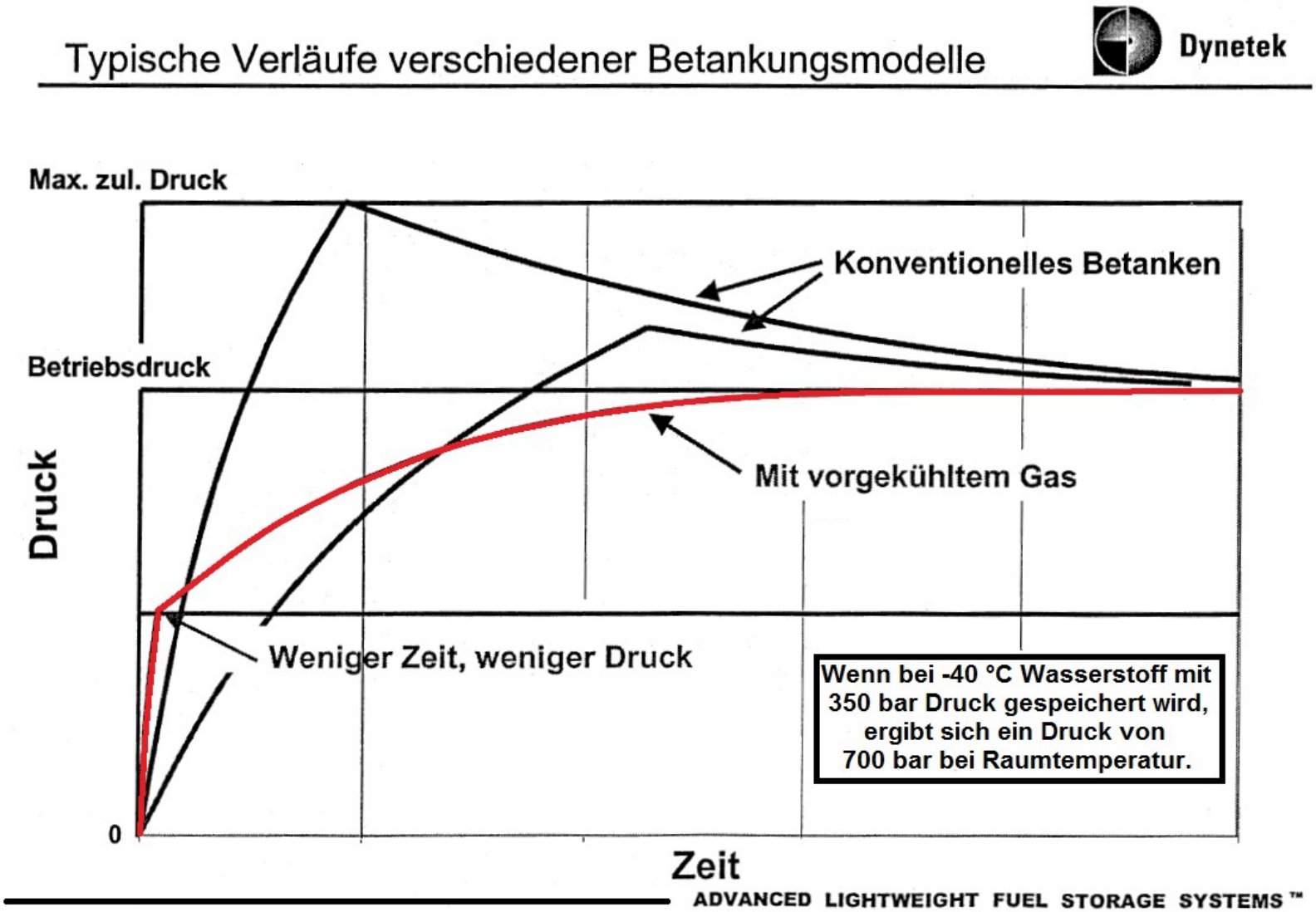
Quelle:2004, HDT-Essen, Lehrgang Wasserstoffspeicherung für bef. Personen

// Wasserstoff-Umfüllung, Schnellbefüllung - 2



Nach Quelle:2004, HDT-Essen, Lehrgang Wasserstoffspeicherung für bef. Personen

// Wasserstoff-Umfüllung, Schnellbefüllung - 2



Nach Quelle:2004, HDT-Essen, Lehrgang Wasserstoffspeicherung für bef. Personen

// Gasbereitstellung

- Grundsätzliches zum Wasserstoff
- Basis der Wasserstoff-Sicherheit
- Grundlagen des Explosionsschutzes
- Wasserstoffspeichermöglichkeiten
- Wasserstoffspeicherung im Vergleich zu anderen Energieträgern
- Wasserstoffbereitstellung in versch. Formen
- **Wasserstoffqualitäten und Lieferarten für Endkunden**
- Wasserstoffqualität/ Druck in diesem Projekt für potenzielle Tankstellenkunden
- Energiebedarf der Wasserstoff-Bereitstellung
- Szenarien der Wasserstoff-Bereitstellung für Tankstellen
- Prinzip/ Technik der Wasserstoff-Reinigung/ Verdichtung
- Die Wasserstoff-Tankstelle
- Prinzipien von Wasserstoff-Tankstellen
- Tankstellenkonzeptbeispiele für den wirtschaftlichen Betrieb

// Wasserstoff-Qualitäten - 1

Bezeichnung	Reinheit	Verwendung
Technischer Wasserstoff	99,5 %	Schutzgas, Kühlgas
Wasserstoff 3.0	99,9 %	Brennstoffzellensysteme
Wasserstoff 3.8	99,98 %	Brennstoffzellensysteme
Wasserstoff 5.0	99,999 %	Analyse, Kraftstoff, Reduktionsmittel
Wasserstoff 5.3	99,9993 %	Analyse, Reduktionsmittel, Halbleiter
Wasserstoff 5,5 ECD	99,9995 %	Trägergas, Substanzanalytik, Flam.-ion.-detek. (FID)
Wasserstoff 6.0	99,9999 %	Trägergas, Halbleiter, FID
Wasserstoff 7.0	99,99999 %	Trägergas, Betriebsgas Analysatoren, Halbleiter, FID

Quelle: 27.10.2020, https://produkte.linde-gase.de/reingase_in_druckbehaltern

// Wasserstoff-Qualitäten - 2

Nebenbestandteile, ppm	Wasserstoffqualitäten verfügbar						
	3.0	3.8	5.0	5.3	5.5 ECD	6.0	7.0
N_2	≤ 500	≤ 200	≤ 3	≤ 3		≤ 0,5	
O_2	≤ 50	≤ 10	≤ 2	≤ 1	≤ 1	≤ 0,5	≤ 0,03
H_2O	≤ 100	≤ 20	≤ 5	≤ 2	≤ 1	≤ 0,5	≤ 0,05
KW			≤ 0,5	≤ 0,2	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,03
CO					≤ 0,5	≤ 0,1	≤ 0,03
CO_2					≤ 0,5	≤ 0,1	≤ 0,03
hal. KW					≤ 0,001 in SF6-Äq		

Nach Quelle: 27.10.2020, https://produkte.linde-gase.de/reingase_in_druckbehaltern

// Wasserstoff-Qualitäten - 3

Wasserstoffqualität für Brennstoffzellen

Nebenbestandteile, ppm	3.0	3.7	3.8	5.0
N_2	≤ 200	≤ 500	≤ 300	≤ 200	≤ 3
O_2	≤ 10	≤ 50	≤ 5	≤ 10	≤ 2
H_2O	≤ 20	≤ 100	≤ 5	≤ 20	≤ 5
KW			≤ 2		≤ 0,5
CO			≤ 0,2		
CO_2			≤ 2		
hal. KW					

SAE J 2719 Ed. 03-2020	
Nicht-Wasserstoff-Gase gesamt	≤ 300
H_2O	≤ 5
Kohlenwasserstoffe gesamt ohne CH4 (C1 Basis)	≤ 2
CH_4	≤ 100
O_2	≤ 5
He	≤ 300
N_2	≤ 100
Ar	≤ 100
CO_2	≤ 2
CO	≤ 0,2
Schwefelverbindungen gesamt (H_2S-Basis)	≤ 0,004
Formaldehyd (HCHO)	≤ 0,01
Methansäure (HCOOH)	≤ 0,2
gesamt CO, HCHO, HCOOH	≤ 0,2
NH_3	≤ 0,1
Halogenierte Verbindungen (Halogenionen-Basis)	≤ 0,05
Maximale Schwebstoffteilchen-Konzentration	≤ 0,005 mg/kg

Nach Quelle: 27.10.2020, https://produkte.linde-gase.de/reingase_in_druckbehaltern; , SAE J2719 Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicle – Surface Vehicle Standard 03-2020

// Wasserstoff-Lieferarten

MICROCAN400			GENIE®		
Rauminhalt, [Liter]	Fülldruck, ca. [bar]	Füllmenge, ca. [m³]	Rauminhalt, [Liter]	Fülldruck, ca. [bar]	Füllmenge, ca. [m³]
0,2	200	0,04	20	300	5
MINICAN			**Stahlflasche**		
Rauminhalt, [Liter]	Fülldruck, ca. [bar]	Füllmenge, ca. [m³]	Rauminhalt, [Liter]	Fülldruck, ca. [bar]	Füllmenge, ca. [m³]
1	12	0,012	10	200	1,78
			50	200	8,89
MAXICAN			**Flaschenbündel**		
Rauminhalt, [Liter]	Fülldruck, ca. [bar]	Füllmenge, ca. [m³]	Rauminhalt, [Liter]	Fülldruck, ca. [bar]	Füllmenge, ca. [m³]
1,6	69	0,110	600	200	107
			600	300	151

Nach Quelle: 27.10.2020, https://produkte.linde-gase.de/reingase_in_druckbehaltern

// Gasbereitstellung

- Grundsätzliches zum Wasserstoff
- Basis der Wasserstoff-Sicherheit
- Grundlagen des Explosionsschutzes
- Wasserstoffspeichermöglichkeiten
- Wasserstoffspeicherung im Vergleich zu anderen Energieträgern
- Wasserstoffbereitstellung in versch. Formen
- Wasserstoffqualitäten und Lieferarten für Endkunden
- **Wasserstoffqualität/ Druck in diesem Projekt für potenzielle Tankstellenkunden**
- Energiebedarf der Wasserstoff-Bereitstellung
- Szenarien der Wasserstoff-Bereitstellung für Tankstellen
- Prinzip/ Technik der Wasserstoff-Reinigung/ Verdichtung
- Die Wasserstoff-Tankstelle
- Prinzipien von Wasserstoff-Tankstellen
- Tankstellenkonzeptbeispiele für den wirtschaftlichen Betrieb

// Wasserstoff-Qualität für Demonstratorbetrieb

Wasserstoffbereitstellung für Brennstoffzellen

Wasserstoffbereitstellung auf
Enddruck-Niveau: 300 bar
Ansaugdruckbereich: 3 - 30 bar

Nebenbestandteile in [ppm]	Präf. 1 5.0	Präf. 2 3.7
N_2	≤ 3	≤ 300
O_2	≤ 2	≤ 5
H_2O	≤ 5	≤ 5
KW	≤ 0,5	≤ 2
CO	≤ 0,2	≤ 0,2
CO_2	≤ 2	≤ 2
hal. KW	≤ 0,05	≤ 0,05

Wasserstoff-Treibstoff EN17124 / ISO14687 T.1 G.D

Nicht-Wasserstoff-Gase gesamt	≤ 300
H_2O	≤ 5
Kohlenwasserstoffe gesamt ohne CH4 (C1 Basis)	≤ 2
CH_4	≤ 100
O_2	≤ 5
He	≤ 300
N_2	≤ 300
Ar	≤ 300
CO_2	≤ 2
CO	≤ 0,2
Schwefelverbindungen gesamt (H_2S-Basis)	≤ 0,004
Formaldehyd (HCHO)	≤ 0,2
Methansäure (HCOOH)	≤ 0,2
gesamt CO, HCHO, HCOOH	≤ 0,2
NH_3	≤ 0,1
Halogenierte Verbindungen (Halogenionen-Basis)	≤ 0,05
Maximale Schwebstoffteilchen-Konzentration	≤ 1 mg/kg

Nach Quelle: 27.10.2020, https://produkte.linde-gase.de/reingase_in_druckbehaltern

// Energiebedarf zur Wasserstoff-Bereitstellung

Verfahrensschritte	Technische Angaben	Energieverluste [kWh/kg]	H_2-Verluste [% von H_O]
Elektrolyse	1.76 Volt, 1 atm	16,9	43
Kompression	1 bar – 200 bar	2,8	7
	1 bar – 400 bar	3,6	9
	1 bar – 800 bar	4,7	12
Verflüssigung	100 kg/h	18,1	46
	1.000 kg/h	12,5	32
	10.000 kg/h	9,7	28
Straßentransport	200 bar, 200 km	5,0	13
	200 bar, 400 km	10,0	25
	flüssig, 200 km	0,8	2
Pipeline	10 bar, 1.000 km	3,3	8
H_2-Elek an Tankstelle	60.000 L/d Benzin	22,2*	56
Betankung	100 bar auf 400 bar	1,4	4
Brennstoffzelle		39,4	50

*einschl. Wasseraufbereitung, Kompression, Gebäudeenergiebedarf usw.

Tab.1: Typischer Energiebedarf für Erzeugung, Verpackung, Verteilung und Nutzung von Wasserstoff

Nach Quelle: U. Bossel, Die Rolle des Wasserstoffs in einer nachhaltig geführten Energiewirtschaft

H_O: Brennwert Wasserstoff 3,54 kWh/Nm^3

// Vergleich der Energieverluste verschiedener Wasserstoff-Speichermethoden

DWV Deutscher • Wasserstoff • Verband	pressure tank	liquid tank	hydride tank
energy loss due to compression or liquifaction in relation to energy content of stored hydrogen	- 10 %	- 30 %	- 8 %
liquid H_2-loss due to filling process	0	- 2%, when cold	0
H_2-losses due to evaporation	0	- 1% per day	0
heat balance due to hydride formation	0	0	≤10 %
energy demand for H_2-purification before application	0	?	?

Quelle:2004, HDT-Essen, Lehrgang Wasserstoffspeicherung für bef. Personen

// Gasbereitstellung

- Grundsätzliches zum Wasserstoff
- Basis der Wasserstoff-Sicherheit
- Grundlagen des Explosionsschutzes
- Wasserstoffspeichermöglichkeiten
- Wasserstoffspeicherung im Vergleich zu anderen Energieträgern
- Wasserstoffbereitstellung in versch. Formen
- Wasserstoffqualitäten und Lieferarten für Endkunden
- Wasserstoffqualität/ Druck in diesem Projekt für potenzielle Tankstellenkunden
- Energiebedarf der Wasserstoff-Bereitstellung
- **Szenarien der Wasserstoff-Bereitstellung für Tankstellen**
- Prinzip/ Technik der Wasserstoff-Reinigung/ Verdichtung
- Die Wasserstoff-Tankstelle
- Prinzipien von Wasserstoff-Tankstellen
- Tankstellenkonzeptbeispiele für den wirtschaftlichen Betrieb

// Szenarien zur Wasserstoff-Bereitstellung

Verfahrensschritte und H_2-Verluste [% von H_o]

	Pipeline **8**	Kompr. 200 b **7**	Tanke 400 b **4**	Summe **19**
	Pipeline **8**	Kompr. 400 b **9**	Tanke 800 b **4**	Summe **21**
Kompr. 200 b **7**	Fz-Transp. 200km **13**		Tanke 400 b **4**	Summe **24**
Kompr. 400 b **9**	Fz-Transp. 200 km **13**		Tanke 800 b **4**	Summe **26**
Verflüss. 28	Fz-Transp. 1000 km 2	Kompr. 200 b 7	Tanke 400 b 4	Summe 41
Verflüss. 28	Fz-Transp. 1000 km 2	Kompr. 400 b 9	Tanke 800 b 4	Summe 43

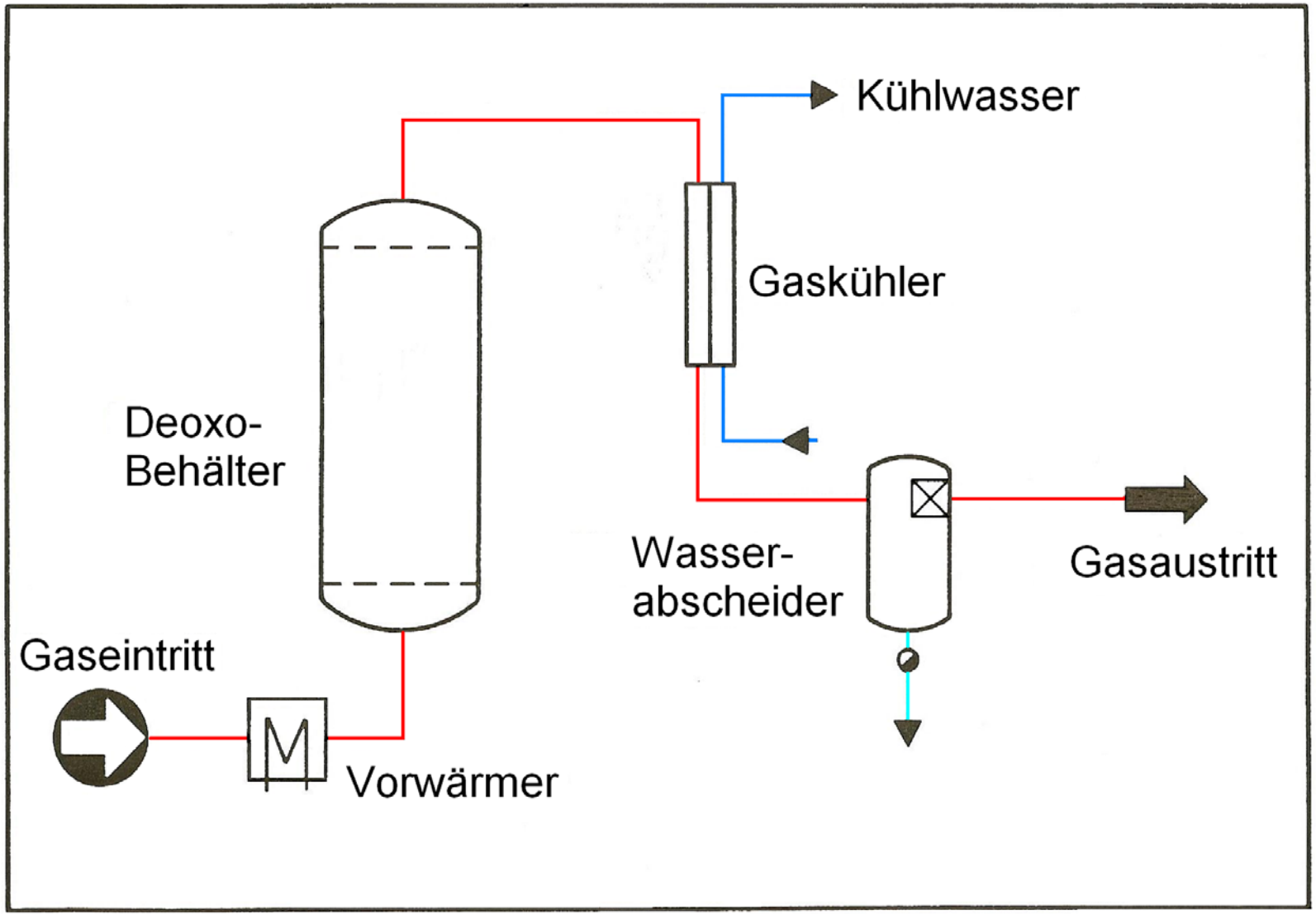
Nach Quelle: U. Bossel, Die Rolle des Wasserstoffs in einer nachhaltig geführten Energiewirtschaft

H_O: Brennwert Wasserstoff 3,54 kWh/Nm^3

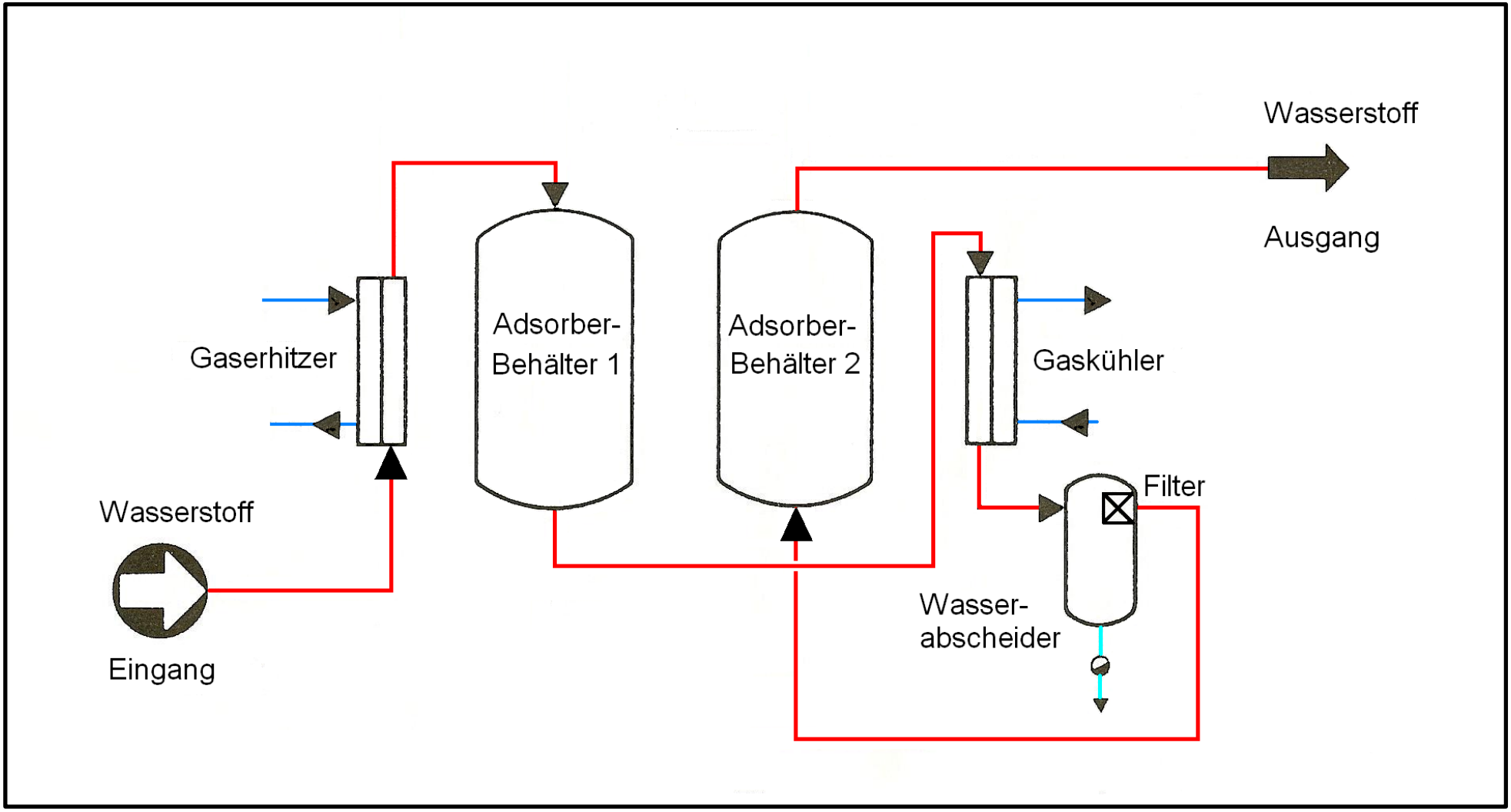
// Gasbereitstellung

- Grundsätzliches zum Wasserstoff
- Basis der Wasserstoff-Sicherheit
- Grundlagen des Explosionsschutzes
- Wasserstoffspeichermöglichkeiten
- Wasserstoffspeicherung im Vergleich zu anderen Energieträgern
- Wasserstoffbereitstellung in versch. Formen
- Wasserstoffqualitäten und Lieferarten für Endkunden
- Wasserstoffqualität/ Druck in diesem Projekt für potenzielle Tankstellenkunden
- Energiebedarf der Wasserstoff-Bereitstellung
- Szenarien der Wasserstoff-Bereitstellung für Tankstellen
- **Prinzip/ Technik der Wasserstoff-Reinigung/ Verdichtung**
- Die Wasserstoff-Tankstelle
- Prinzipien von Wasserstoff-Tankstellen
- Tankstellenkonzeptbeispiele für den wirtschaftlichen Betrieb

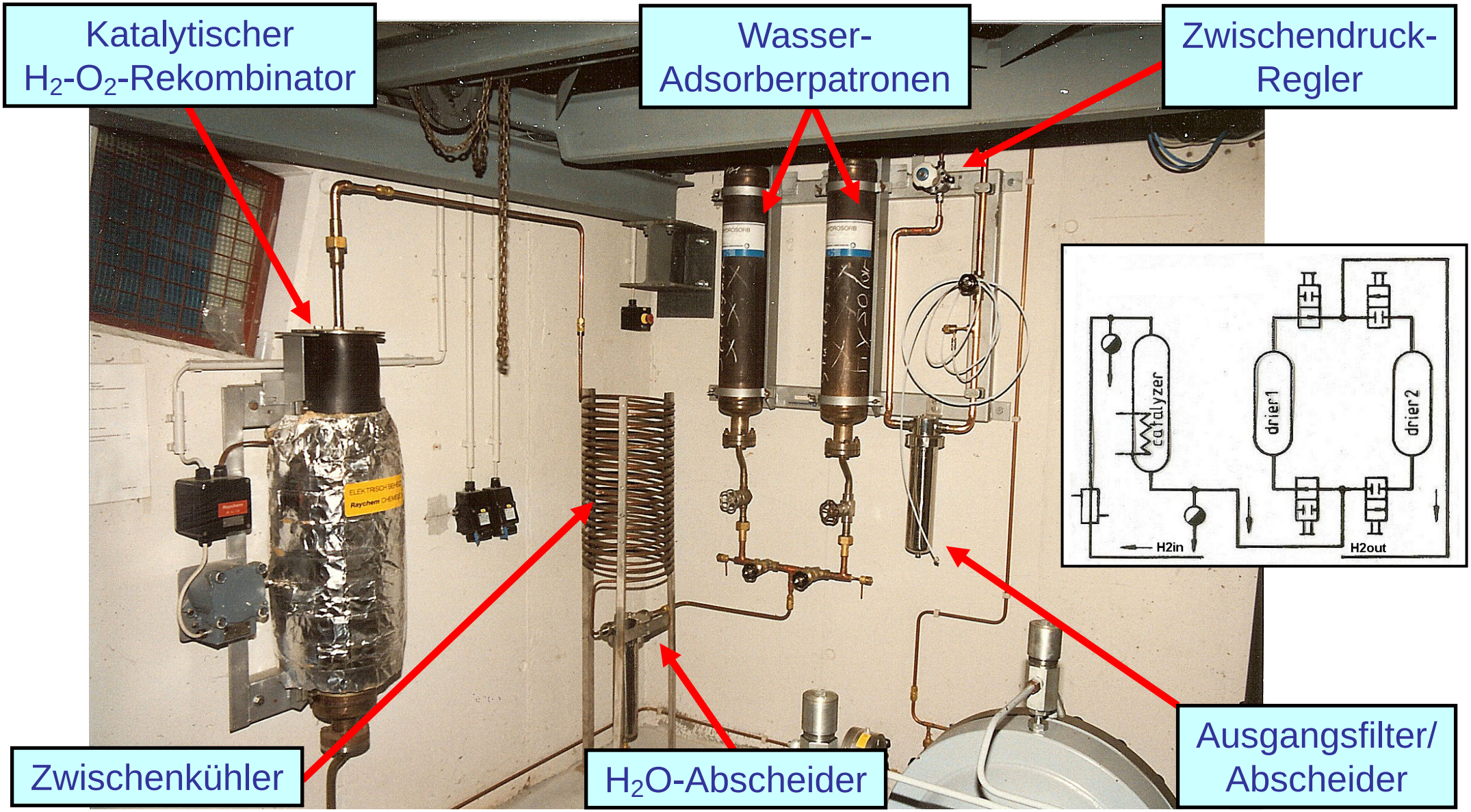
// Katalytische Rekombination



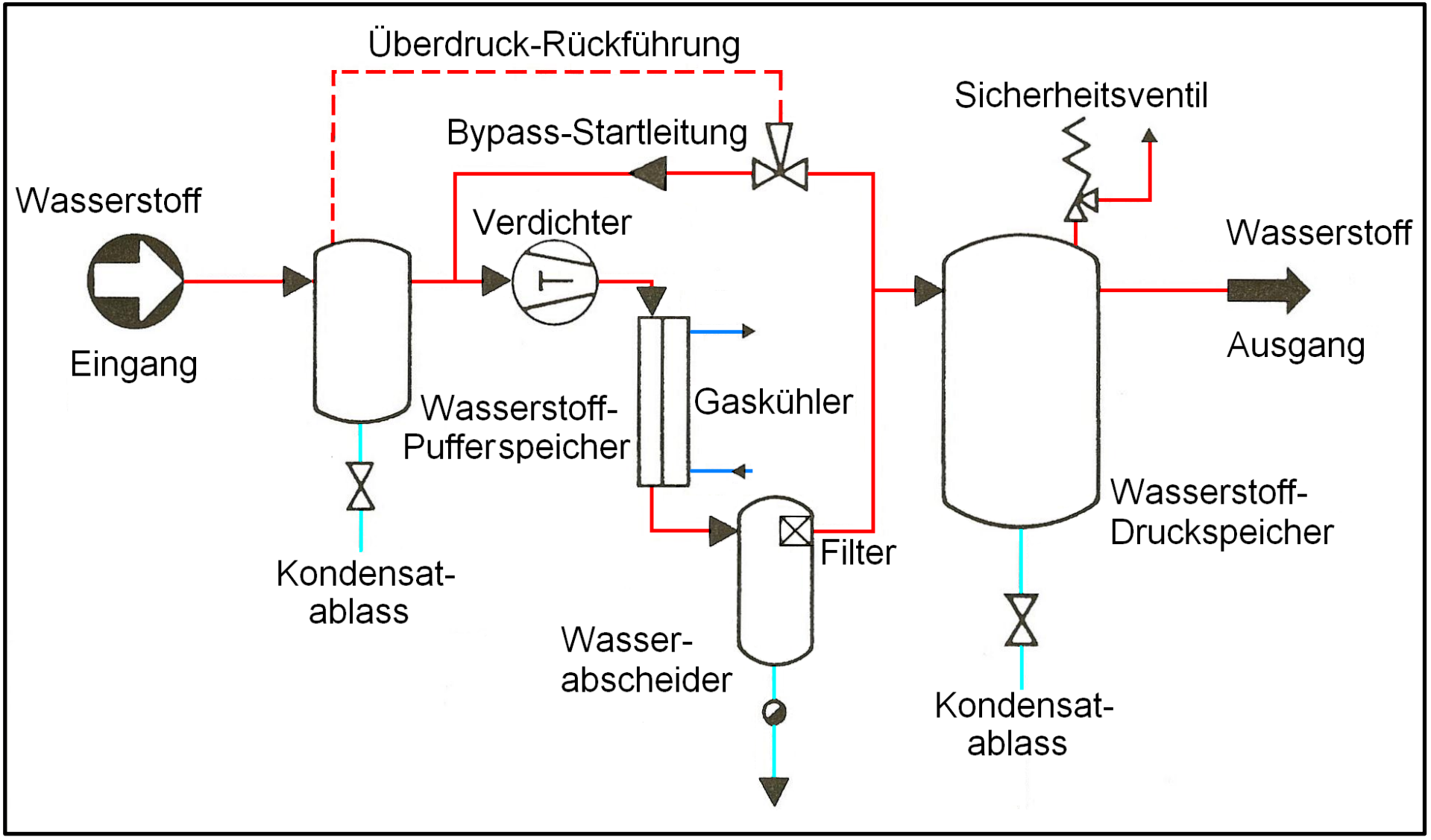
// Adsorptionstrockner



// Beispiel einer katalytischen Rekombinationanlage für Wasserstoffqualität 5.0



// Verdichter-Speicher-Einheit



// Beispiel eines Ballon-Zwischenspeichers 0,02 bar

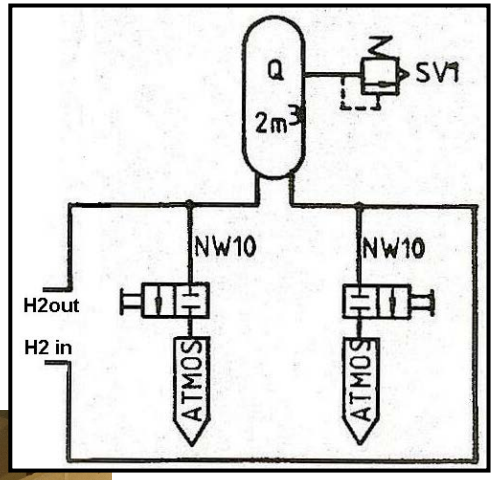
Ballon-aufhängung

Füllstands-messung

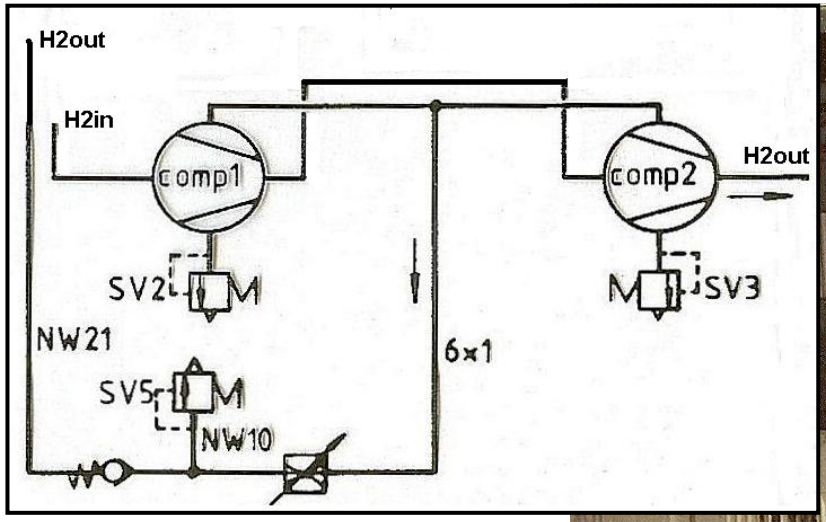
Elektrische Anbindung

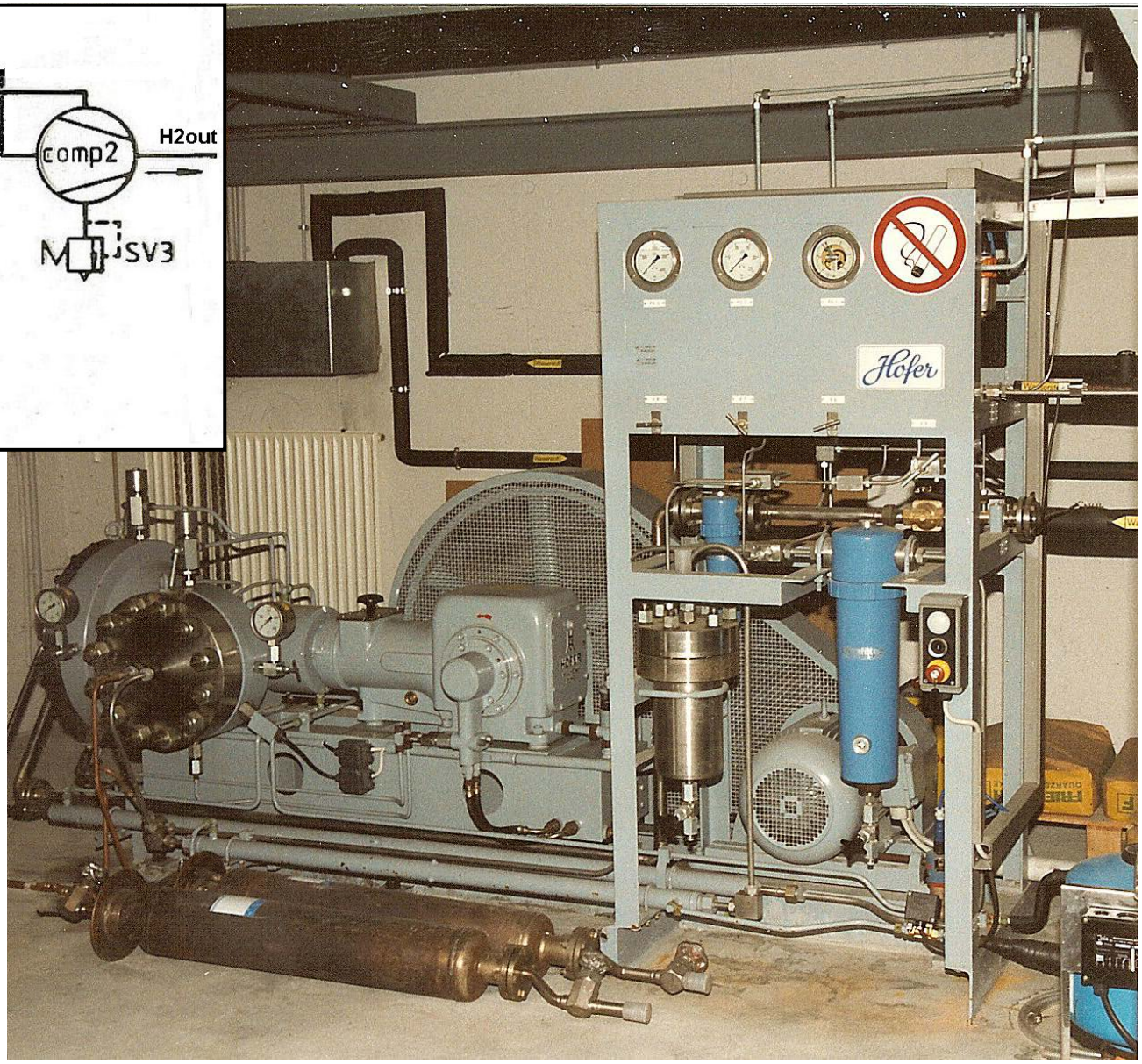
H_2-Zufuhr

H_2-Entnahme

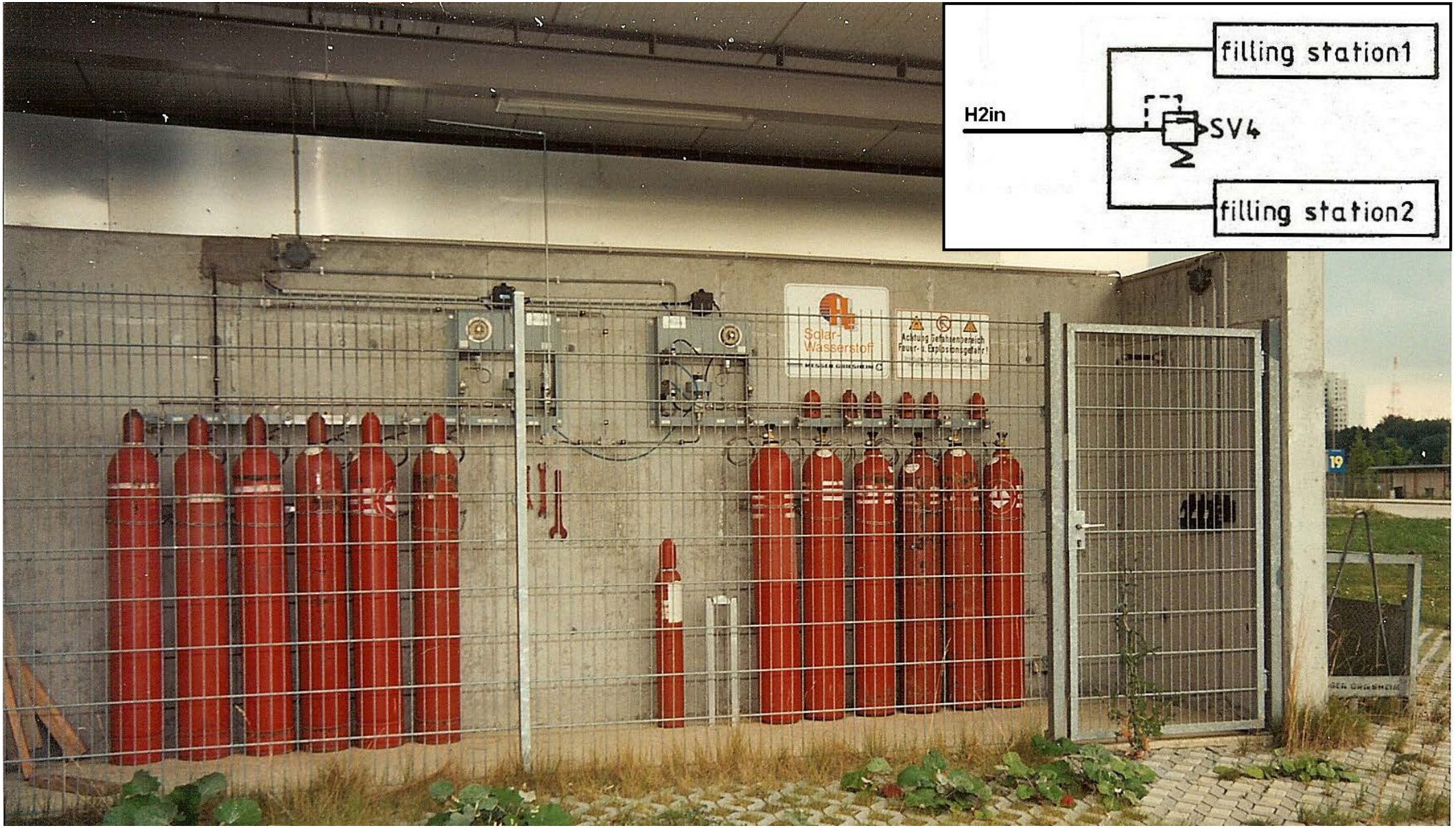


// Beispiel eines Membranverdichters 0,02 – 200 bar





// Beispiel eines 200 bar-Abfüllanlage für Druckflaschen



// Gasbereitstellung

- Grundsätzliches zum Wasserstoff
- Basis der Wasserstoff-Sicherheit
- Grundlagen des Explosionsschutzes
- Wasserstoffspeichermöglichkeiten
- Wasserstoffspeicherung im Vergleich zu anderen Energieträgern
- Wasserstoffbereitstellung in versch. Formen
- Wasserstoffqualitäten und Lieferarten für Endkunden
- Wasserstoffqualität/ Druck in diesem Projekt für potenzielle Tankstellenkunden
- Energiebedarf der Wasserstoff-Bereitstellung
- Szenarien der Wasserstoff-Bereitstellung für Tankstellen
- Prinzip/ Technik der Wasserstoff-Reinigung/ Verdichtung
- **Die Wasserstoff-Tankstelle**
- Prinzipien von Wasserstoff-Tankstellen
- Tankstellenkonzeptbeispiele für den wirtschaftlichen Betrieb

// Welche Wasserstoff-Tankstellengröße wird benötigt?

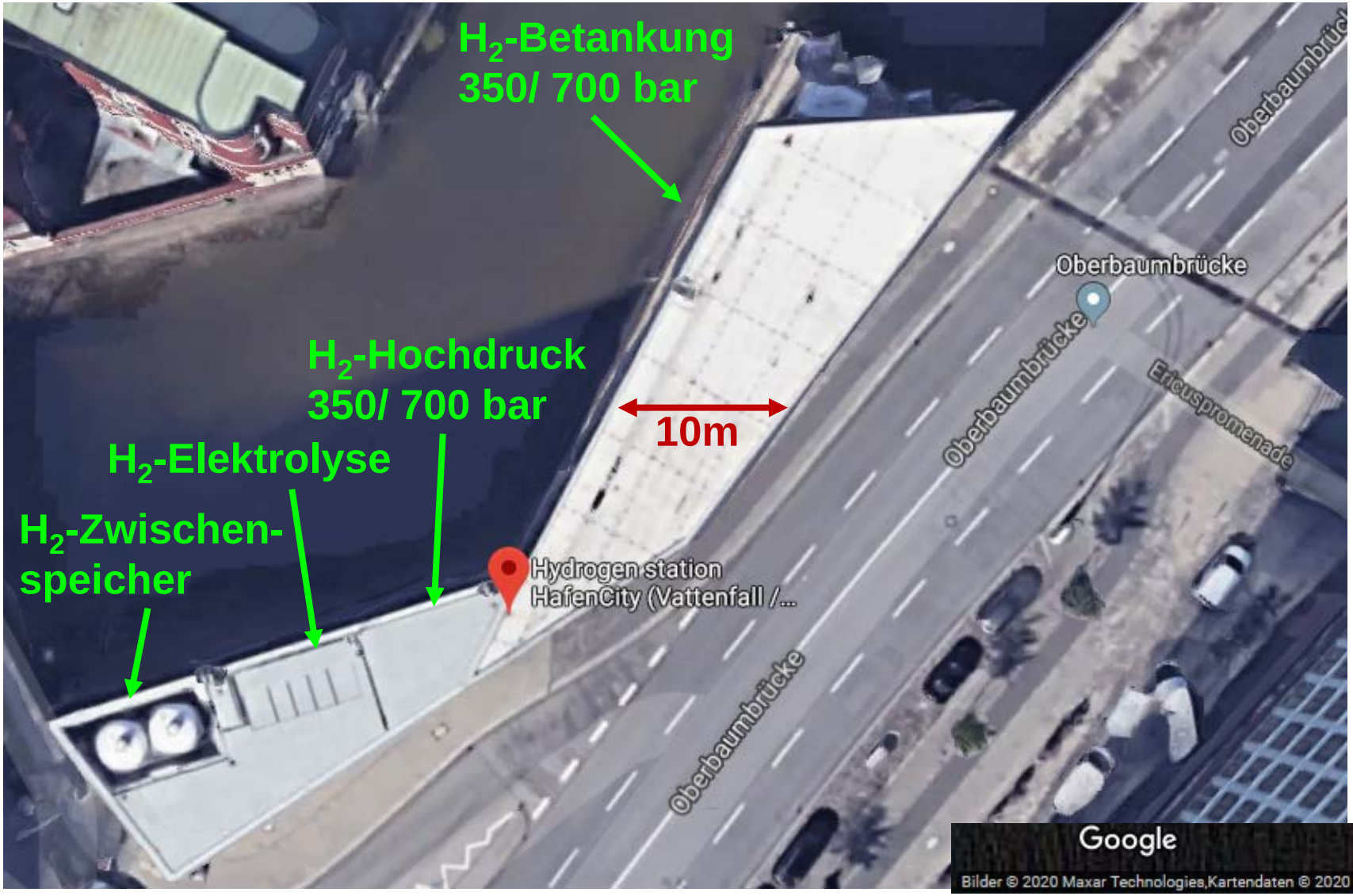
HRS performance indicator	Very Small HRS	Small HRS	Medium HRS	Large HRS
Number of refueling positions	1	1	2	4
Number of refuelings per hour, per position	2.5	6	6	10
Number of back-to-back refuelings per position	0	1	1	10
Maximum waiting time to fuel consecutive cars	20 min	5 min	5 min	Not applicable
Number of consecutive hours to meet specifications	No defined requirement	3	3	24/7
Average daily number of refuelings	10	30	60	125
Maximum daily number of refuelings	20	38	75	180
Maximum hourly hydrogen output	18 kg	34 kg	67 kg	224 kg
Average daily hydrogen output	56 kg	168 kg	336 kg	700 kg
Maximum daily hydrogen output	80 kg	212 kg	420 kg	1,000 kg
Number of cars per station (approximate)	100	400	800	1,600

Source: H2Mobility, 70 MPa HRS Standardisation — Functional Description, V1.1 07-06-2010[16]

// Genehmigungssituation für H_2-Tankstelle und H_2-Erzeugung

- Für Elektrolyse: Betriebs- & Errichtungserlaubnis nach §4 BImSchG
- Für H_2-Speicher ≤ 5000 kg: Betriebs- & Errichtungserlaubnis nach §4 BImSchG
- Für H_2-Speicher > 5000 kg: Betriebs- & Errichtungserlaubnis nach StörfallV
- Für Trailer-Befüllanlage: Betriebs- & Errichtungserlaubnis nach BImSchG
- Für H_2-Liefer-Tankstelle < 3000 kg: Erlaubnisverfahren nach der Betriebssicherheitsverordnung §13 BetrSichV und Baugenehmigungsverfahren nach der Landesbauordnung
- Für H_2-Station und/oder > 3000 kg: Verfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz § 13 BImSchG, ein Baugenehmigungsverfahren nach der Landesbauordnung und Erlaubnis für die Füllanlage zur Betankung von Fahrzeugen nach §13 BetrSichV
- Für H_2-Pipeline: Bau nach GasHDrLtgV oder DVGW-Richtlinien oder RohrFernLtgV oder möglicherweise auch, wenn direkter Zusammenhang gesehen wird nach BImSchG

// Elektrolyse-Wasserstoff-Tankstelle
Beispiel: Hamburg Hafencity



// Gasbereitstellung

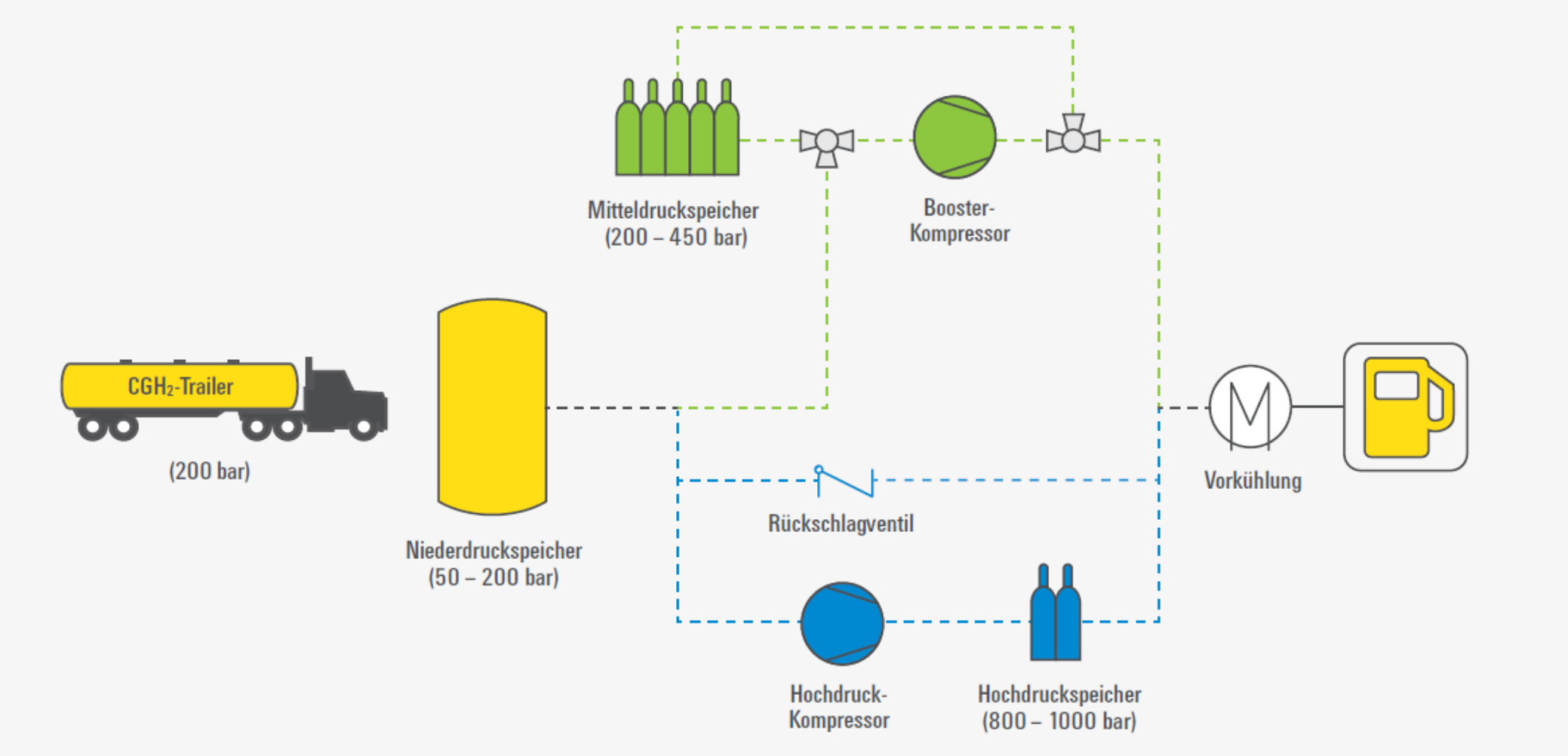
- Grundsätzliches zum Wasserstoff
- Basis der Wasserstoff-Sicherheit
- Grundlagen des Explosionsschutzes
- Wasserstoffspeichermöglichkeiten
- Wasserstoffspeicherung im Vergleich zu anderen Energieträgern
- Wasserstoffbereitstellung in versch. Formen
- Wasserstoffqualitäten und Lieferarten für Endkunden
- Wasserstoffqualität/ Druck in diesem Projekt für potenzielle Tankstellenkunden
- Energiebedarf der Wasserstoff-Bereitstellung
- Szenarien der Wasserstoff-Bereitstellung für Tankstellen
- Prinzip/ Technik der Wasserstoff-Reinigung/ Verdichtung
- Die Wasserstoff-Tankstelle
- **Prinzipien von Wasserstoff-Tankstellen**
- Tankstellenkonzeptbeispiele für den wirtschaftlichen Betrieb

// Tankstellenkonzepte

- Variante 1a/1b — Off-site H_2-Erzeugung/ Anlieferung/ Niederdruckspeicher mit/ ohne Mitteldruck-Zwischenspeicher, Vertankung
- Variante 2 — On-site H_2-Erzeugung/ Mitteldruckspeicher, direkte Vertankung
- Variante 3 — Separate H_2-Erzeugung, Niederdruckspeicher, Mitteldruck-Zwischenspeicherung, Tankstelle
- Variante 4 — Separate H_2-Erzeugung, Niederdruckspeicher, Trailer-Anbindung Mitteldruck-Zwischenspeicherung, Tankstelle

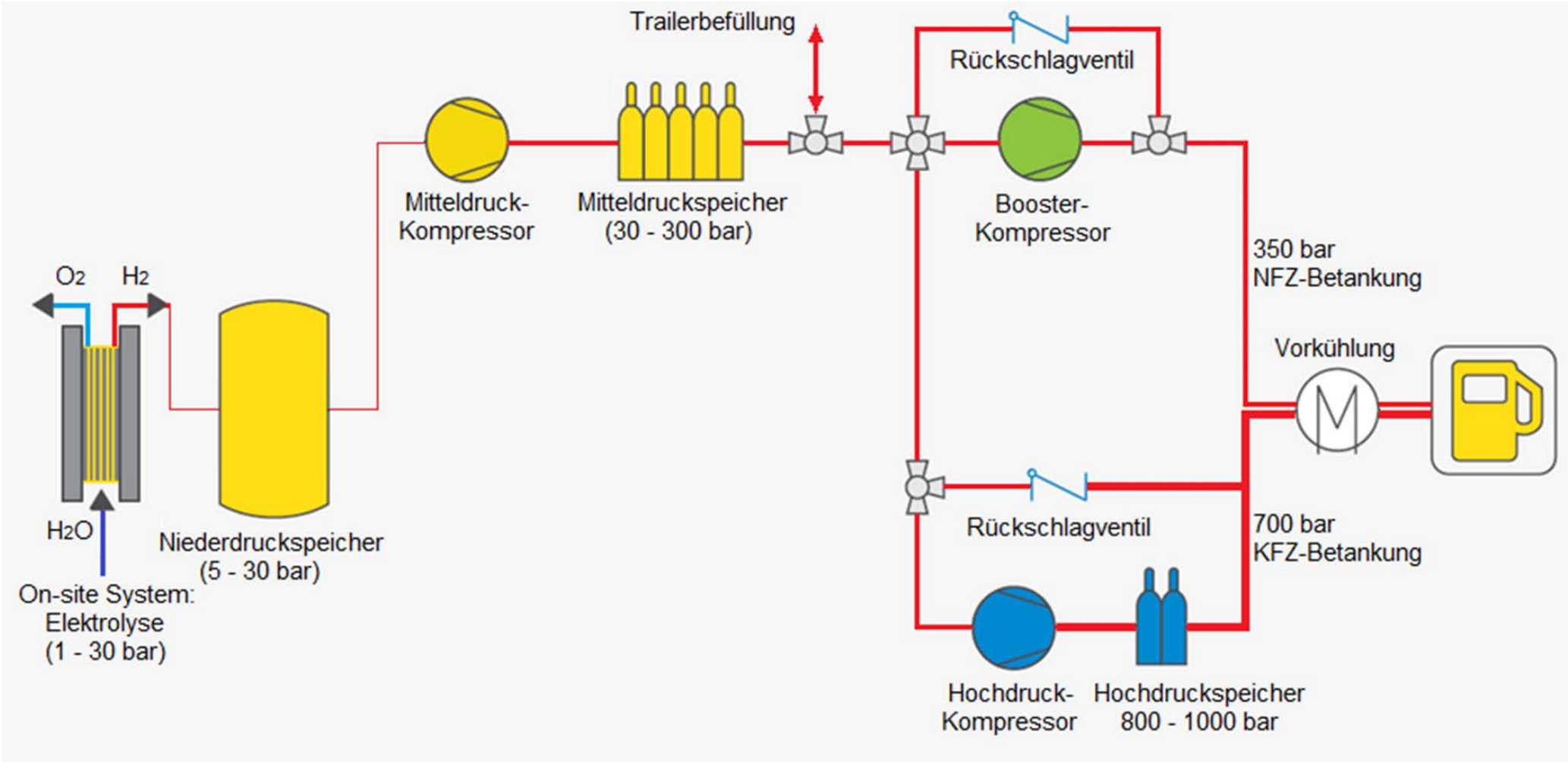
Nach Quelle: 2013_e-mobil_Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität - final_WEB.pdf

// Tankstellenkonzepte
Off-site H_2-Erzeugung, Zwischenspeicherung



Nach Quelle: 2013_e-mobil_Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität - final_WEB.pdf

// Tankstellenkonzepte
Separate H_2-Erzeugung, Mitteldruck-Speicherung, Tankstelle

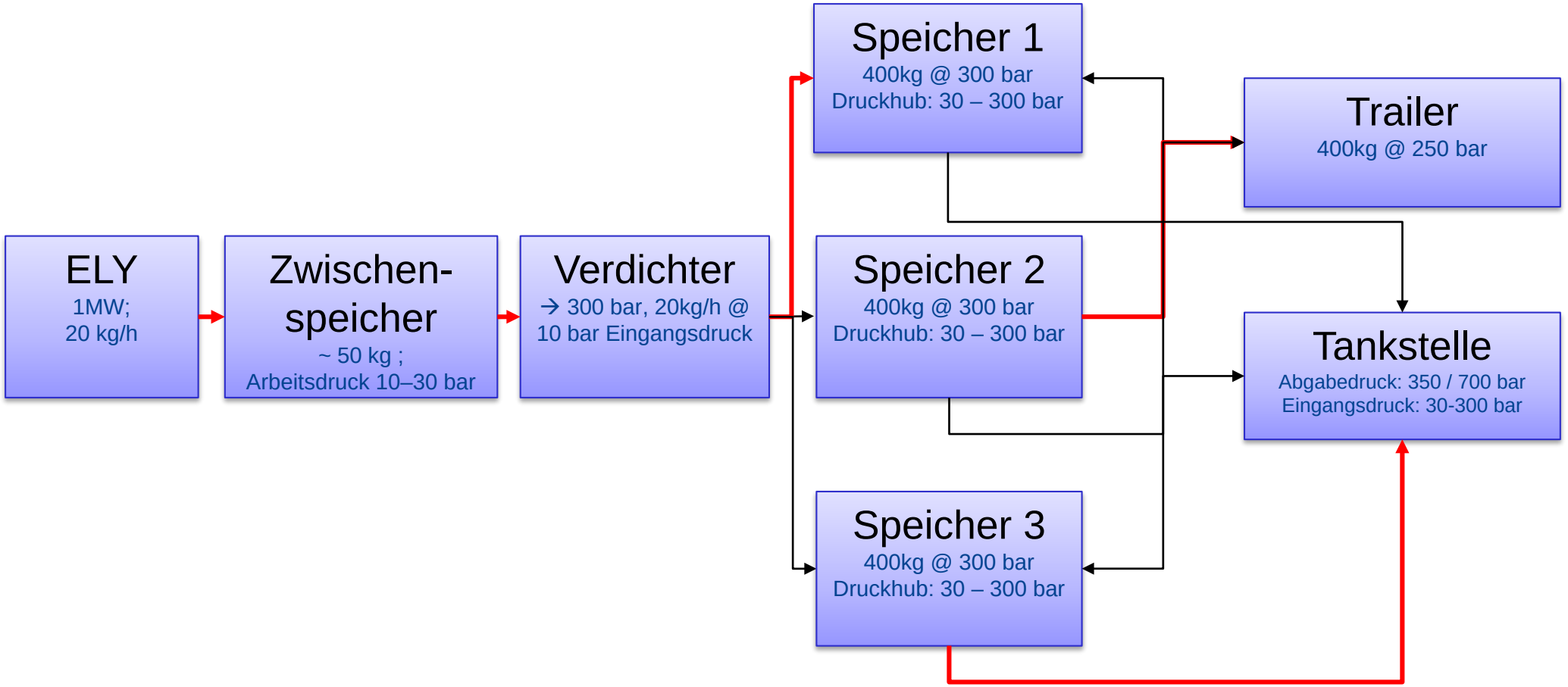


Nach Quelle: 2013_e-mobil_Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität - final_WEB.pdf

// Gasbereitstellung

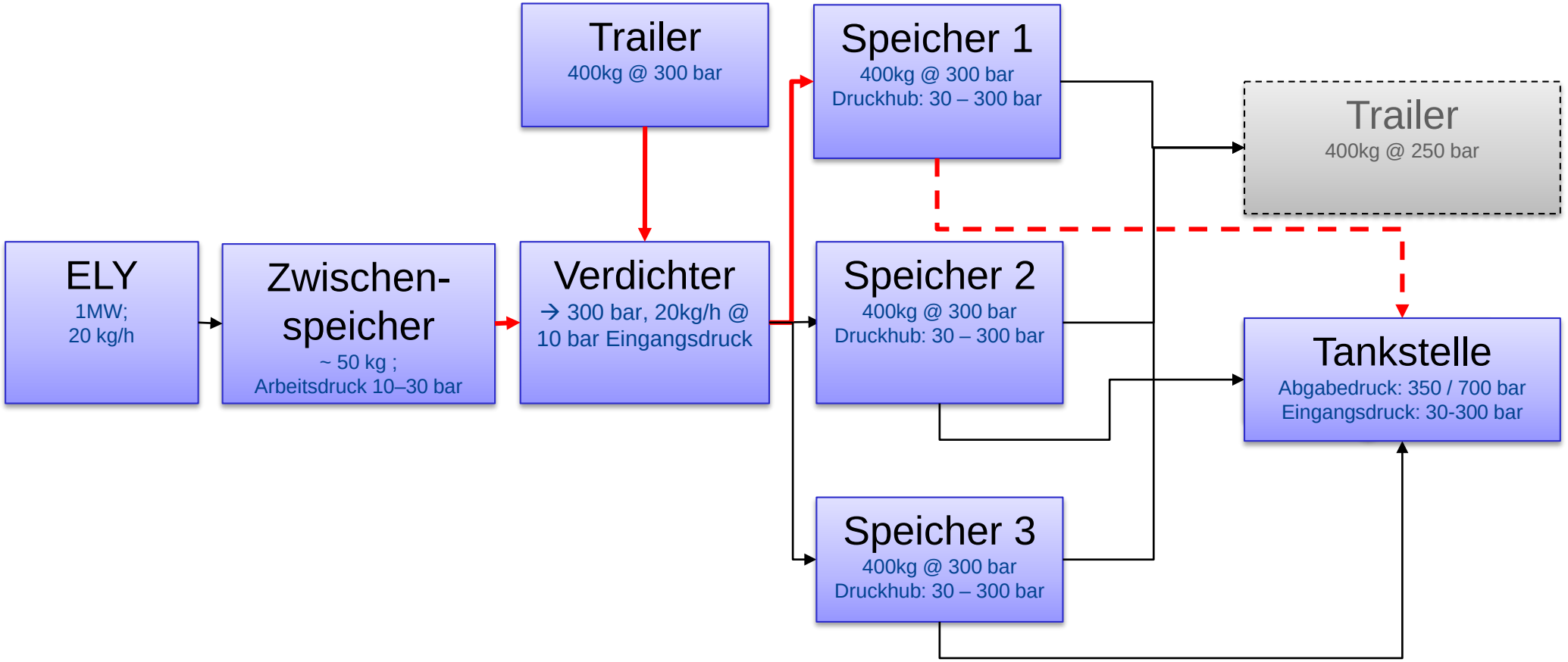
- Grundsätzliches zum Wasserstoff
- Basis der Wasserstoff-Sicherheit
- Grundlagen des Explosionsschutzes
- Wasserstoffspeichermöglichkeiten
- Wasserstoffspeicherung im Vergleich zu anderen Energieträgern
- Wasserstoffbereitstellung in versch. Formen
- Wasserstoffqualitäten und Lieferarten für Endkunden
- Wasserstoffqualität/ Druck in diesem Projekt für potenzielle Tankstellenkunden
- Energiebedarf der Wasserstoff-Bereitstellung
- Szenarien der Wasserstoff-Bereitstellung für Tankstellen
- Prinzip/ Technik der Wasserstoff-Reinigung/ Verdichtung
- Die Wasserstoff-Tankstelle
- Prinzipien von Wasserstoff-Tankstellen
- **Tankstellenkonzeptbeispiele für den wirtschaftlichen Betrieb**

// 1 MW Elektrolyse
Blockschaltbild Speicherkonzept, Variante 1



- Entkopplung Erzeugung / Vertankung
- Gleichzeitige Trailer-Abfüllung und Betankung möglich

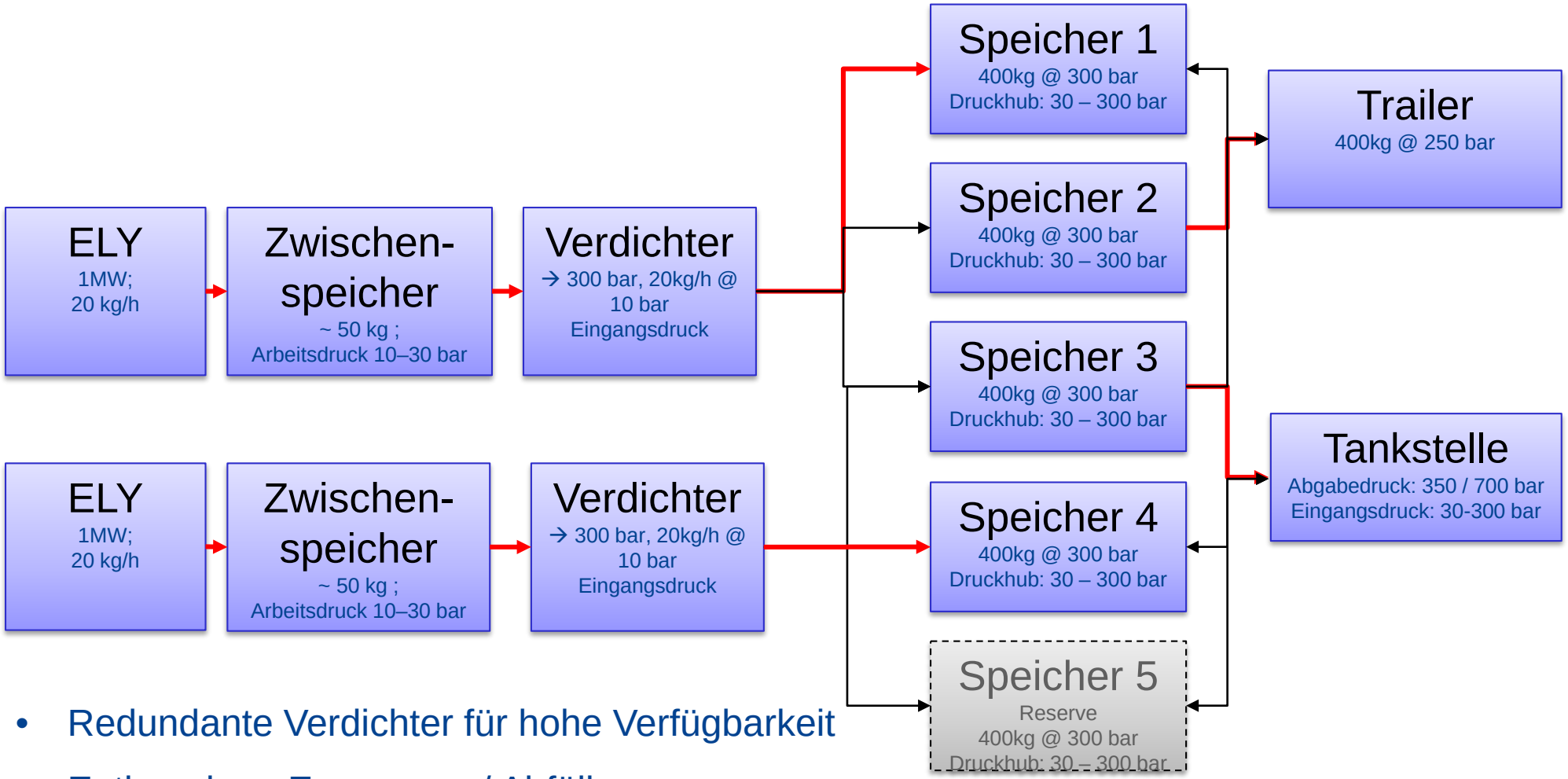
// 1 MW Elektrolysesystem
Blockschaltbild Speicherkonzept, Variante 2



H_2-Traileranlieferung in MD Speicher

- + Vollständige Beladung HD Speicher über bestehende Prozesskette möglich
- - lange Standzeit des Trailers

// 2 MW Elektrolysesystem
Blockschaltbild Speicherkonzept

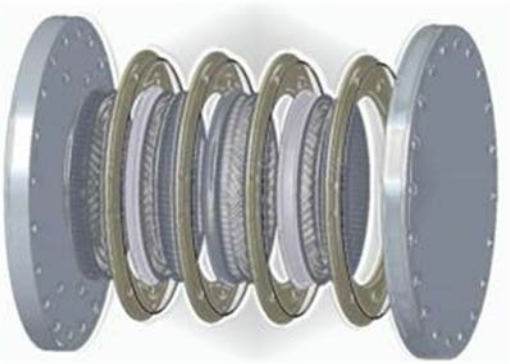


- Redundante Verdichter für hohe Verfügbarkeit
- Entkopplung Erzeugung / Abfüllung
- Trailer-Anlieferung über Zwischenspeicher als Variante möglich

// Fazit

- Wasserstoffmarkt-Entwicklung ist kein Problem, weil großer Anfangsmarkt vorhanden, ***„nur“ eine Angleichung von Herstellkosten/ Marktpreise ist noch notwendig.***
- Wasserstoff-Sicherheit / Erlaubniswesen ist weit entwickelt und verfügbar.
- Konzept/ Bau und Betrieb von Anlagen ist kein Hexenwerk.
- Speicherung und Transport muss genau auf die Kunden zugeschnitten werden, Achtung Kostenfalle!
- Mit sehr überschaubarem apparativem Aufwand kann man viele Wasserstoff-Qualitäten bereitstellen.
- Es gibt eine große Menge gefragter Wasserstoff-Qualitäten mit stark unterschiedlicher Nachfrage und enormer Preisspanne.
- Der Fahrzeug-Nachfragemarkt ist nur wenig entwickelt, eine Tankstellennetz ist im Werden aber die Variationsvielfalt von Herstell-/ Vertankungs-Konzepten ist noch riesig.
- Der Markt ist noch nicht entwickelt aber auch noch nicht aufgeteilt.

// VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT!



Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND WOHNUNGSBAU

Hahn Schickard

DLR

DITF
DEUTSCHE INSTITUTE FÜR TEXTIL+FASERFORSCHUNG

innBW INNOVATIONSALLIANZ BADEN-WÜRTTEMBERG

ZSW