

# Wasserstoff – Der Energiespeicher für die Energiewende?

Dr.-Ing. Thomas Jordan

kinetalk Vortragsreihe im WS 2019/20, KIT Campus Süd, 3.12.2019

Institut für Kern- und Energietechnik

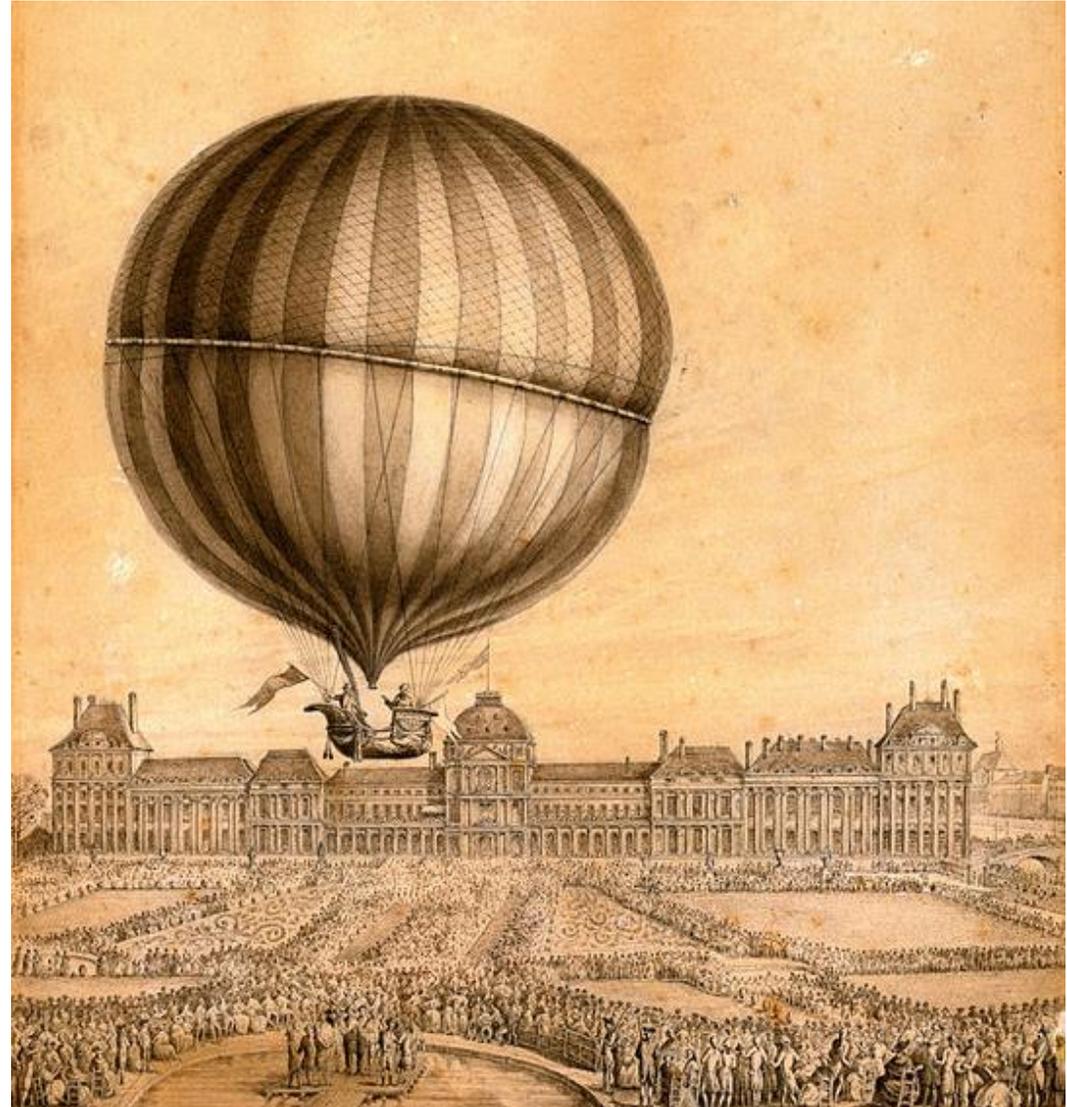


# Einleitung

## Historie

# Wasserstoff als Traggas

Der Flug der „Chalier“  
mit Jacques Charles und  
Marie-Noël Robert  
von den Tuileries in Paris  
1. Dezember 1783  
Quelle: Wikimedia Commons



## Historie - Entdeckungen



1766 Entdeckung der „inflammable air“  
durch Lord Cavendish

1785 Namensgebung „hydrogene“  
durch Lavoisier

1800 1. Elektrolyse durch Ritter

1839 1. Brennstoffzelle durch Sir Grove

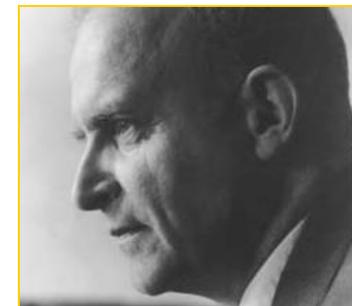
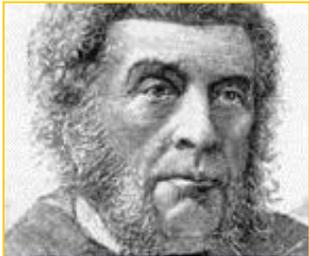
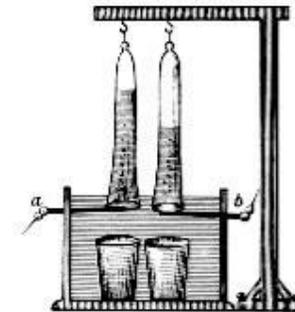
1898 1. Verflüssigung durch Dewar

1901 Druckspeicherung in Stahlflaschen

1929 Produktion of para-Bonhoeffer

1931 Detection of Deuterium by Urey

1935 Sythesis of Tritium by Rutherford



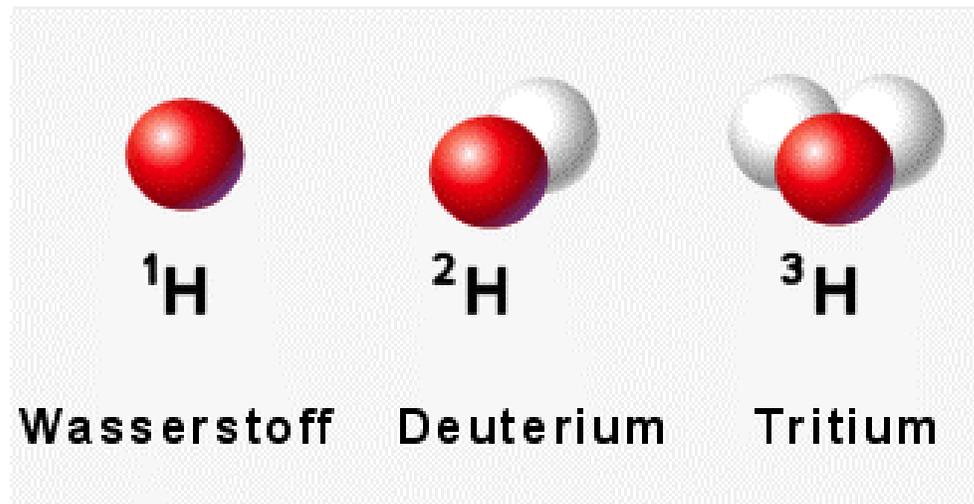
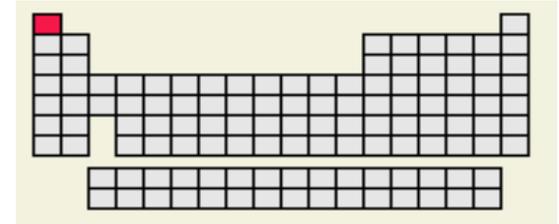
## Historie - Technologien



- 1940 Entdeckung H<sub>2</sub> Produktion mittels grüner Algen
- 1956 LH<sub>2</sub> betriebenes Flugzeug Prototyp B57
- 1959 Erste FC Anwendung von Bacon
- 1960 Erstes H<sub>2</sub> FC Kfz und Motorrad von Kordesch
- 1963 AFC für Gemini Mission von NASA
- 1965 H<sub>2</sub> angetriebenes Boot „eta“ von Siemens
- 1980 H<sub>2</sub> Energievision (DESERTEC Vorläufer) von Dahlberg
- 1989 100kW FC für U-Boot U1 von Siemens
- 1991 Solar H<sub>2</sub> Projekt Neuenburg vom Wald
- 1994 Erste H<sub>2</sub> Busse in Belgien
- 1997 PEMFC angetriebene Gabelstapler
- 2000 Cryoplane Projekt und BMW LH<sub>2</sub>-ICE 7er Flotte
- 2013 *Start des KIT H<sub>2</sub> Shuttle Service*

# Allgemeines

- Atomarer Wasserstoff H
- Einfachstes chemisches Element
- Ordnungszahl 1 (1. Gruppe, 1. Periode)
- 3 Isotope:
  - Protium  $^1\text{H}$
  - Deuterium  $^2\text{H}$
  - Tritium  $^3\text{H}$   
(Beta-Strahler,  
12,3 Jahre  
Halbwertszeit)



## Physikalische Eigenschaften (unter Standardbedingungen)

- Leichtester Stoff bzw. Gas  
(zweiatomig = Dimer)
- hoch diffusiv
- brennbar
- farblos
- geruchs- und geschmacklos
- ungiftig
- nicht-korrosiv
- nicht-metallisch



## Der Tagesspiegel - gedruckte Ausgabe

---

(20.09.2006)

**DIE PERSPEKTIVEN: Wie der Katastrophe zu begegnen ist  
Wasserstoff kann den Planeten retten**

**Die Menschheit steht jetzt am Scheideweg zu ihrer eigenen evolutionären  
Zukunft**

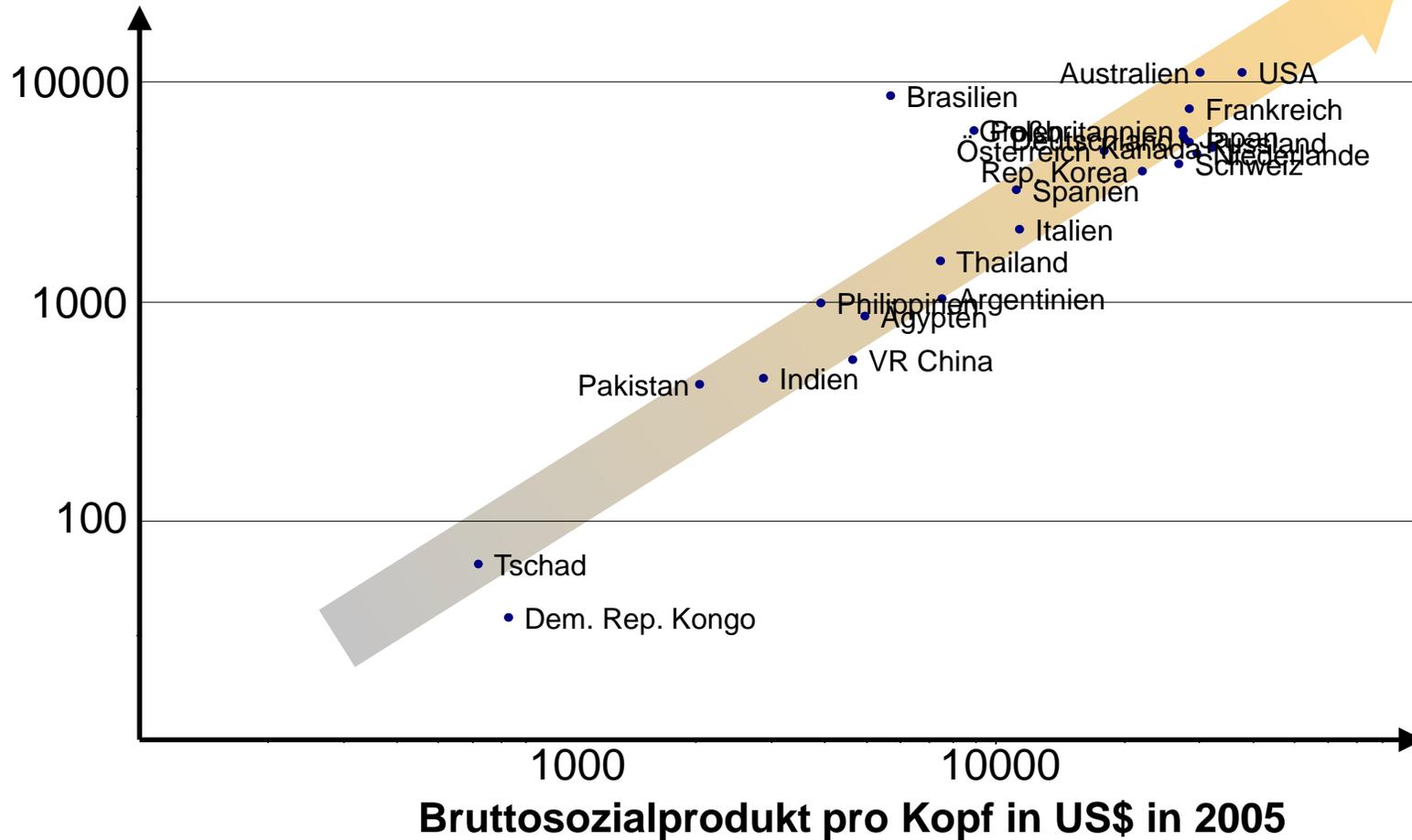
*Von Jeremy Rifkin*

Im langen Lauf der Evolutionsgeschichte wird jede Spezies auf der Erde mit einschneidenden Momenten konfrontiert, in denen sie sich entweder weiterentwickeln muss, um sich Umweltveränderungen anzupassen, die ihren Fortbestand gefährden, oder aber mit der Perspektive auf Aussterben konfrontiert

...

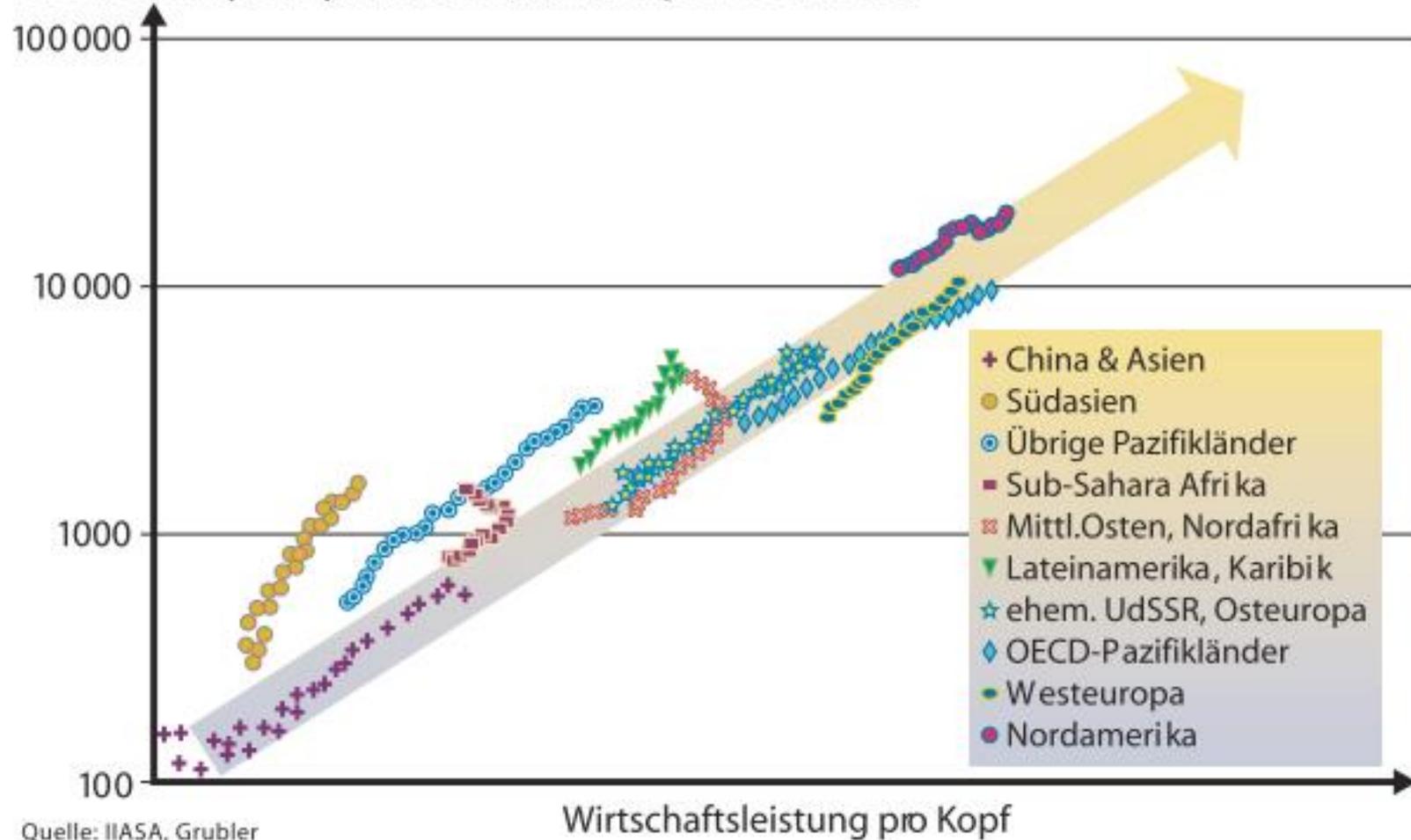
# Energie ~ Wohlstand

Energieverbrauch pro Kopf in kg SKE in 2005

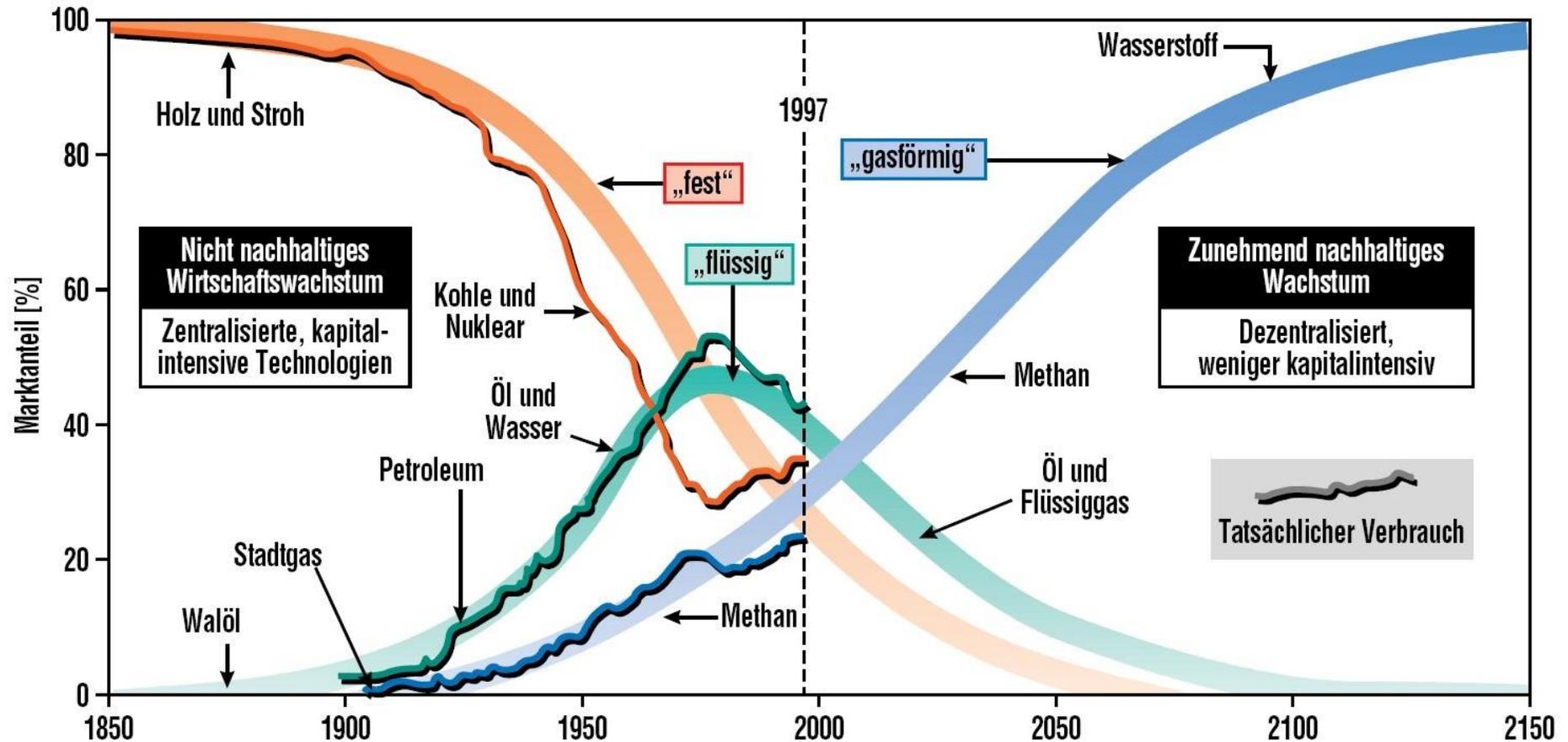


# Mobilität ~ Wohlstand

Personen-km pro Kopf und Jahr (Entwicklung von 1960 bis 1990)



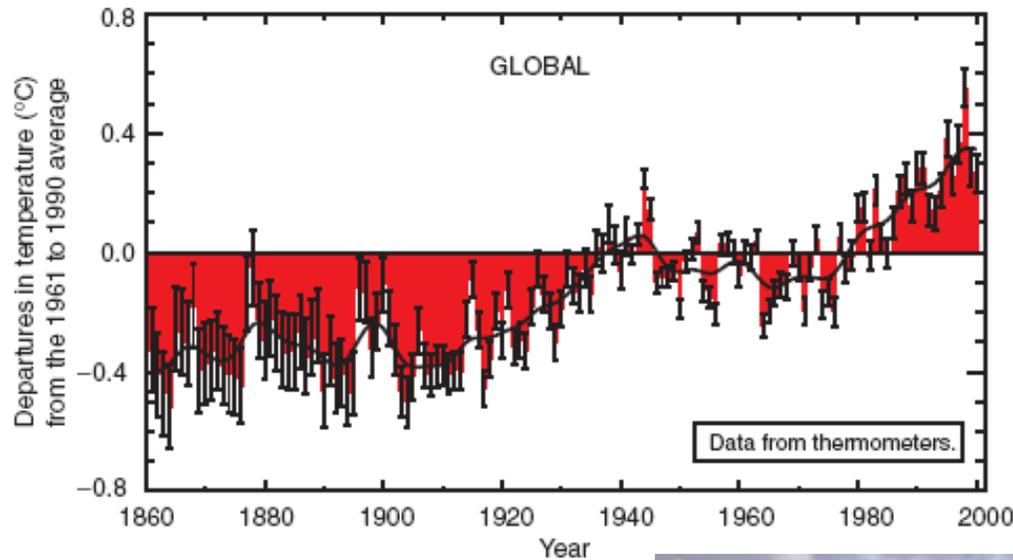
# Energieträger im Wandel



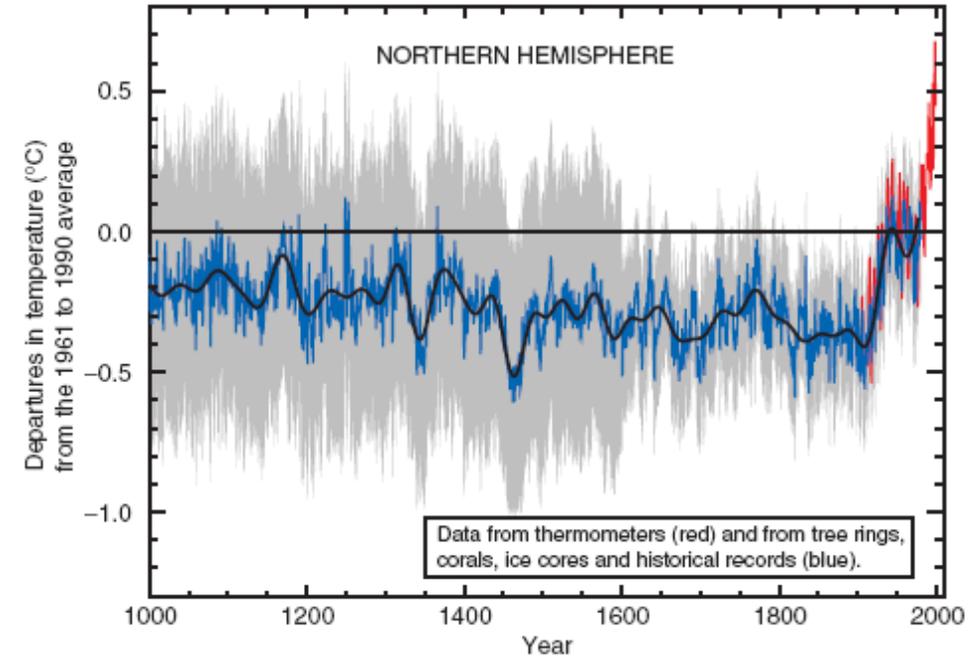
# Ökologie

## Erderwärmung

(a) the past 140 years



(b) the past 1,000 years



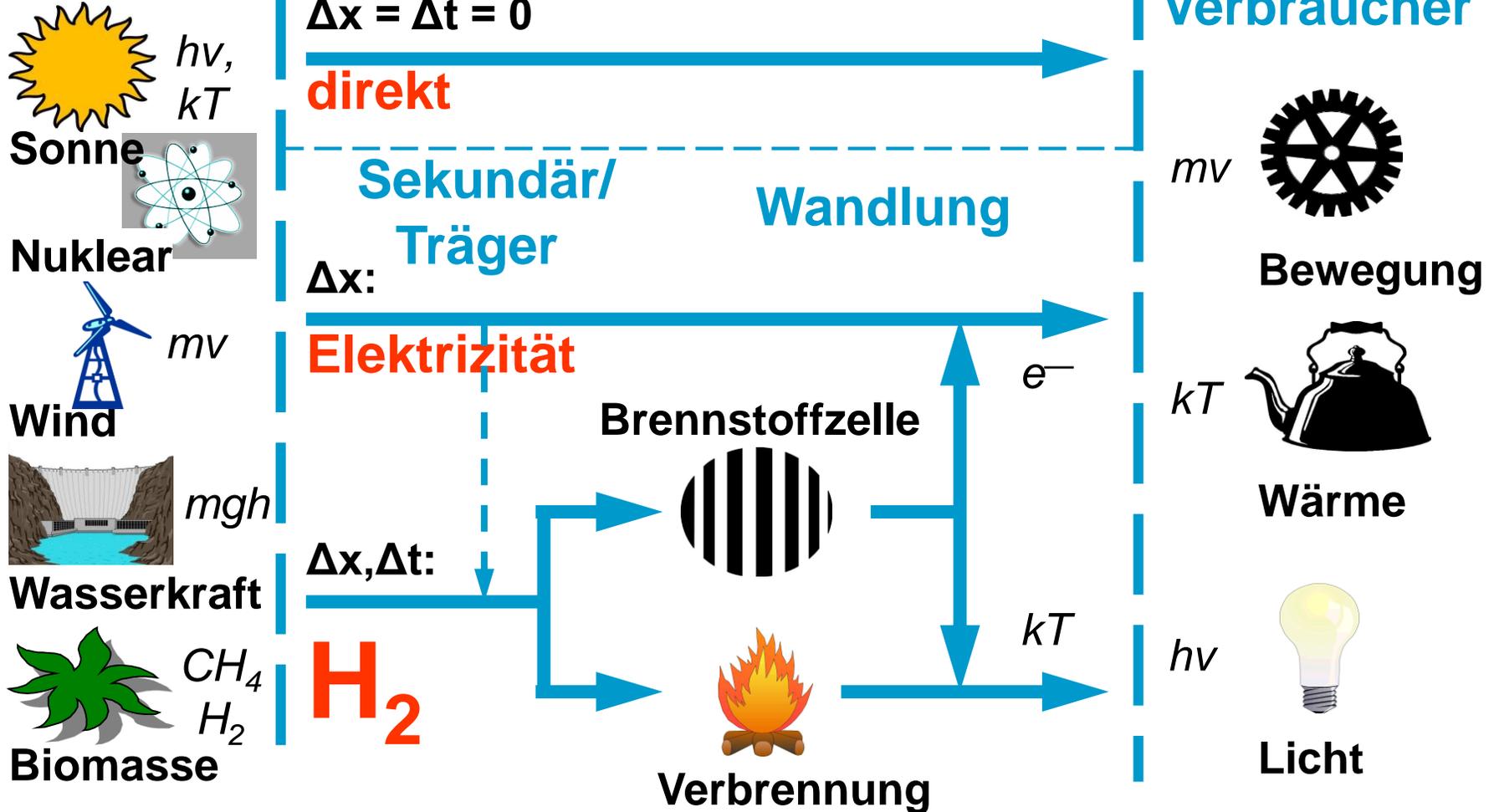
## Verbrauch der Vorräte



# Energiequellen, -ströme, -träger und -speicher

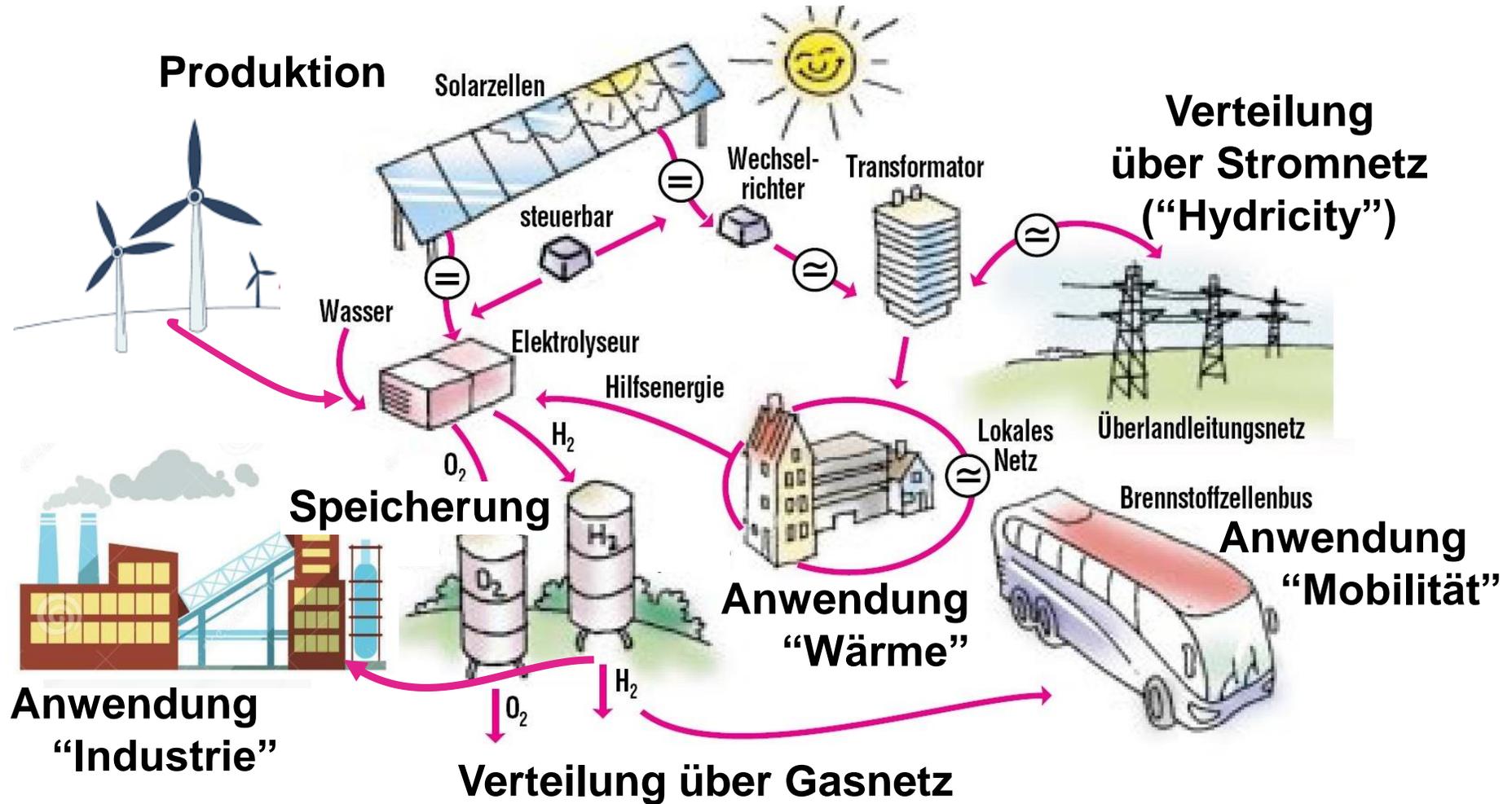
## Primär / Quellen

## Verbraucher

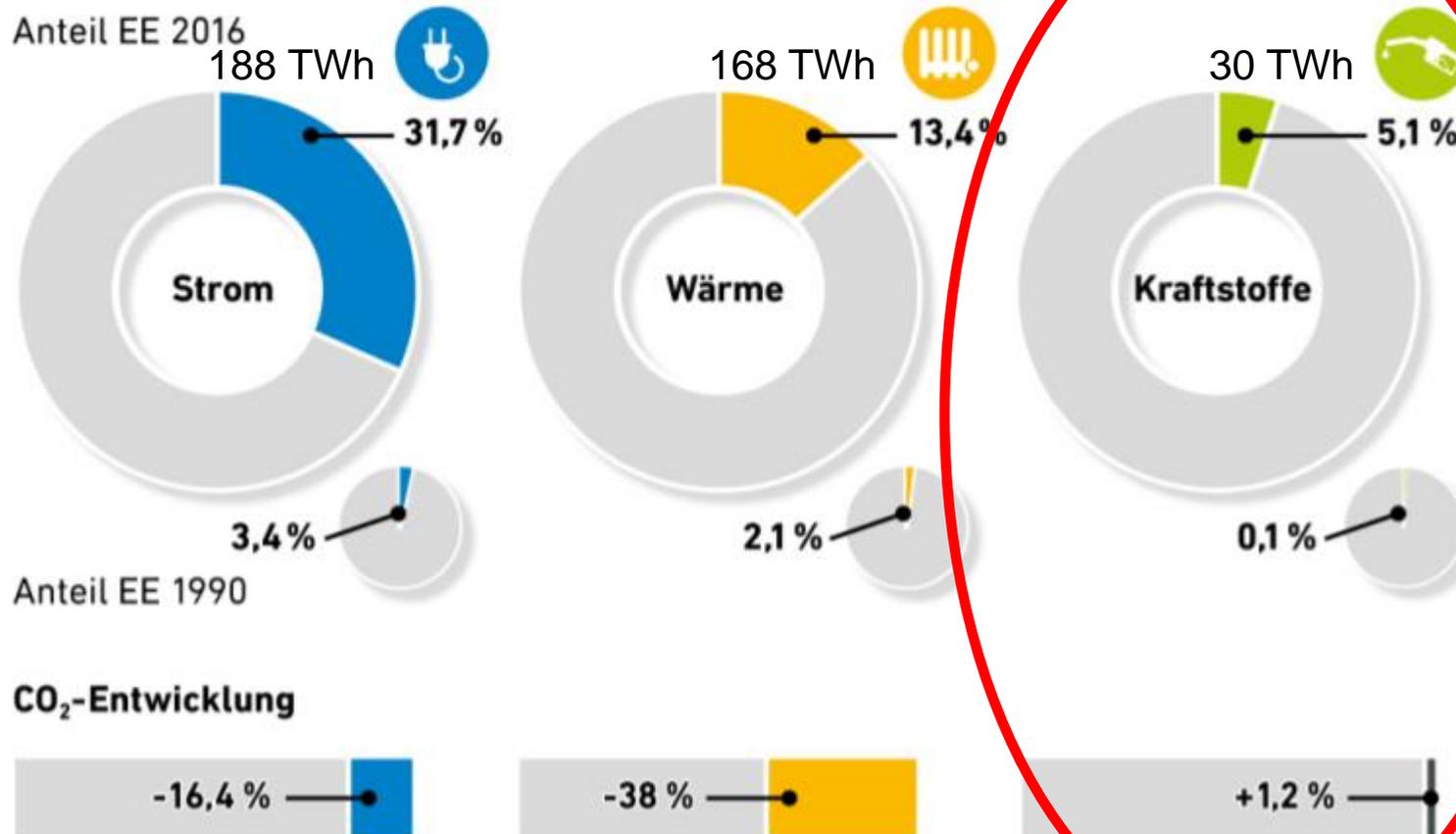


# Wasserstoffwirtschaft

# Elemente einer Wasserstoffwirtschaft

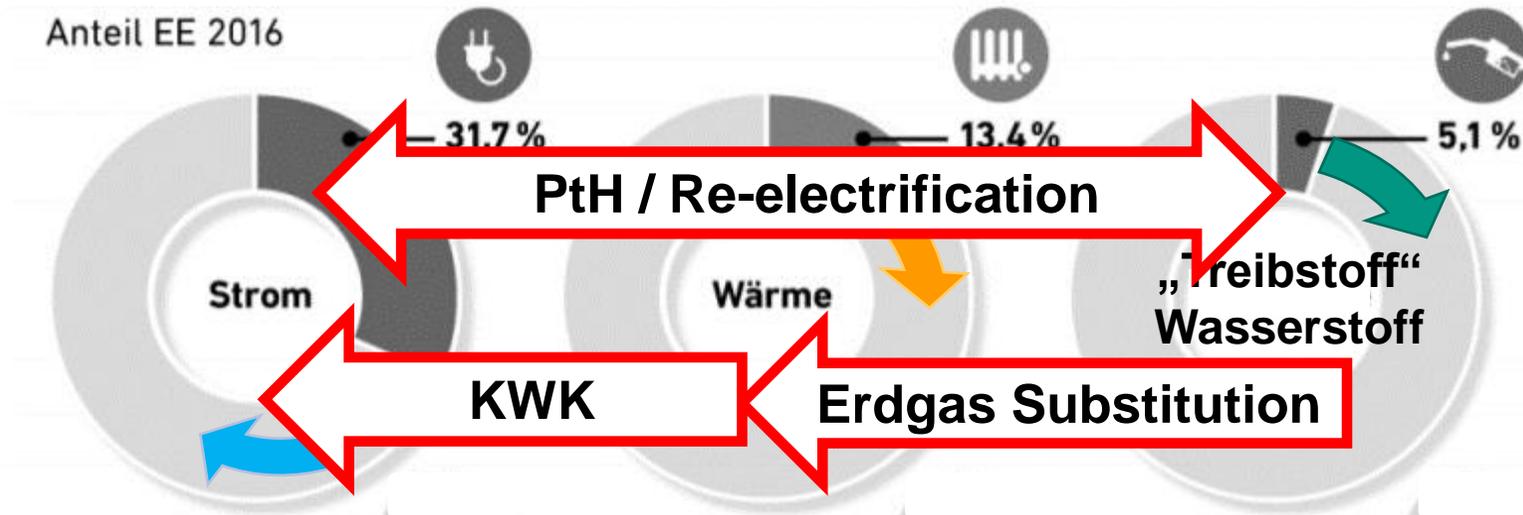


# Erneuerbare Energie in den Sektoren



Quelle: BMWi, UBA, Zukunft Erdgas 10/2017

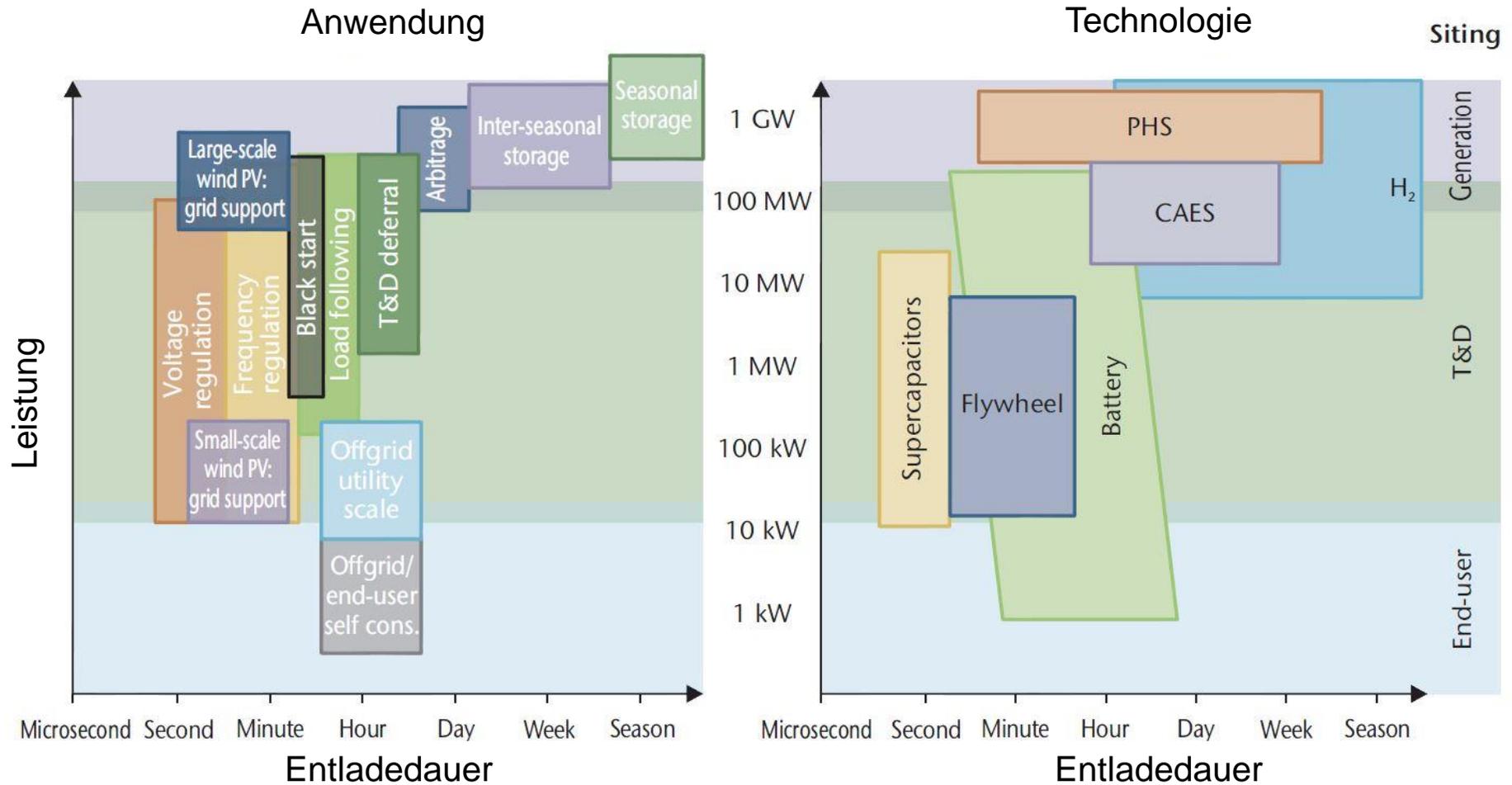
# Sektorenkopplung mit Wasserstoff zur flexiblen Integration von EE in allen Bedarfssystemen



Spezifische Vorteile von Wasserstoff:

- Echte, tiefe **Dekarbonisierung**
- potentiell hohe Konversions-**Effizienzen**
- **Dezentralisierung** durch Integration von kleinen verteilten Erzeugern/Verbrauchern („Prosumer“)
- Ersetzen von konventionell erzeugtem Wasserstoff in industriellen Anwendungen
- **saisonale Speicherung** von EE

# Wasserstoff als Energiespeicher



Note: CAES = compressed air energy storage; PHS = pumped hydro energy storage.

Quelle: IEA 2015

# Wasserstoff als Treibstoff - Fahrzeugspeicher

## Gewicht und Volumen von Energiespeichern für 500 km Reichweite

### Diesel

System  
Kraftstoff



43 kg  
33 kg



46 L  
37 L

### Druckwasserstoff 700 bar

6 kg H<sub>2</sub> = 200 kWh chem. Energie

System  
Kraftstoff



125 kg  
6 kg



260 L  
170 L

### Lithium-Ionen-Batterie

100 kWh elektrische Energie

System  
Zellen



830 kg  
540 kg

670 L  
360 L

Quelle: Opel GM

# „Betankung“ von Elektrofahrzeugen



x 50-500



	Batterie- elektrischer Pkw BEV	H2- Brennstoffzellen- Pkw FCEV
Standard	SAE J1772	SAE J2601
Energie	30 kWh	150 kWh
Dauer	5 h (45 min)	3 min
Leistung	6 kW (40 kW)	<b>3000 kW</b>
Reichweite	160 km	<b>500 km</b>



**Skalierung auf  
Autobahn-  
tankstelle?**

Quelle: US DoE



# KIT Shuttle Erfahrungen – Linie 39

Baden-Württemberg  
MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

- Linienbetrieb von 2 FC Hybrid Citaro City Bussen seit 06/2013
- > 200.000 Fahrgäste
- > 20 t H<sub>2</sub> betankt
- Laufleistung beider Busse zusammen ca. 200.000 km
- Verbrauch 7,8 kg / 100 km (ca. 30% effizienter als vergleichbare Dieselbusse)
- Reichweite > 350 km inklusive aller Komfortfunktionen
- Betriebsstunden > 10.000 h je Stack ohne wesentlichen Leistungsabfall

~ 200 t CO<sub>2</sub>  
Emissionen  
vermieden



Sponsoren: 



# „Mobilität allgemeiner und integriert“

Expertenkommission zum Monitoring-Prozess  
„Energie der Zukunft“, A. Löschel



# Stationäre Anwendungen

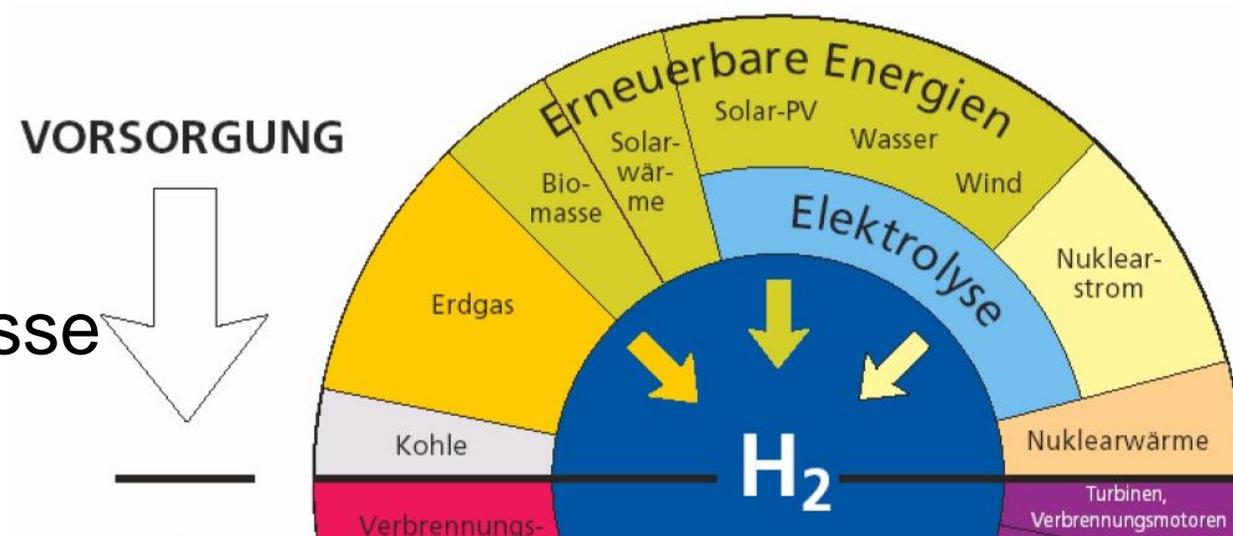


# Wasserstoff-Produktion

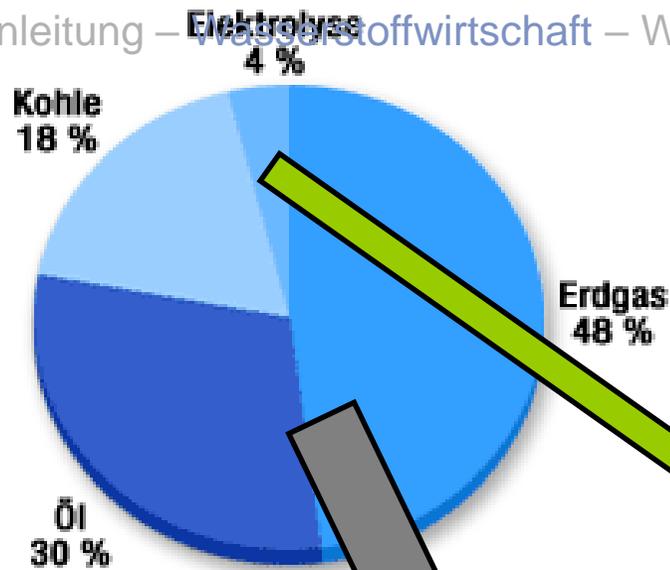
# Produktion

## Wasserstoff

- ist universell herstellbar,
- -Produktionsprozesse sind ausgereift,
- vermindert die Abhängigkeit von ungleich verteilten Energiequellen (z.B. Öl) und
- erhöht die Versorgungssicherheit (Flexibilisierung, Sektorenkopplung)

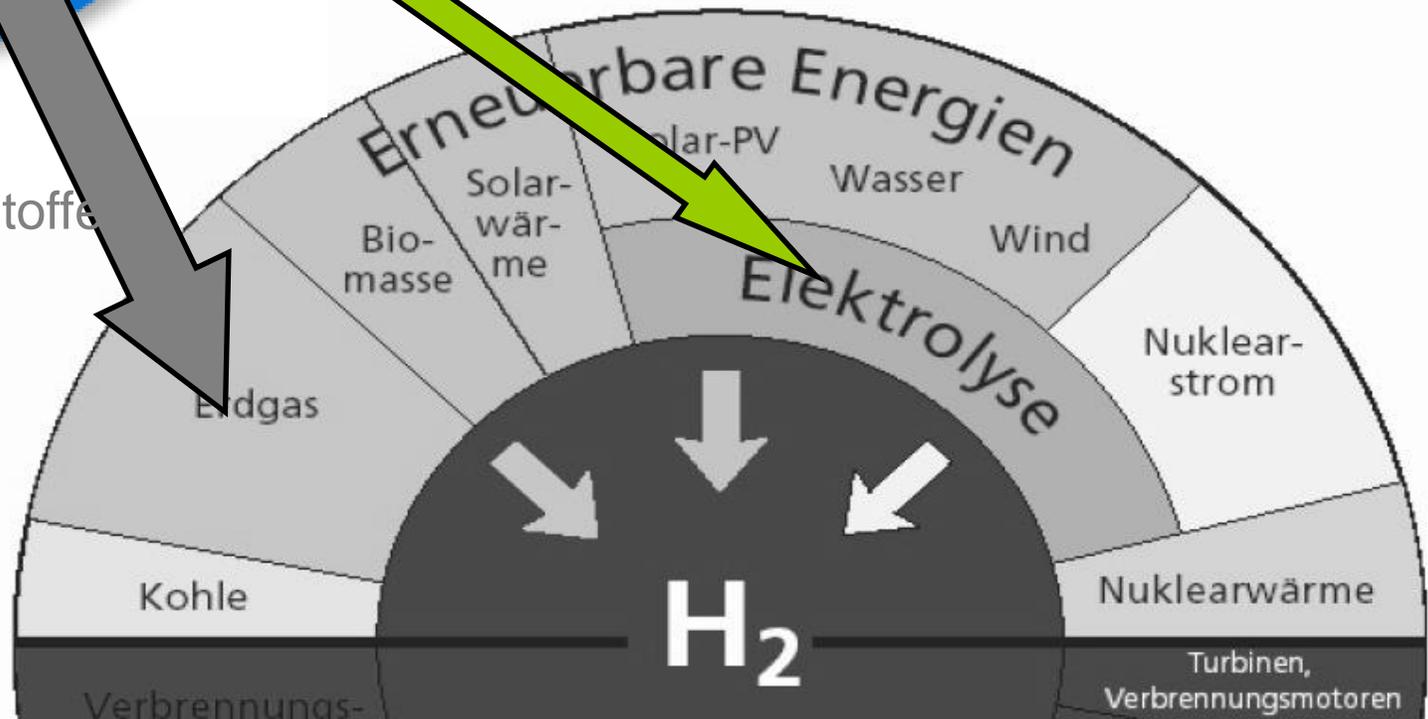


# Gegenwärtige Produktionspfade

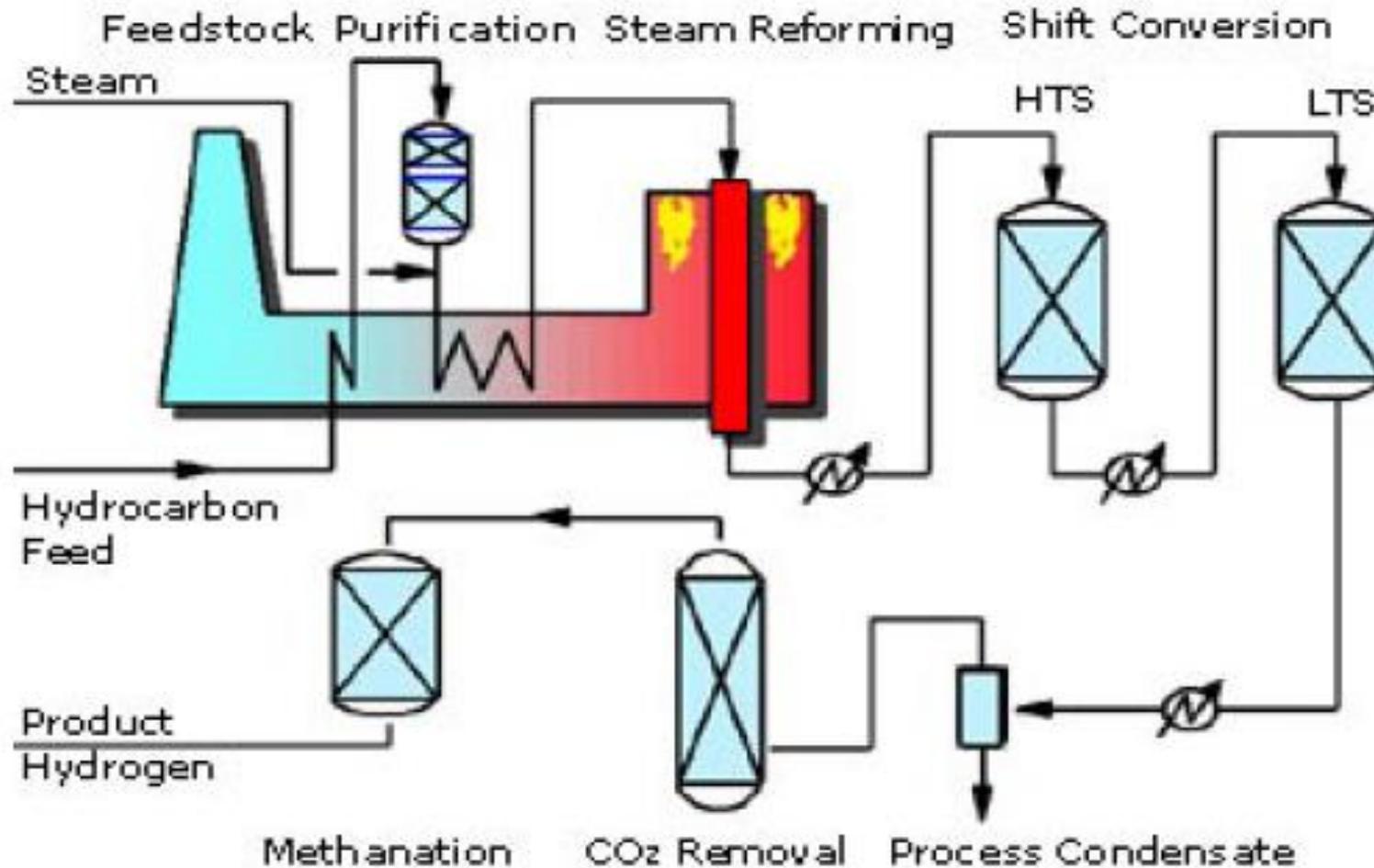


Aus Wasser  
 $H_2O \rightarrow$   
...lyse

Aus Kohlenwasserstoffen  
 $C_xH_y \rightarrow$   
Reformierung



# Methan-Dampfreformierung SMR



# (Grosse Alkali-)Elektrolyseure



Norsk Hydro Elektrolyseur; ca. 485  
Nm<sup>3</sup>/h ~ 2MWe;  
Platzbedarf 4x13m<sup>2</sup>

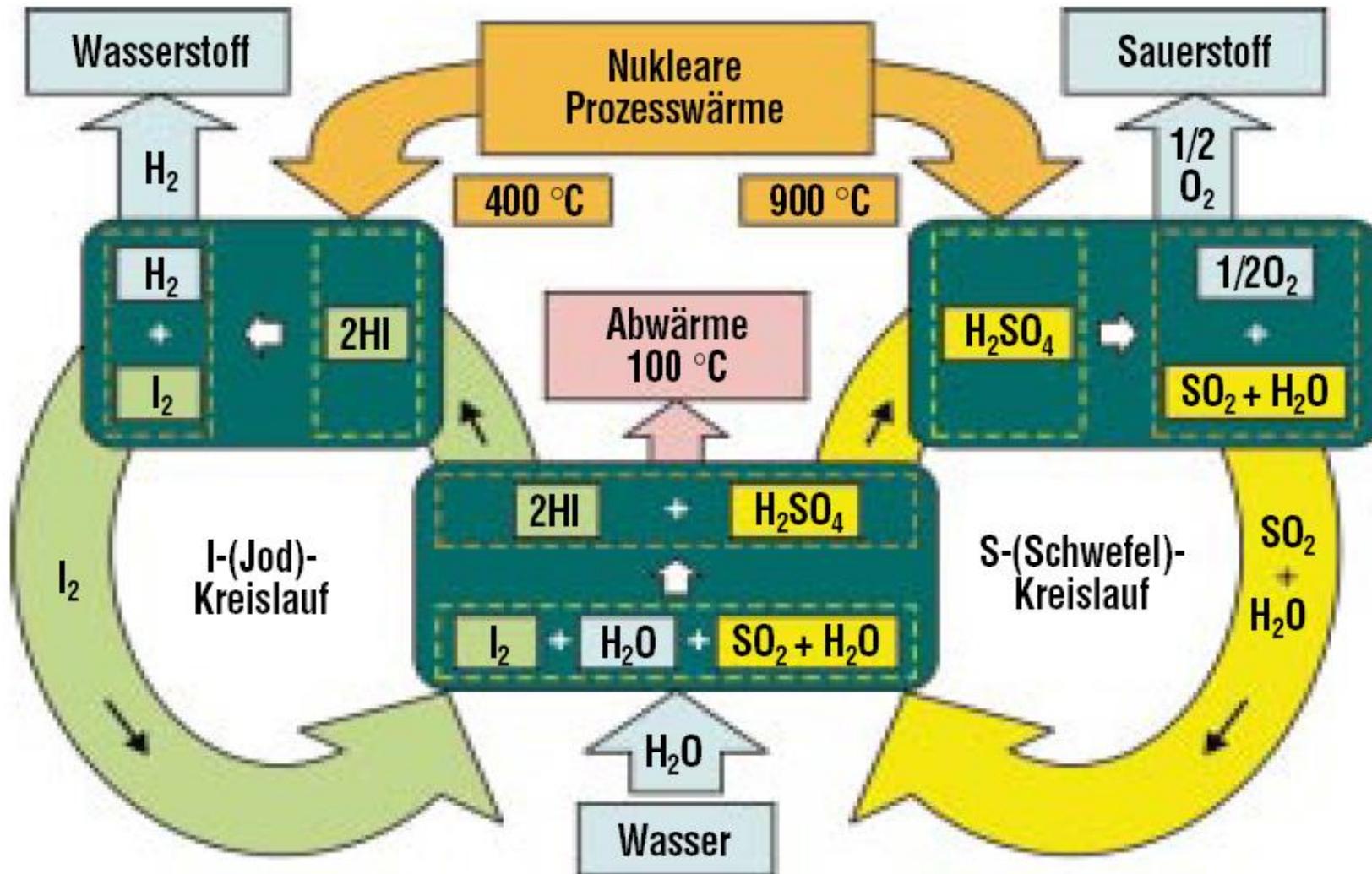


ELT atmosphärischer Elektrolyseur  
330m<sup>3</sup>/h ([www.elektrolyse.de](http://www.elektrolyse.de))

# Elektrolyseur-Technologien

Typ	Alkali	PEM	Solid Oxide
	<i>Entwicklung</i>		
Electrolyt	Säure/Lauge (z.B. KOH)	Feste Polymermembran (z.B. Nafion)	Dotiertes Zirkon/Keramik
Betrieb	Bevorzugt Nennbetrieb kann jedoch bis um 20% reduziert werden	Dynamische Anpassung möglich	T=800-1000°C
+	Kosten, Wirkungsgrad	Keine korrosiven Flüssigkeiten, hohe Stromdichten, Kompakt, Hochdruck möglich	Hochtemperaturanwendung, Wirkungsgrad
-	Niedrige Stromdichten, Wartungsaufwand, Verdichtung	Teuer, Nur kleiner Leistungsbereich	Materialprobleme

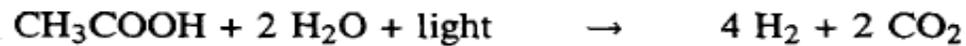
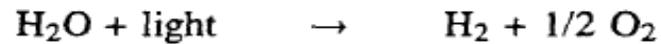
# Exot: Jod-Schwefel-Prozess



# Exot: Photobiologische Prozesse

- a) release of hydrogen from photolytical decomposition of water
- b) extraction of hydrogen stored in biomass which serves as nutrition for the micro-organisms

Photosynthesis reactions are:



Mikroalgen-Reaktor  
Posten, KIT CS

# Wasserstoff-Speicherung

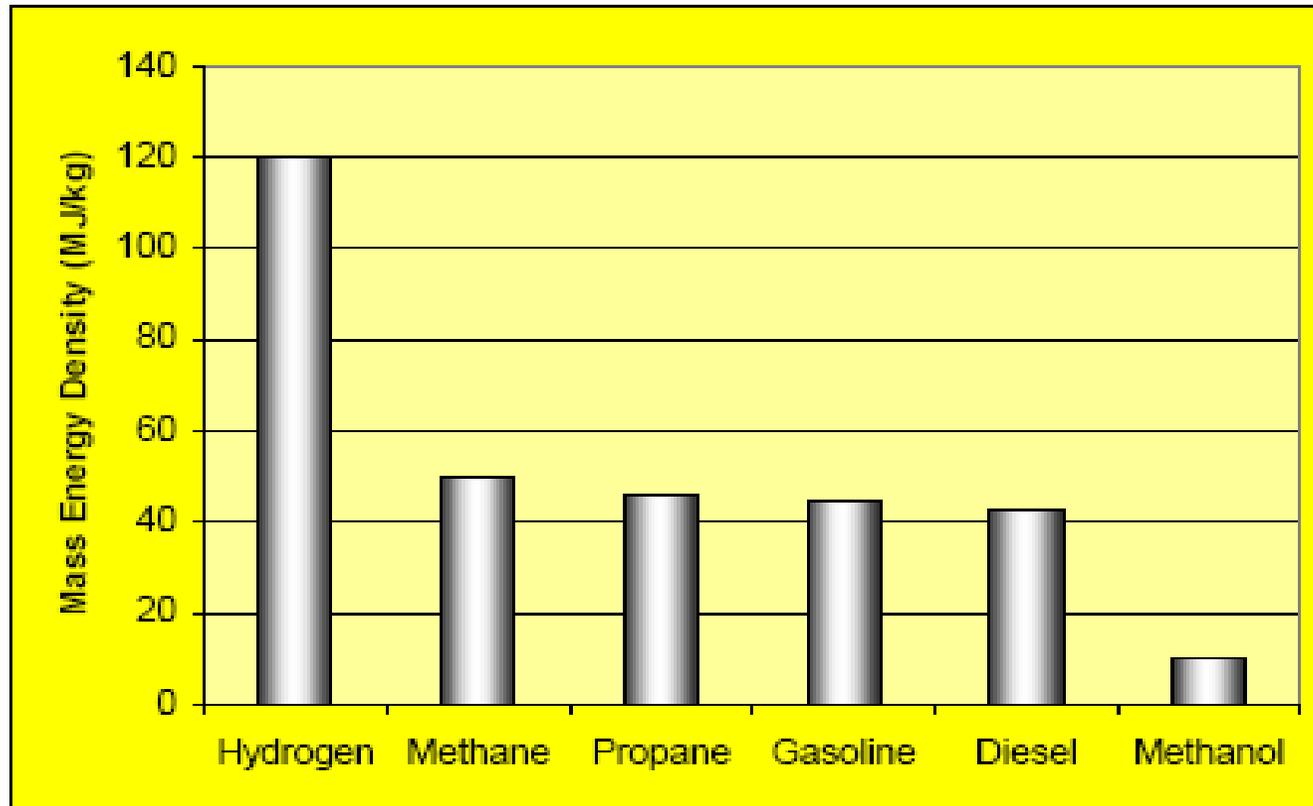
# Speicherung

## Wasserstoff

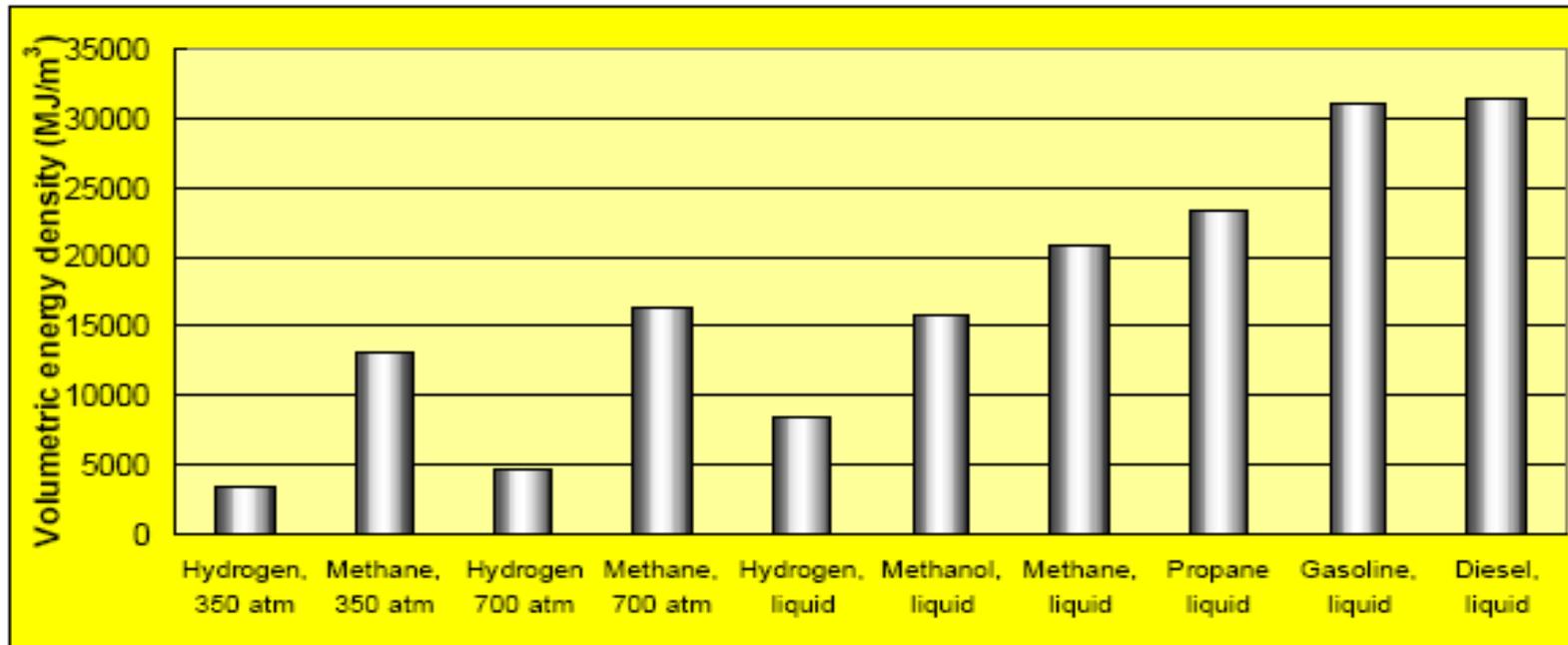
- kann komprimiert, kalt verflüssigt oder in Festkörpern gespeichert werden,
- ist ein Energiespeicher → fördert die Nutzung von regenerativen Energieströmen und macht den Energiemarkt flexibel
- hoher massenspezifischer aber **kleiner volumenspezifischer Energieinhalt**  
(Speicherung für Autos = große Herausforderung)



## Gravimetrische Speicherdichte



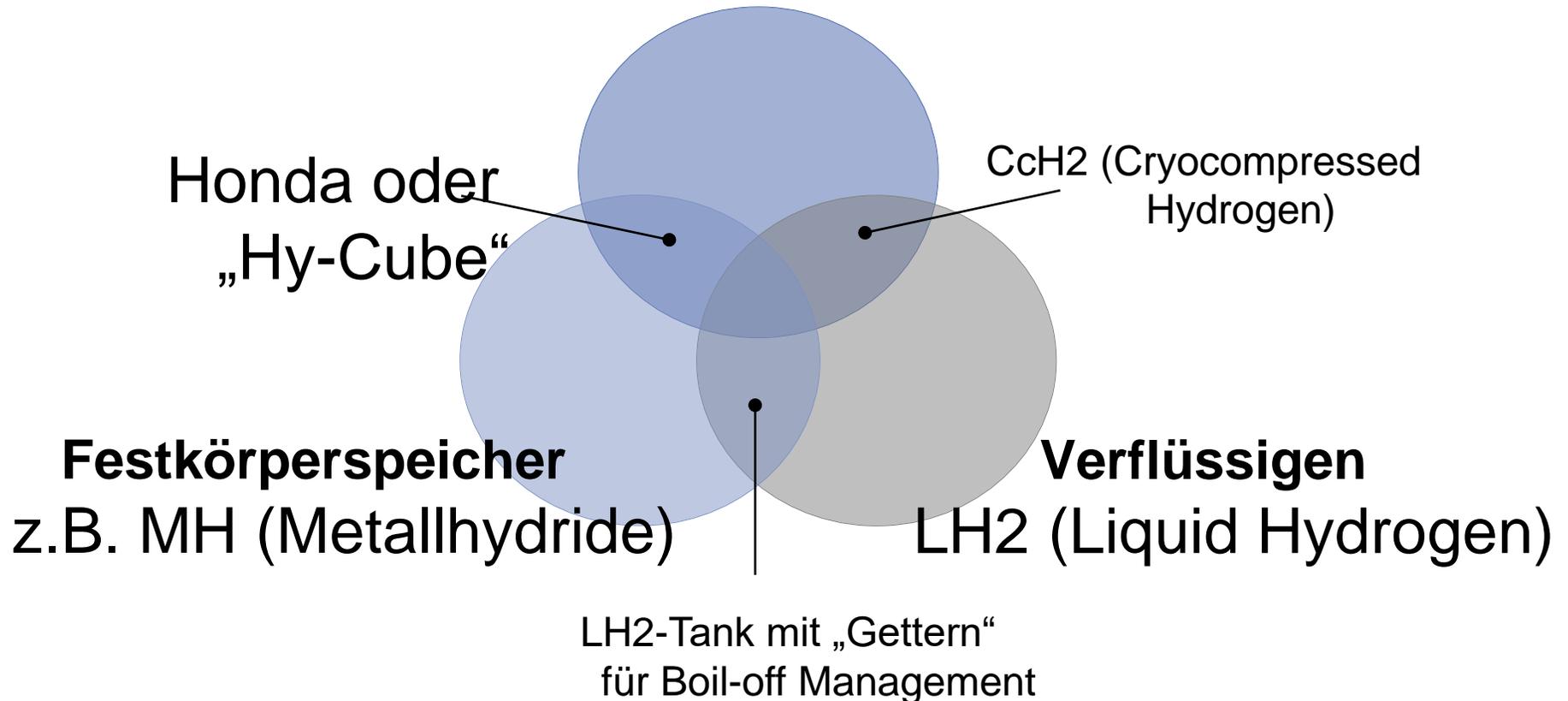
## Volumetrische Speicherdichte



# Speicherprinzipien

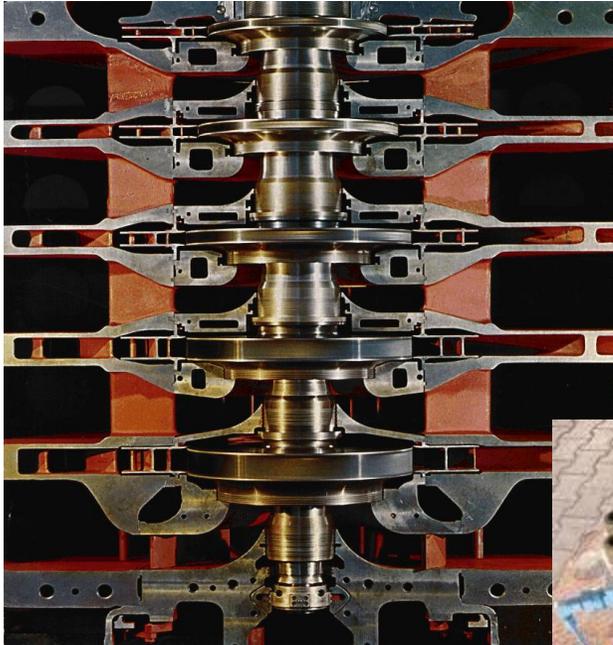
## Verdichten

CGH2 (Compressed Gaseous Hydrogen)

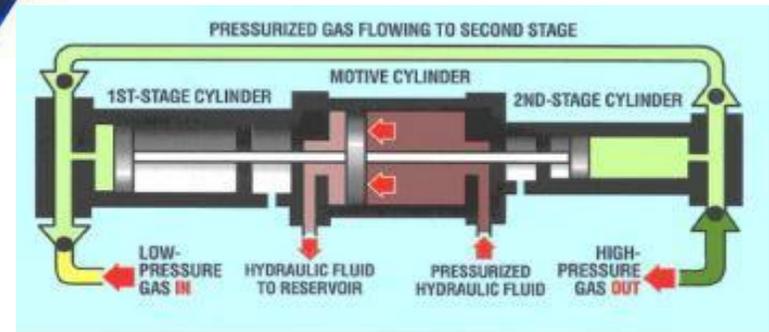


# Verdichter

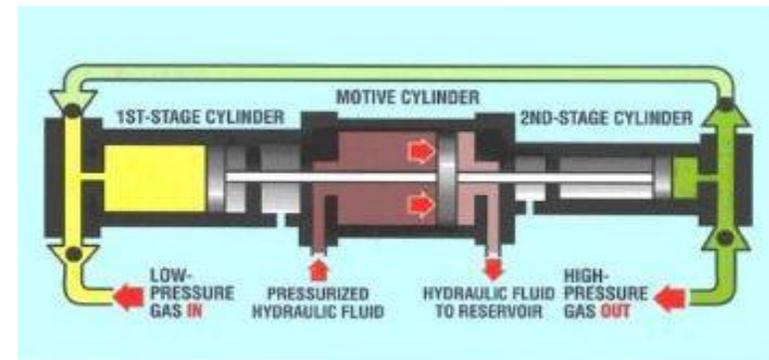
Mehrstufiger Radialverdichter



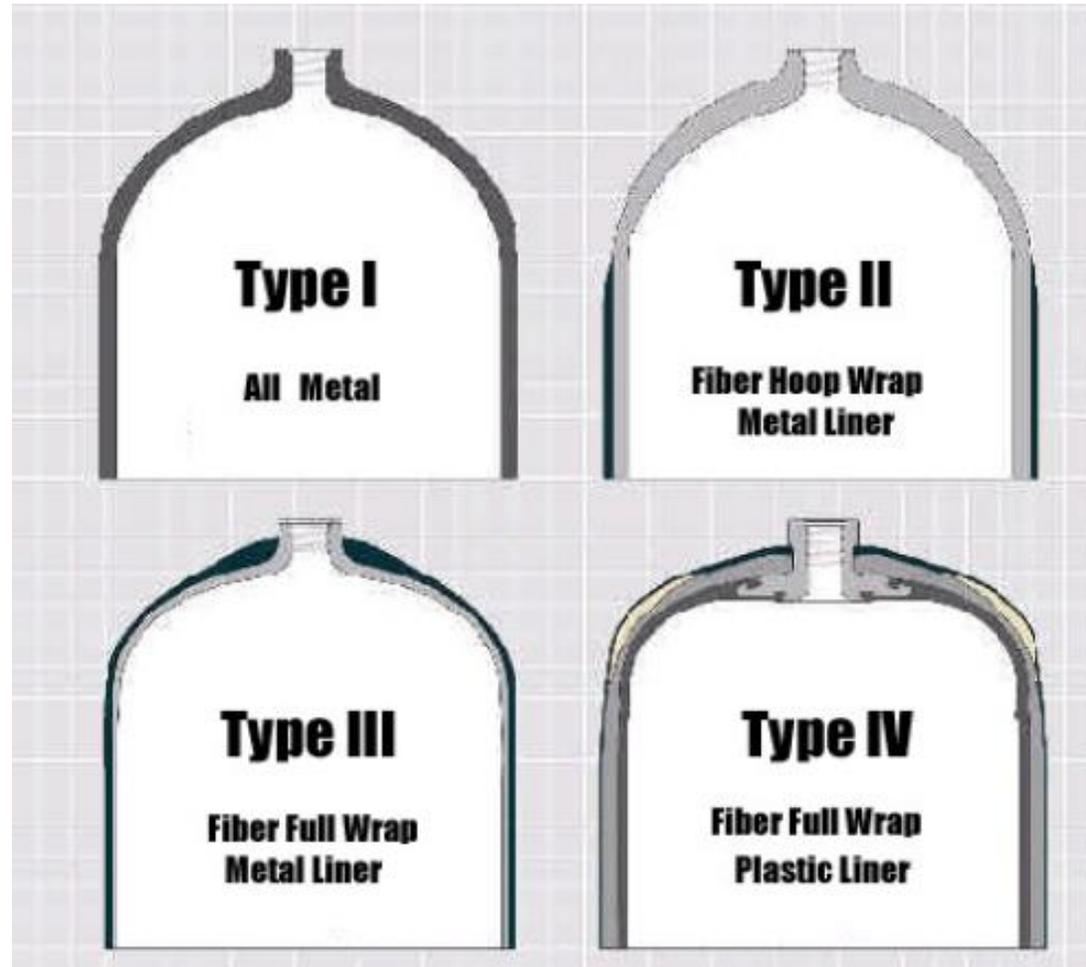
Zweistufiger Intensifier  
(Hydraulischer Kompressor)  
Quelle: Hydro-Pac



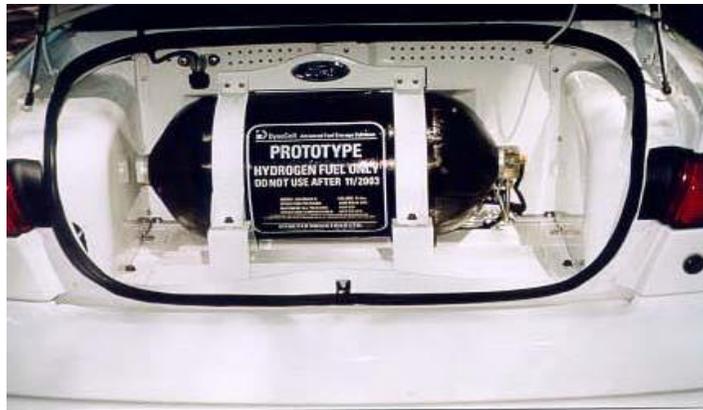
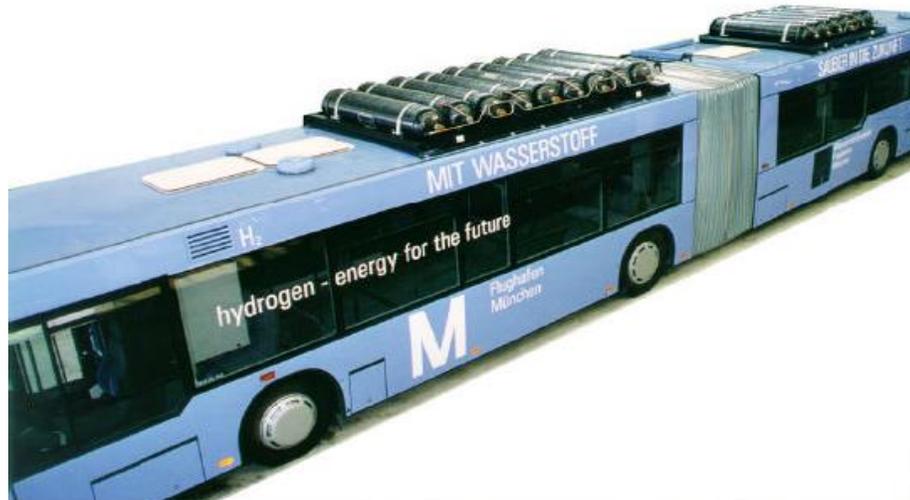
Membranverdichter



## Druckbehälter-Typen



## Beispiele für H<sub>2</sub>-Druckbehälter



# Wasserstoff-Verteilung

# Verteilung

## Wasserstoff

- Kann kontinuierlich oder diskret (“batch”) und
- unter Benutzung vorhandener Infrastrukturen transportiert werden und
- fördert die Dezentralisierung und verringert damit den generellen Bedarf zum Transportieren von Energie



# Batch-Transport – CGH2 vs LH2



Anhänger für **druckgasförmigen Wasserstoff**  
mit **leichtgewichtigen Druckflaschen**  
aus **Verbundmaterial**

Gesamtgewicht 40 t

Wasserstoffinhalt 530 kg

Anhänger für **Flüssigwasserstoff** →  
mit **doppelwandig isoliertem Tank**

Gesamtgewicht < 40 t

Wasserstoffinhalt 3.370 kg

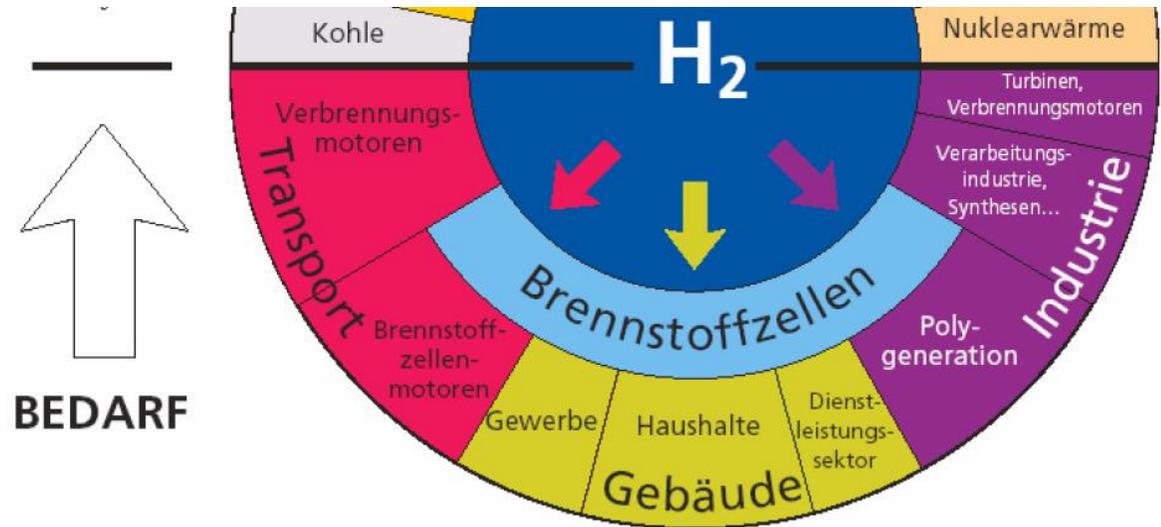


Quelle: Linde

# Anwendungen

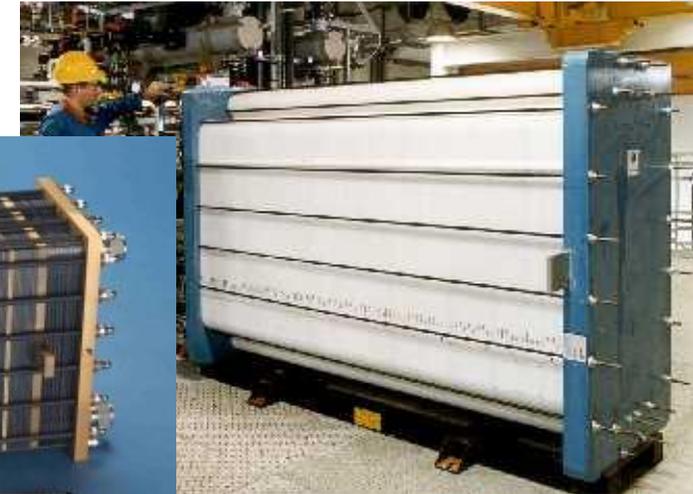
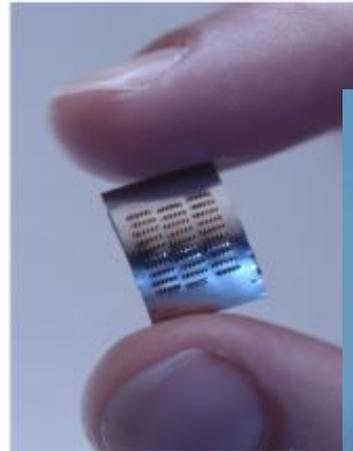
## Wasserstoff

- ist universell in der Anwendung,
- erlaubt höhere Effizienzen bei der Wandlung beim Endnutzer,
- produziert dabei keinerlei Schadstoffe und
- bringt einige positive Aspekte zur Erhöhung der Sicherheit mit sich.

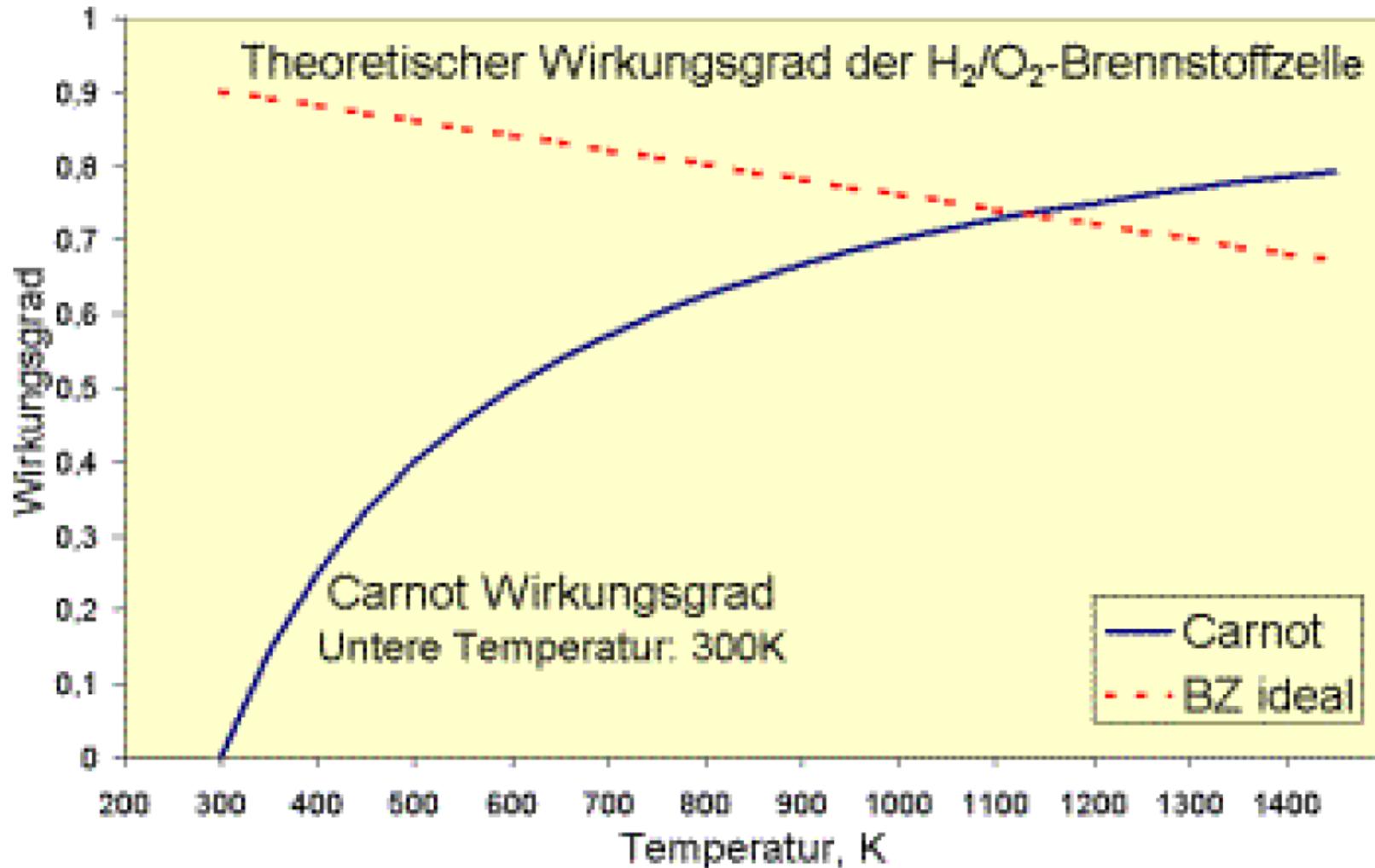


# Brennstoffzelle

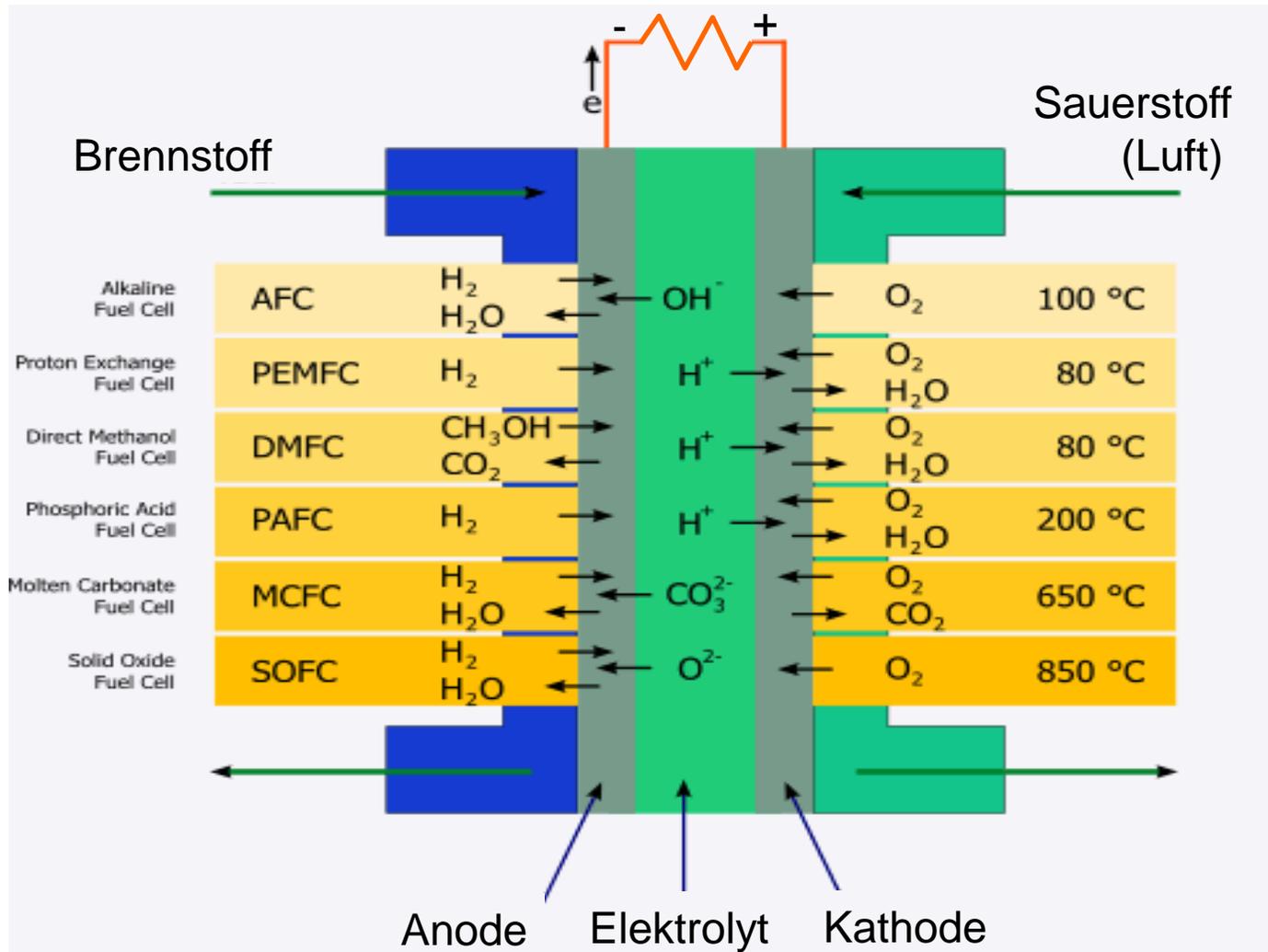
- Umkehrung der Elektrolyse; direkte Wandlung chemische → elektrische Energie, d.h. → **Effizienz**
- Galvanische Zelle mit Zufuhr der chemischen Energie von aussen → **Leistungsdichte**
- Einfacher Aufbau ohne bewegliche Teile → **Stabilität, Verfügbarkeit, Modular**
- Keine lokalen Schadstoffemissionen
- Geräuschlos



## Wirkungsgrade



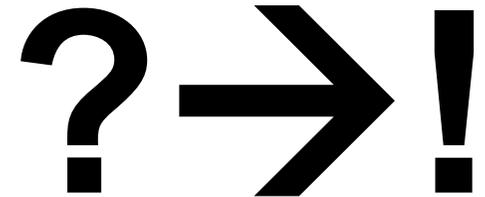
# Brennstoffzellen - Typen



# Wasserstoffsicherheit

# Akzeptanz

- Wasserstoff braucht einen akzeptablen Preis (Lenkung, Besteuerung, Nutzen,...),
- konsistente Information über die Vor- und Nachteile (Ausbildung, Informationspolitik, Identifikation,...) und
- **die Demonstration des gleichen oder gar besseren Sicherheitsniveaus im Vergleich mit vorhandenen Energieträgern!**



# Unfälle und Akzeptanz

Hindenburg 1937

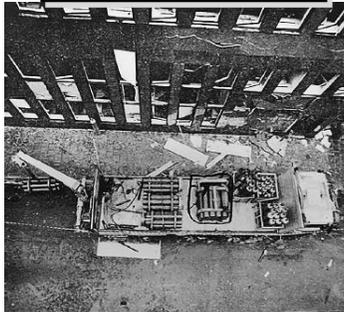


→  
Ende einer  
Technologie

**Luftfahrt**

**Verbraucher**

Stockholm 1984



→  
H<sub>2</sub>-Quelle 180 Nm<sup>3</sup>,  
16 Verletzte, Fahrzeuge  
und Gebäude bis in 90m  
Distanz beschädigt

Detonation von ~5 kg,  
2 Tote, Zerstörung des  
gesamten  
Industriegebäudes



Norwegen 1984

**Industrie**

**Nuklear**

Fukushima 2011



Überhitzung des Kerns  
Deflagration ~100 kg  
→  
Ende einer  
Technologie  
(zumindest in D)



Oslo 2019

Leckage eines 100 MPa  
Druckbehälters  
→  
Deflagration ~2 kg  
→  
2 Verletzte  
~1 Mio € Sachschaden  
Reputation?

**Mobilität**

# Was bedeutet Sicherheit überhaupt?

Definition:

**Sicherheit** ist die Freiheit von  
**nicht-akzeptierten Risiken.**

↑  
festgelegt  
durch die  
Gesellschaft

↑  
rein technischer Term:  
 $R(isiko) = p \times S(chaden)$   
je Ereignis

# Ereigniskette typisch für Brenngase



Die Physik der **Verteilung** und **Verbrennung** von Wasserstoff ist **komplex**.

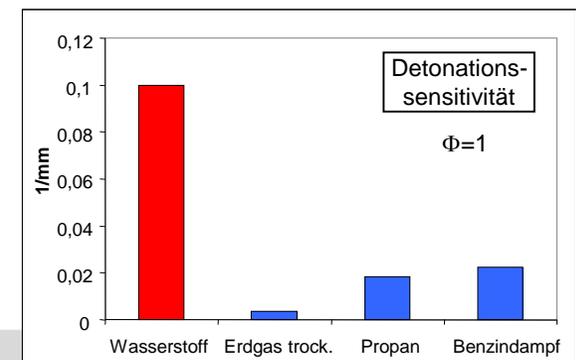
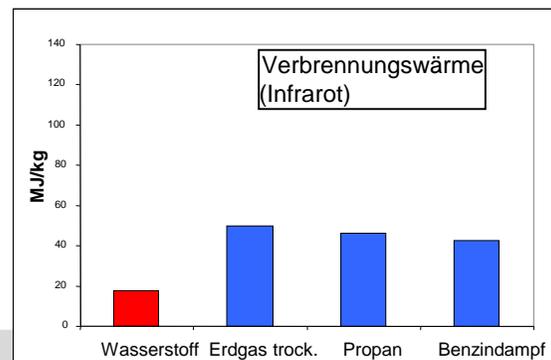
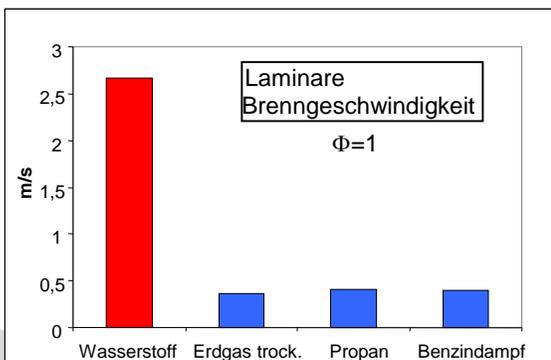
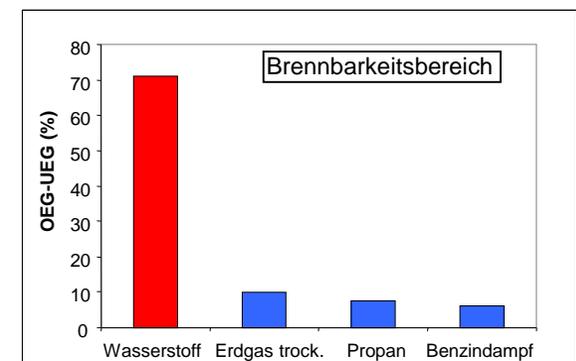
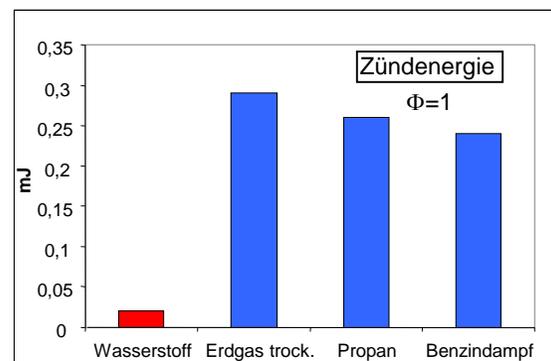
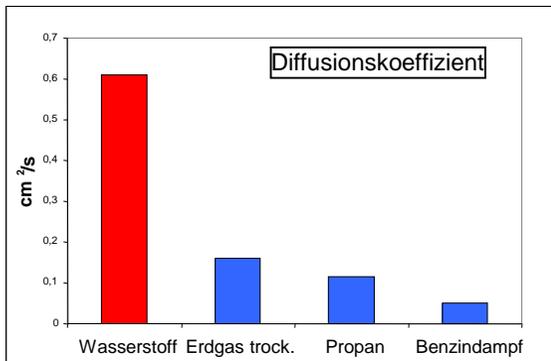
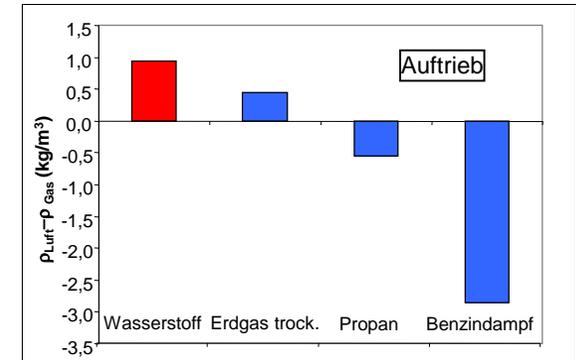
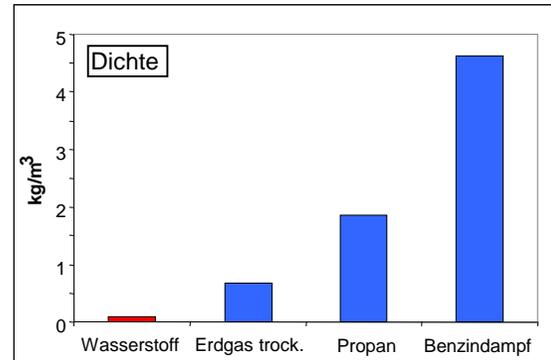
**Schadenspotential** im Vergleich mit anderen Energieträgern stark unterschiedlich qualitativ und quantitativ



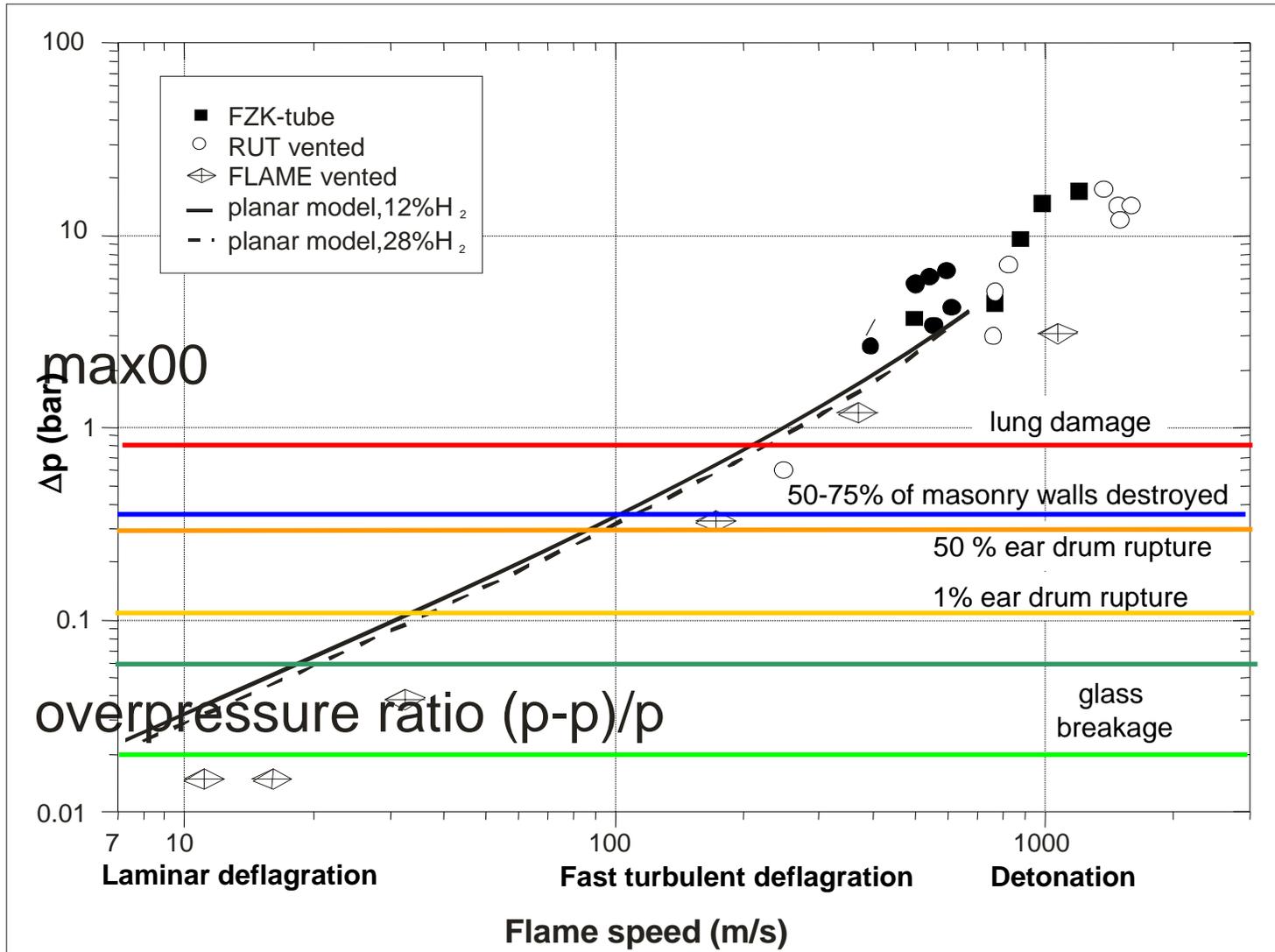
# Wasserstoff ist anderst

Sicherheitsrelevante Eigenschaften von

- Wasserstoff
- Erdgas trocken
- Propan
- Benzindampf

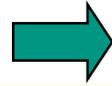


# Drucklasten



# Analysen-Methodik

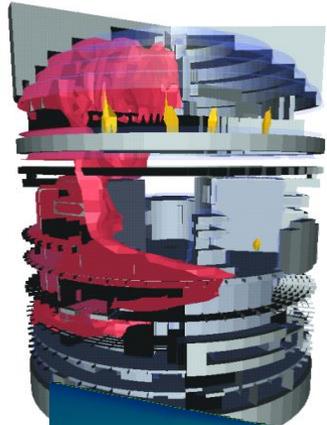
Theorie und Software



“Vereinfachte  
Kriterien”

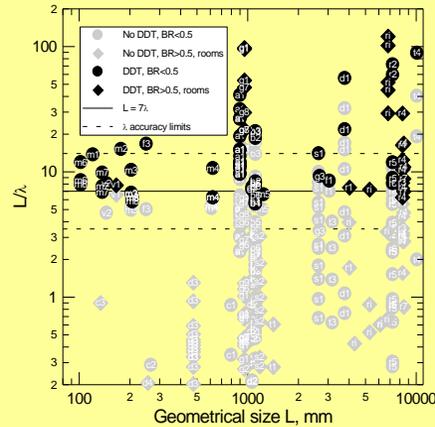


Experimente



**GASFLOW  
(3d)**

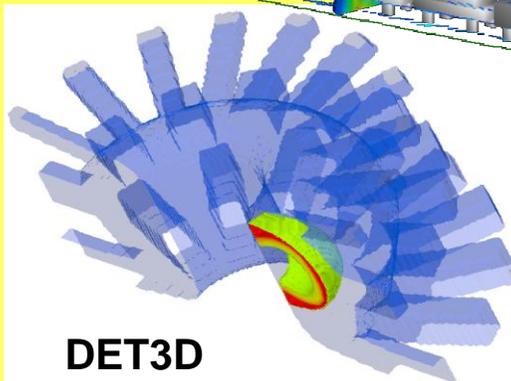
**COM3D**



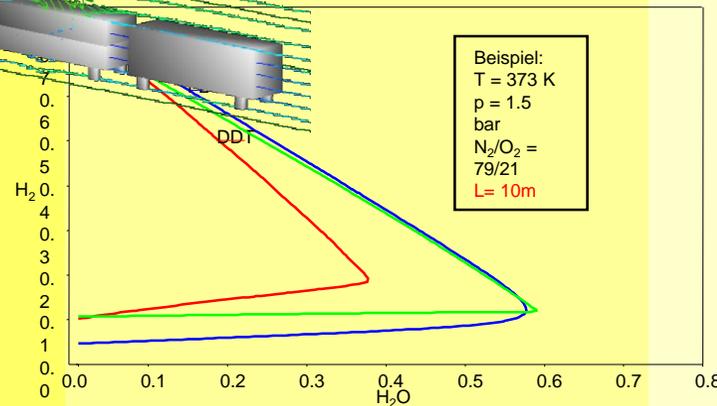
**GP-CODE**



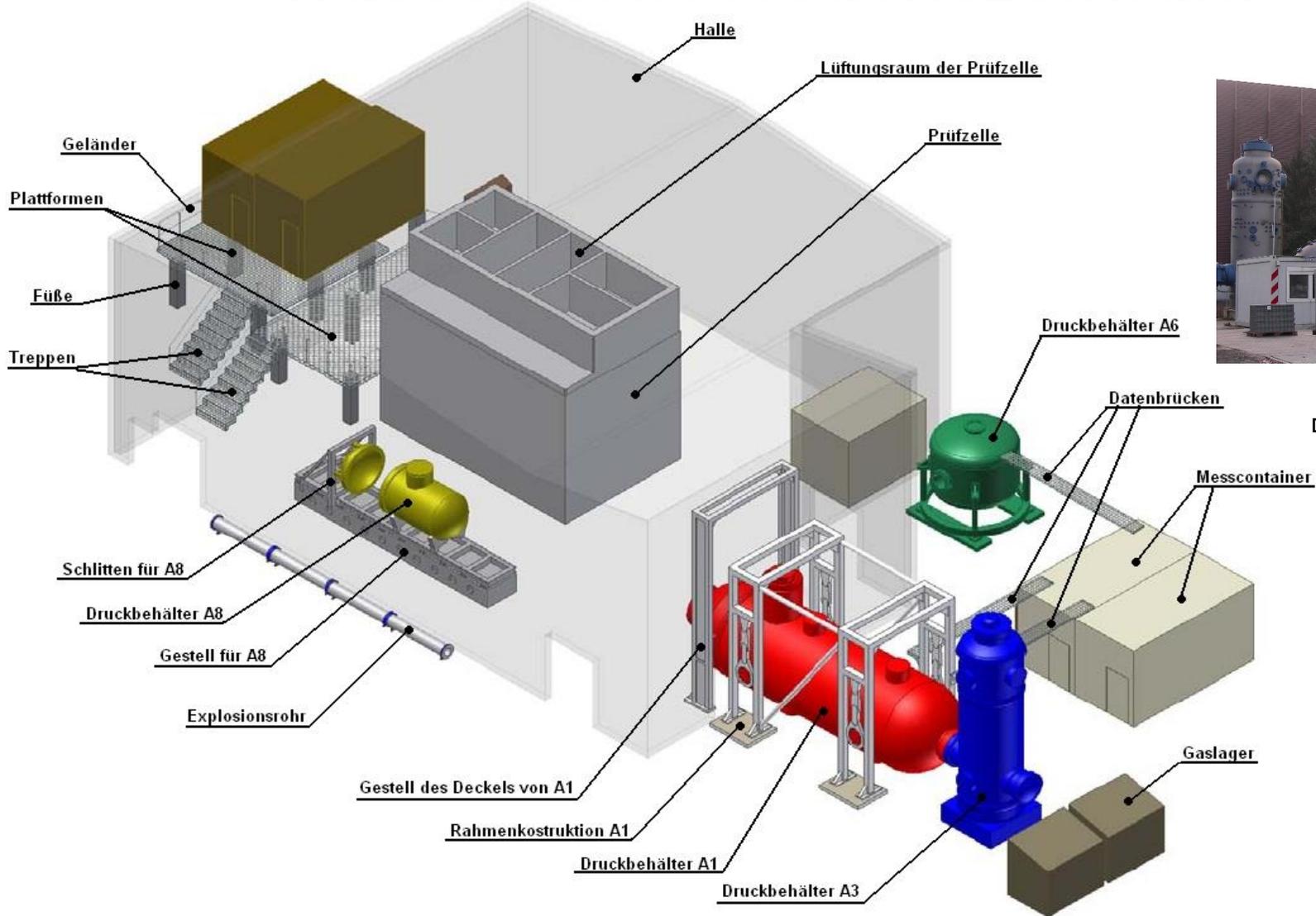
**Hydrogen  
Test Site**



**DET3D**

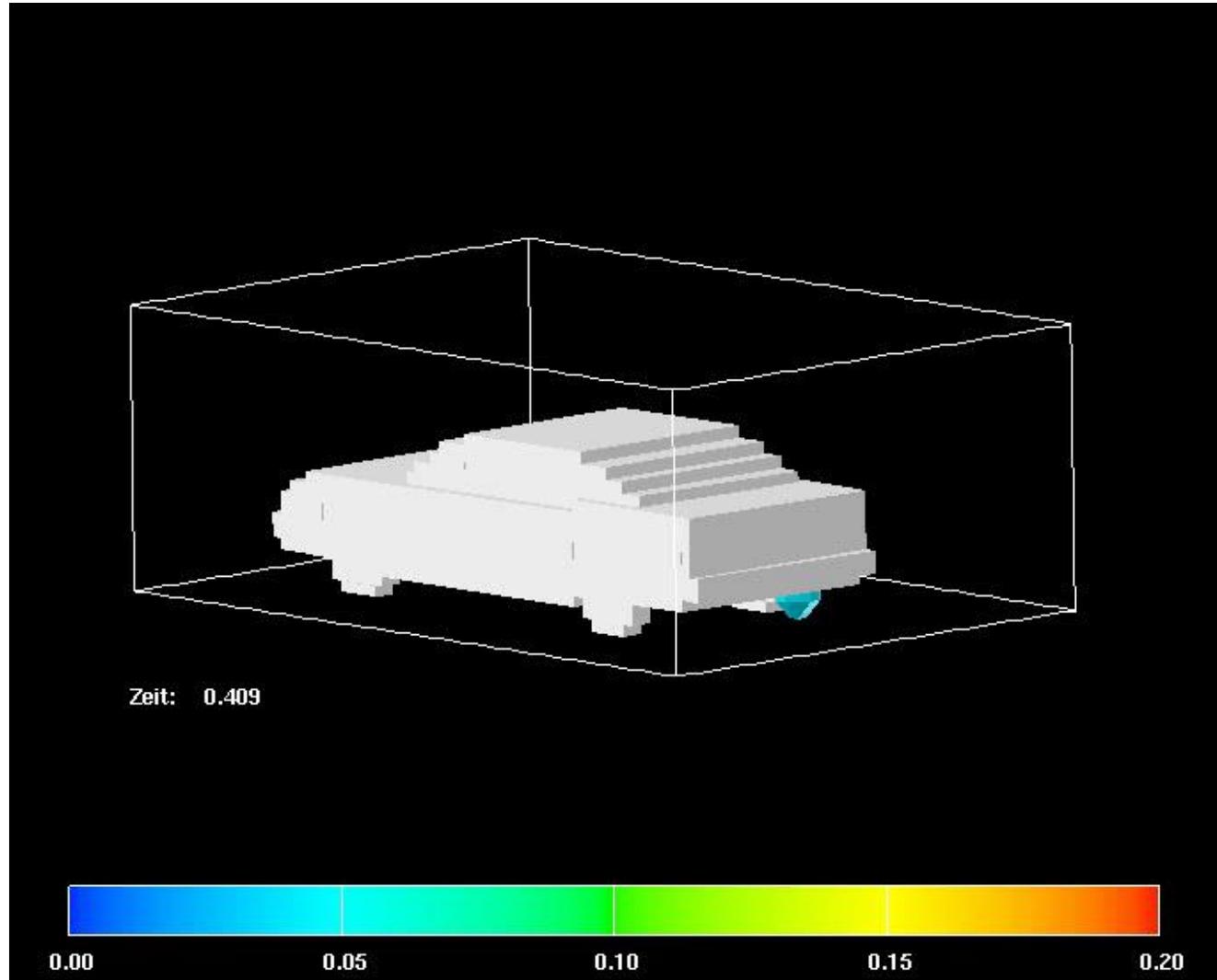


# Wasserstoffversuchszentrum



Druckbehälter A2

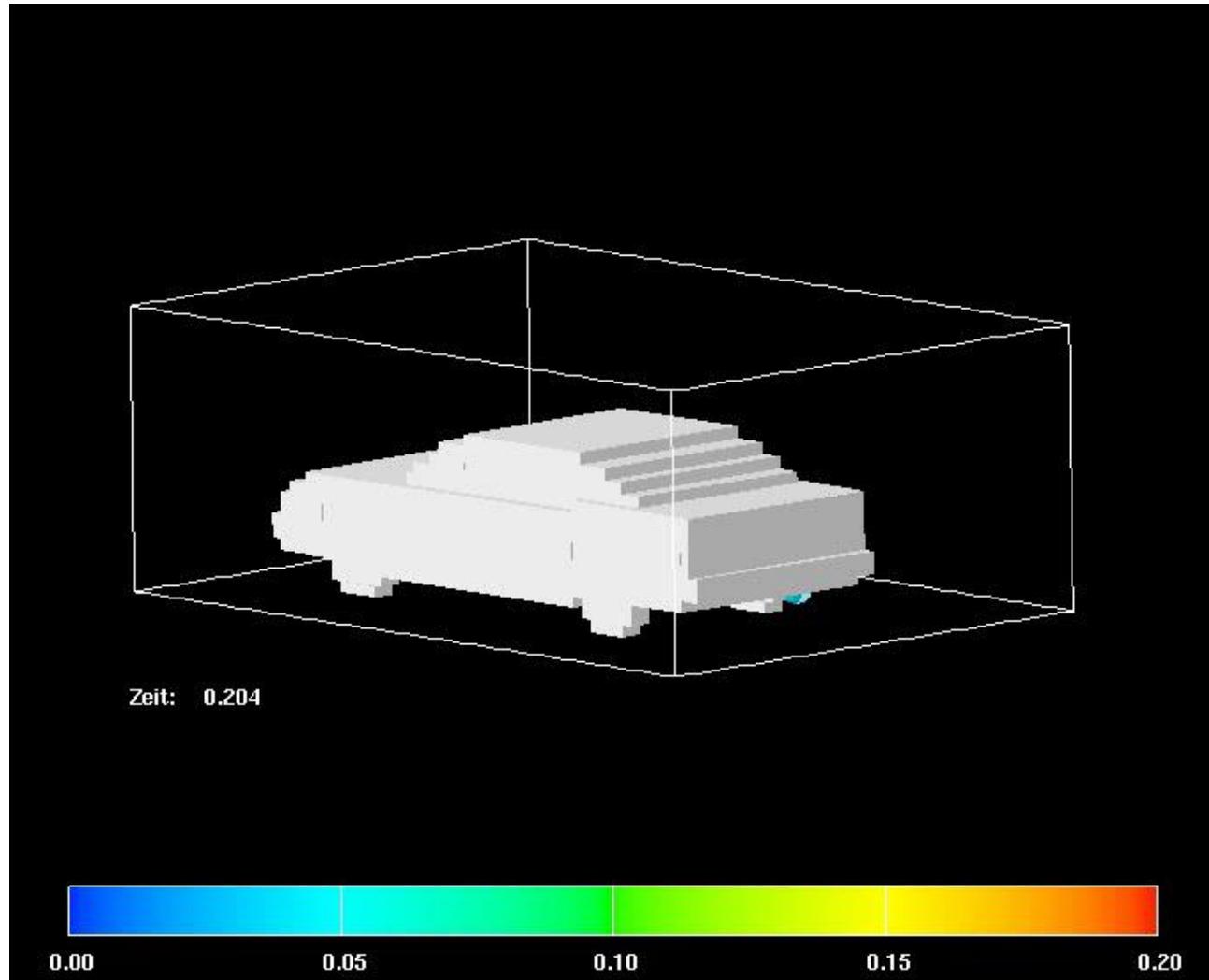
# Mit dem Wasserstoffauto in die Garage?



FALL 1:  
Freisetzung von  
**3.4 g H<sub>2</sub> / s** für  
10 s

Isovolumen > 4 vol% H<sub>2</sub>

# Mit dem Wasserstoffauto in die Garage?



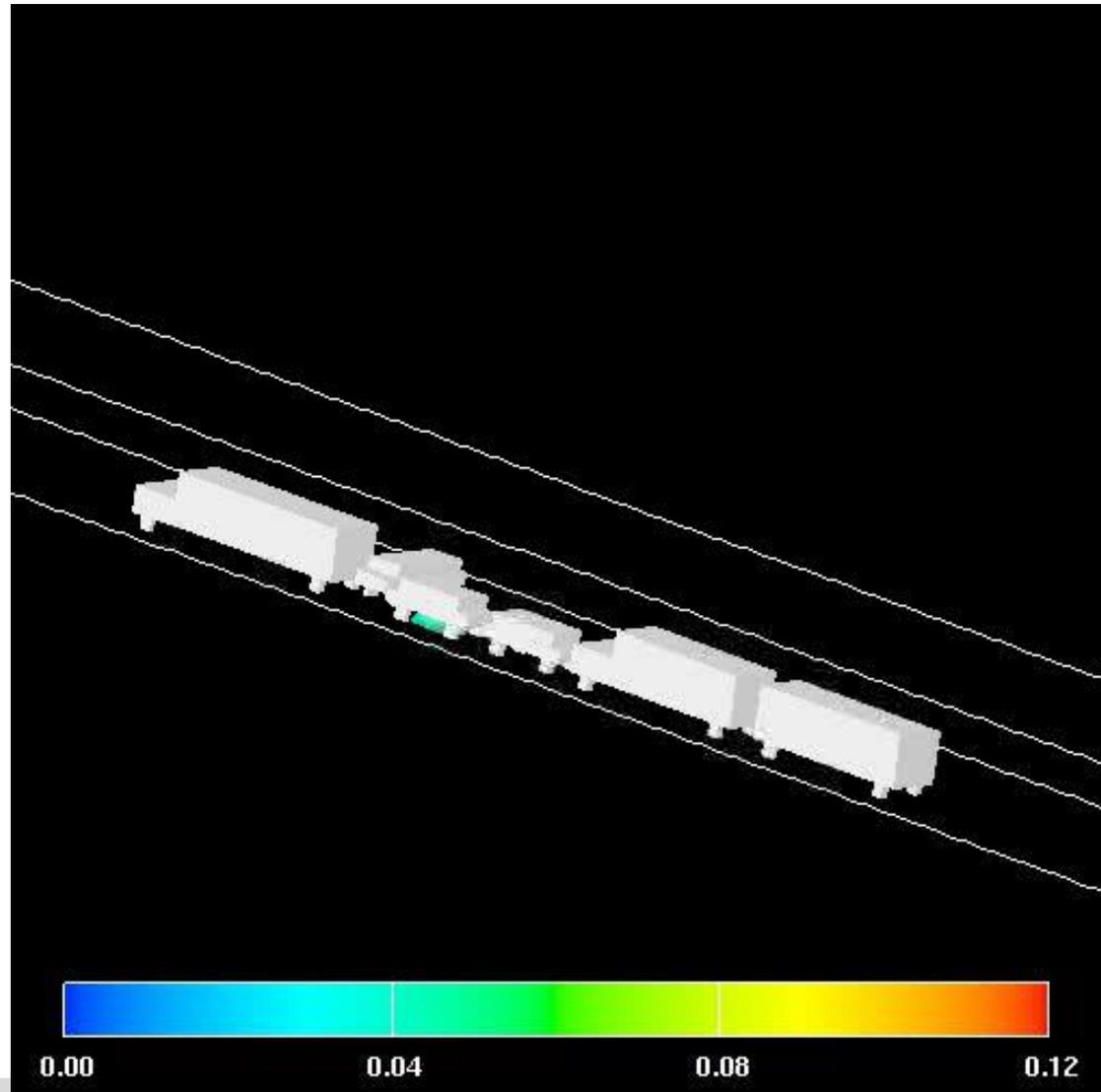
Isovolumen > 4 vol% H<sub>2</sub>

FALL 2:  
Freisetzung von  
**0.34 g H<sub>2</sub> / s** für  
100s



# ...oder in den Tunnel

Simulation eines Unfalls mit einem flüssig-Wasserstoff betankten Fahrzeug:



# Zusammenfassung

- **Tiefe Dekarbonisierung braucht Wasserstoff**
- Wasserstoff flexibilisiert und stärkt das Energiesystem mittels **Sektorenkopplung**
- Wasserstoff ist hervorragend geeignet für großskalige, saisonale **Energiespeicherung** zur intensiveren Nutzung von EE
- Alle notwendigen Technologien sind vorhanden und teilweise in der Industrie eingeführt  
(es müssen vor allem für die erneuerbaren Fahrweisen und die neuen Anwendungen Kosten reduziert und Haltbarkeit verbessert werden)
- Wasserstoff ist so sicher wie jeder andere Energieträger, wenn man seine besonderen Eigenschaften berücksichtigt

## Teil 2

# Wasserstoff am KIT

# ERFAHRUNGEN und STATUS des KIT Wasserstoff-Brennstoffzellen Bus-Shuttle Service

T. Jordan , KIT (IKET), A. Vesper, Pro-Science  
Seminar 3. Dezember 2019

Energiespeicher und vernetzte Infrastruktur

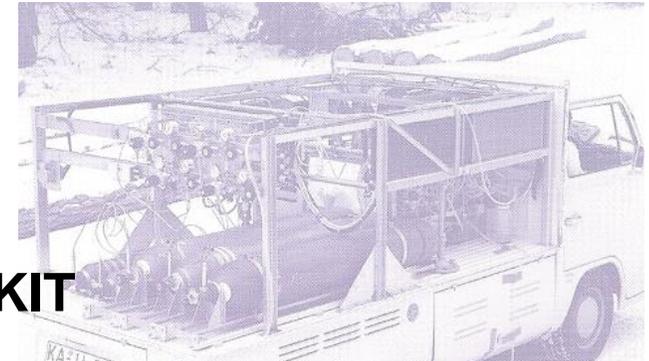
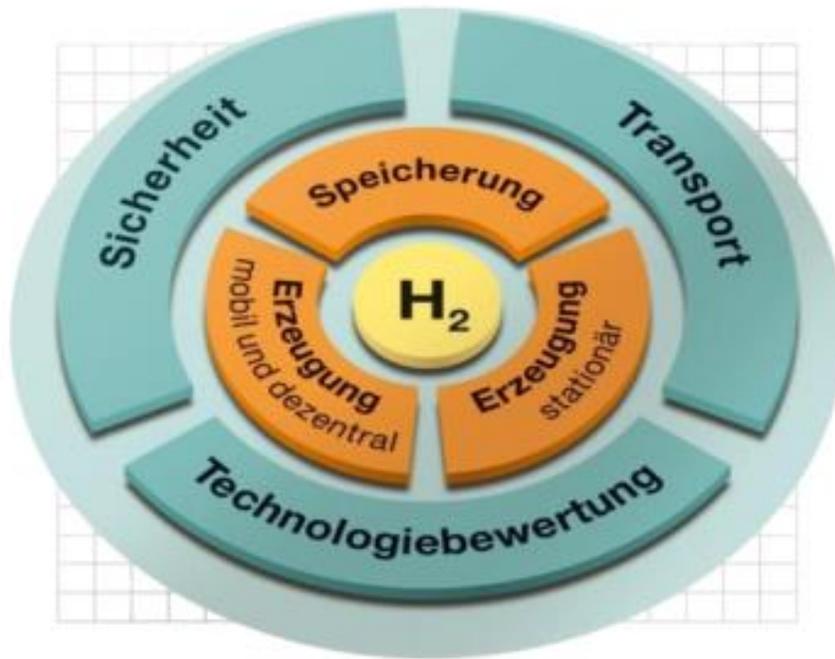


- Einleitung:  
Forschung zur Wasserstoff-Technologie am KIT
- KIT H2 Shuttle Service
- Allgemeine Erfahrungen aus dem Betrieb
- Zusammenfassung

- **Einleitung:**  
**Forschung zur Wasserstoff-Technologie am KIT**
- KIT H2 Shuttle Service
- Allgemeine Erfahrungen aus dem Betrieb
- Zusammenfassung

- Introduction
- **Hydrogen Technologies Research at KIT**
- Hydrogen Risk Assessment Methodology
  - Experiments (Facilities – Basic – Applied – Materials)
  - Numerical Simulation (GASFLOW – COM3D)
- Closure

- Founded 2005
- Greatest research activity in hydrogen in Germany
- approx. 80 researchers at 8 institutes within KIT



Hydrogen fuel cell “bus” with H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> cylinders and Siemens AFC (1986)



**EVOBUS** hydrogen fuel cell bus in front of the hydrogen test center HYKA (2012)

# Beispiele für Drittmittel-Projektarbeiten

## ■ H2FC

Coordinated supply and further development of outstanding European research infrastructure for hydrogen and fuel cells

- **KIT (IKET)**, FZJ, BAM, CEA, UU, HSE, PSI, IFE, UNIPI,... (19 partners)
- Consultants: BMW, Daimler, Volvo, Air Liquide, Linde, Deserte
- Period 2011-2015



## ■ NoE HySafe

Coordination of integration of European hydrogen safety expertise

- 25 partners from research, academia, and industry
- 13 Mio € budget and 7 Mio € EC contribution
- 120 Deliverables → [www.hysafe.net](http://www.hysafe.net)
- Main products ICHS, HIAD, BRHS,...
- Period 2004-2009
- See [www.hysafe.net](http://www.hysafe.net)



## ■ CRYOSYS

Key experiments for evaluation of cryo-compressed storage system for automotive and aerospace application

- BMW, KIT (IKET), Airbus, ET EnergieSysteme
- Fire testing, vessel rupture testing, etc.
- Period 2009-2011



## ■ HyTunnel-CS

Safety of hydrogen in tunnels and confined spaces

- Task Force 1 “State-of-the-Art” coordination
- Key experiments and simulations for evaluating appropriateness of existing mitigation techniques and strategies
- Period 2019-2021



# Weitere Beispiele...

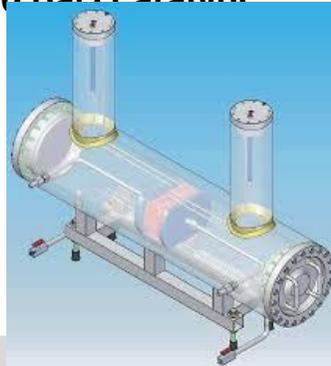
## ■ NETTOOLS

EU H2FC Development of e-Tools to support Education and Training related to Hydrogen und Fuel Cells Technologies

- Coordination of the project
- With 7 other University partners and Software developing experts
- Started 2018
- See <https://www.h2fc-net.eu/>

## ■ High Pressure Alkaline Electrolyser Cooperation with ITBA

- 2 phase H<sub>2</sub>/electrolyte transport optimisation
- High pressure (→ 500 bar) catalytic cleaning of H<sub>2</sub>
- Since 2009



## ■ Flame Stability Fundamentals

- Transients in curved structures and inhomogeneous mixtures
- Effect of acceleration and counterflow on FA and DDT
- Ring channels in 2012

## ■ PRESLHY

EU H2FC Pre-normative research project on safe use of liquid hydrogen

- KIT, Air Liquide, HSE, NCSR, INERIS, Pro-Science, Uni Warwick, Uni Ulster, HySafe
- 1.8 Mio € budget
- Extensive experimental program on release, ignition and combustion
- Cooperation with KHI, SNL, SHELL, SH2IFT
- Interface with ISO TC 197
- Period 2018-2020
- See <https://www.preslhy.eu>



# „System Solutions with Hydrogen“ (SCI Subtopic 2.3 )

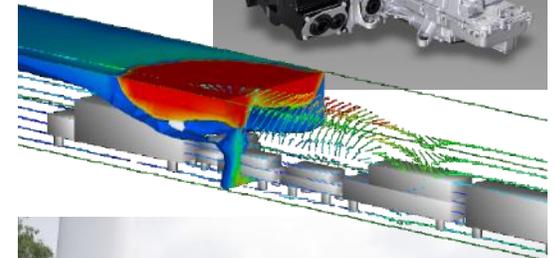
## Beiträge zur H2 gestützten Elektromobilität

Pro Science

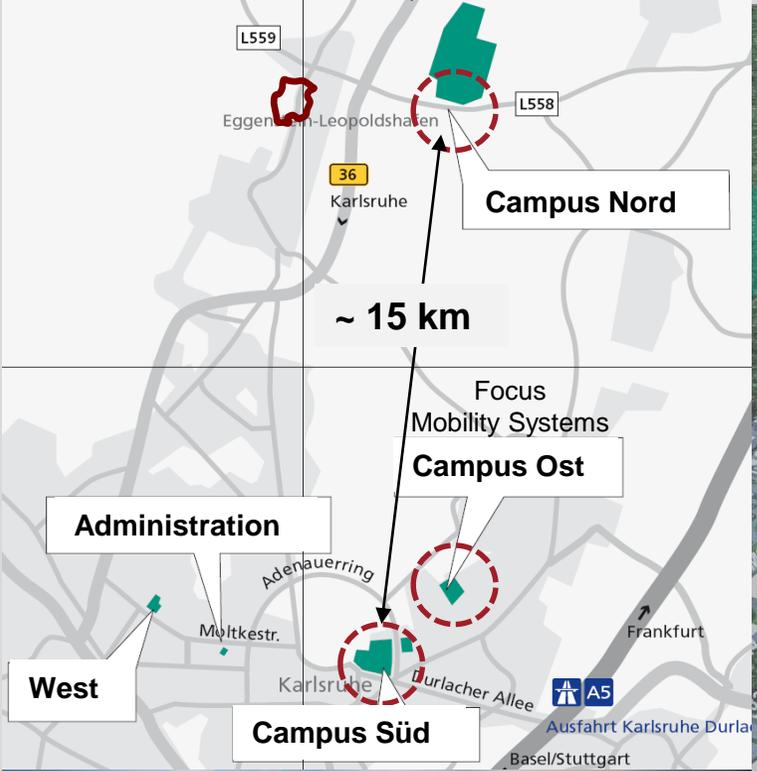
- Grundlagenuntersuchungen zum Verhalten von Wasserstoff unter Unfallbedingungen
- Methoden- und Softwareentwicklung (GASFLOW & COM3D) zum Bewerten von sicherheitskritischen Komponenten und Optimieren von Sicherheitseinrichtungen (Sensoren, Ventilation, ATEX-Equipment etc.)
- Angewandte Sicherheitsuntersuchungen für H2 getriebene Fahrzeuge sowie Versorgungs- und Verkehrsinfrastrukturen
- Unterstützung der Entwicklung von Performance- und Risiko-basierten Normen (z.B. ISO TC 197) und Regularien (z.B. EU Tunnel Direktive 2004/54/EC, UN ECE GTR bzgl. Fahrzeugdruckbehälter,...)
- Wissenschaftliche Betreuung der KIT H2-Busshuttle- und H2-Tankstellen-Demonstration

### Ressourcen

- 15 FTE, 1 Doktorand und 2 Studenten am IKET
- Jährlich ca. 230 T€ FE-Budget und 500 k€ Drittmittel aus industriefinanzierten, nationalen (NIP), sowie europäischen (FCH 2 JU) Projekten, sowie Lizenzerlösen

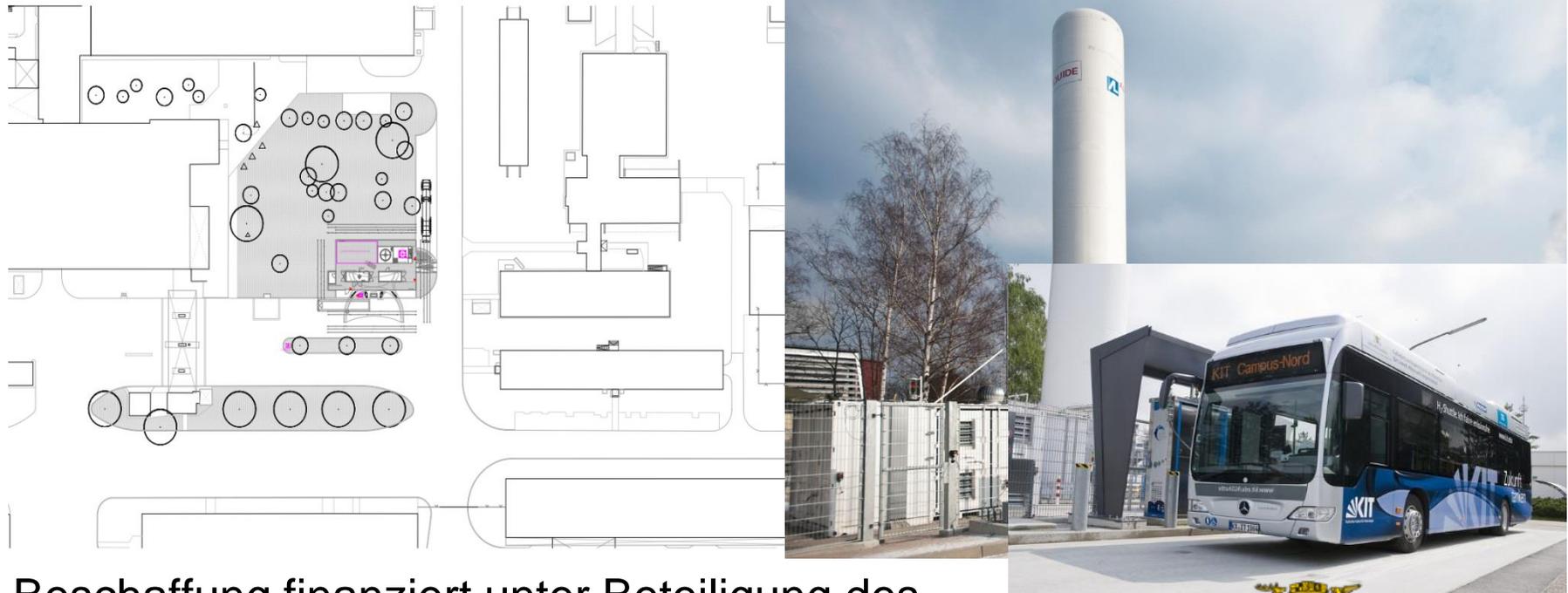


- Einleitung:  
Forschung zur Wasserstoff-Technologie am KIT
- **KIT H2 Shuttle Service**
- Allgemeine Erfahrungen aus dem Betrieb
- Zusammenfassung



**2 KIT Bus Shuttles**  
 basierend auf Evobus Hybrid FC Citaro  
 seit 06/2013 > 160000 Passagiere / Jahr

# H<sub>2</sub> Tankstelle am KIT Campus Nord und 2 FC Busse, die im Rahmen des EnergyLab 2.0 auf einer öffentlichen Buslinie betrieben werden



Beschaffung finanziert unter Beteiligung des Landes-Umweltministeriums Baden-Württemberg, Betrieb gesponsert durch:



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

# Eine „kurze“ Geschichte

Hannover Messe 2012



Zulassung  
350 bar  
Betankung

Zulassung  
700 bar  
Betankung  
(ungekühlt)

Erster  
Ideenaustausch  
zwischen UM-BW,  
KIT, EnBW & KVV

Start der  
Bauarbeiten



Provisorischer  
Betrieb der  
Busse

Projekt  
Kick-off

Lieferung  
der Busse

Vertragsab-  
schluss mit der  
Technologie-  
Lieferanten



39		KIT Campus Süd - KIT Campus Nord		→
<b>Montag - Freitag</b>				
VERKEHRSSCHWELGE				
Karlsruhe KIT-Campus Süd	ab	7:30	8:30	8:30
KIT-Campus Ost		7:33	8:03	8:33
KIT-Campus Nord Südstr.		7:36	8:16	8:46
KIT HS - Karlsruher Allee		7:48	8:18	8:48
KIT-Campus Nord Gebäude	605	an	7:56	8:26
5 = nur an Schultagen				
<b>Offizielle Eröffnung des Linienbetriebs</b>				
39		KIT Campus-Nord - KIT Campus Süd		←
<b>Montag - Freitag</b>				
VERKEHRSSCHWELGE				
KIT-Campus Nord Gebäude	605	ab	8:00	8:30
KIT HS - Karlsruher Allee		8:03	8:31	9:01
KIT-Campus Nord Südstr.		8:06	8:32	9:02
Karlsruhe KIT-Campus Ost		8:18	8:48	9:18
KIT-Campus Süd		8:30	9:00	9:30
5 = nur an Schultagen				

2011

2012

2013

2014

# Wasserstoff-Brennstoffzellen Hybrid Busse

## Hersteller

Evobus/Daimler  
Basis Citaro 12m  
Standard-Stadtbuss

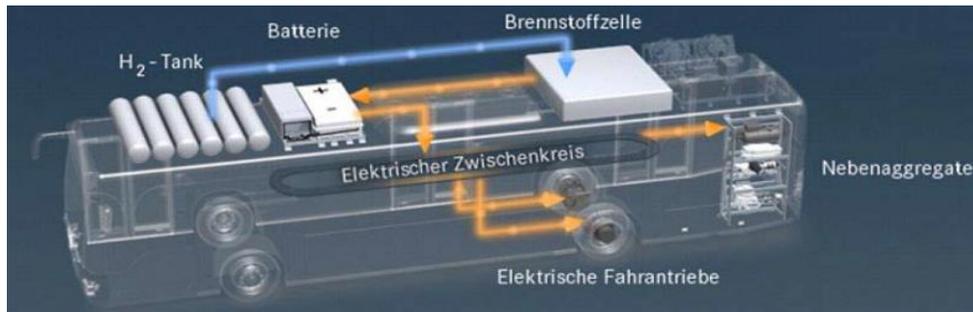
## Leistungsdaten

Je 2 x 60 kW PEM FC Stacks  
35 kg H<sub>2</sub> Speicher bei 350 bar  
~ 500 km Reichweite  
Elektrischer Antrieb über Radnabenmotoren  
Lithium-Ionen-Batterien (~10 km Not-Reserve)

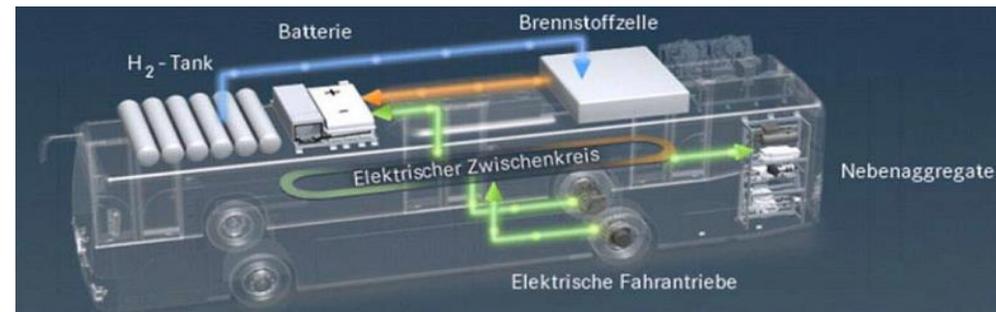


## Sonstiges

Niederflurtechnik  
Voll klimatisiert, Rückfahrkamera  
Leittechnik für VBK Linienverkehr vorgerüstet



Auflastbetrieb („Fahren mit FC“)



Rekuperation („Bremsen“)

# H<sub>2</sub> Tankstelle am KIT Campus Nord

## Herkunft des Wasserstoffs

Anfangs zu 100 % Nebenprodukt von  
BASF / Air Liquide,  
Mittelfristig selbst hergestellter “grüner“  
Wasserstoff  
(bioliq, VERENA, Hochdruck-Elektrolyse)

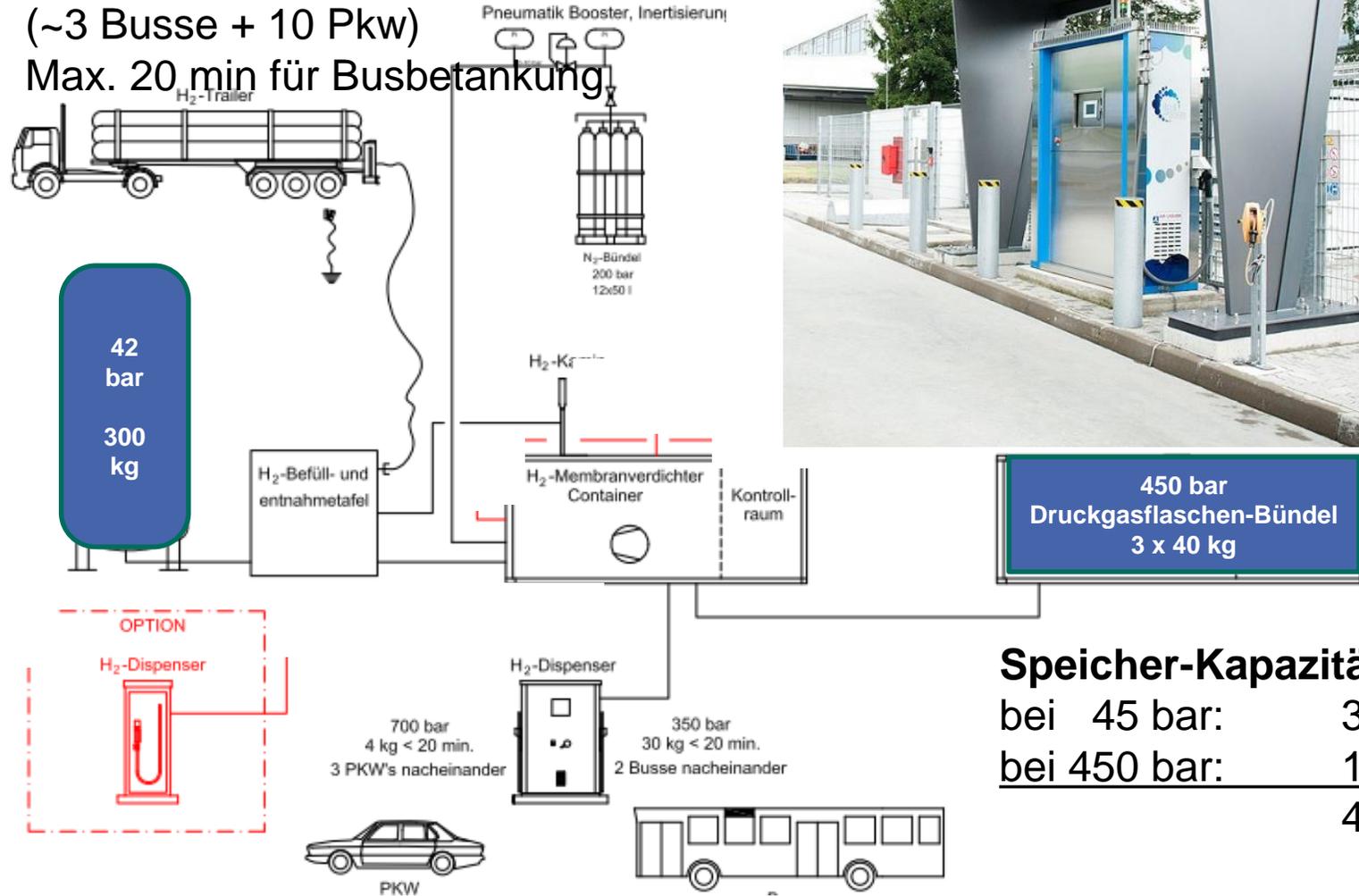
## Tank Kapazität

- 350 bar und 700 bar Befüllungen
- Abgabemenge 80 kg (ungekühlt)
  - ~ 3 Bus-Betankungen + 10 PKW / Tag
- Tankdauer < 15 min (~30 kg Bus)



# Schema der Tankstelle

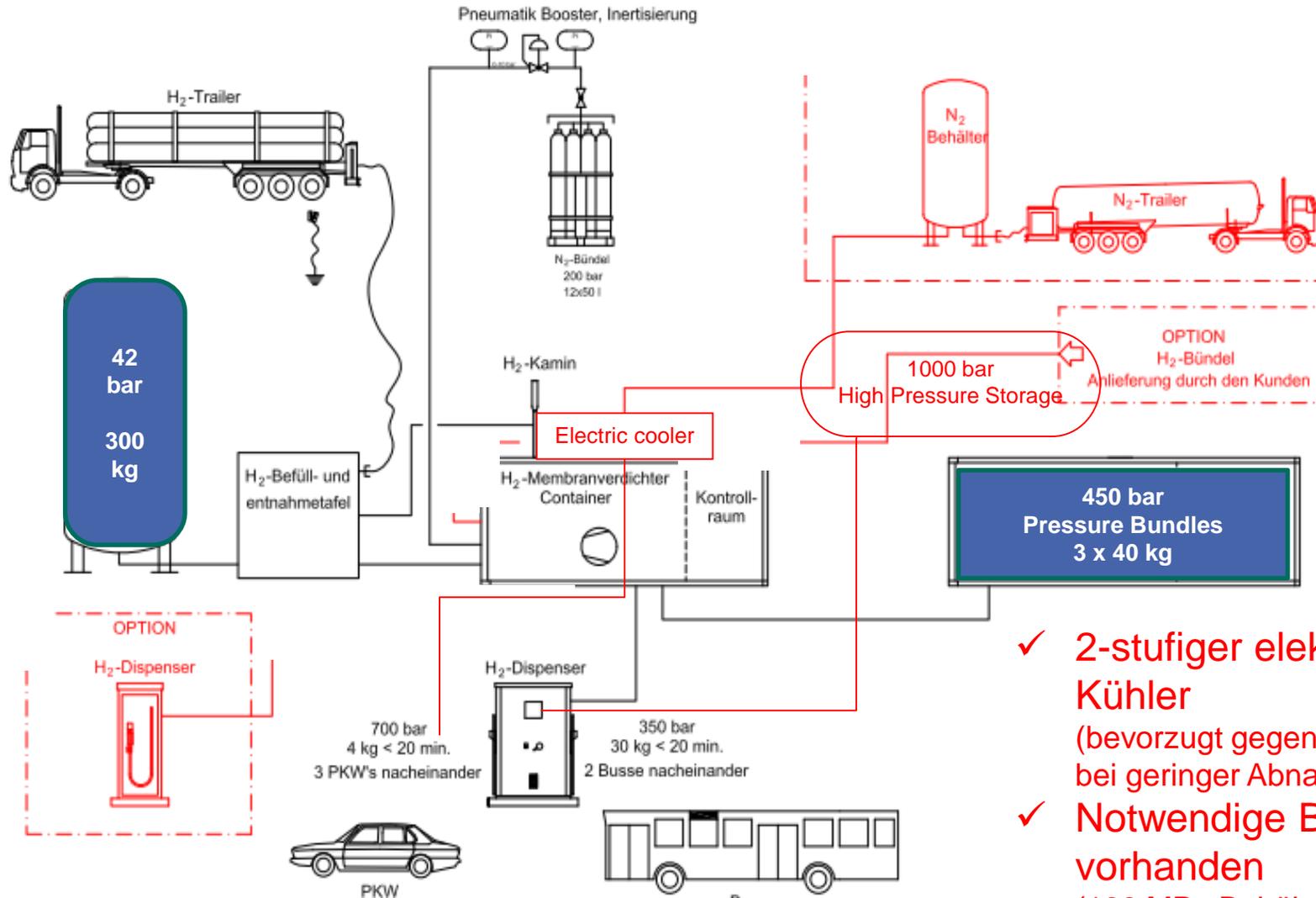
- ✓ 35 und 70 MPa
- ✓ 80 kg / Tag  
(~3 Busse + 10 Pkw)
- ✓ Max. 20 min für Busbetankung



## Speicher-Kapazität

bei 45 bar:	300 kg H <sub>2</sub> (g)
bei 450 bar:	120 kg H <sub>2</sub> (g)
	<hr/> 420 kg H <sub>2</sub> (g)

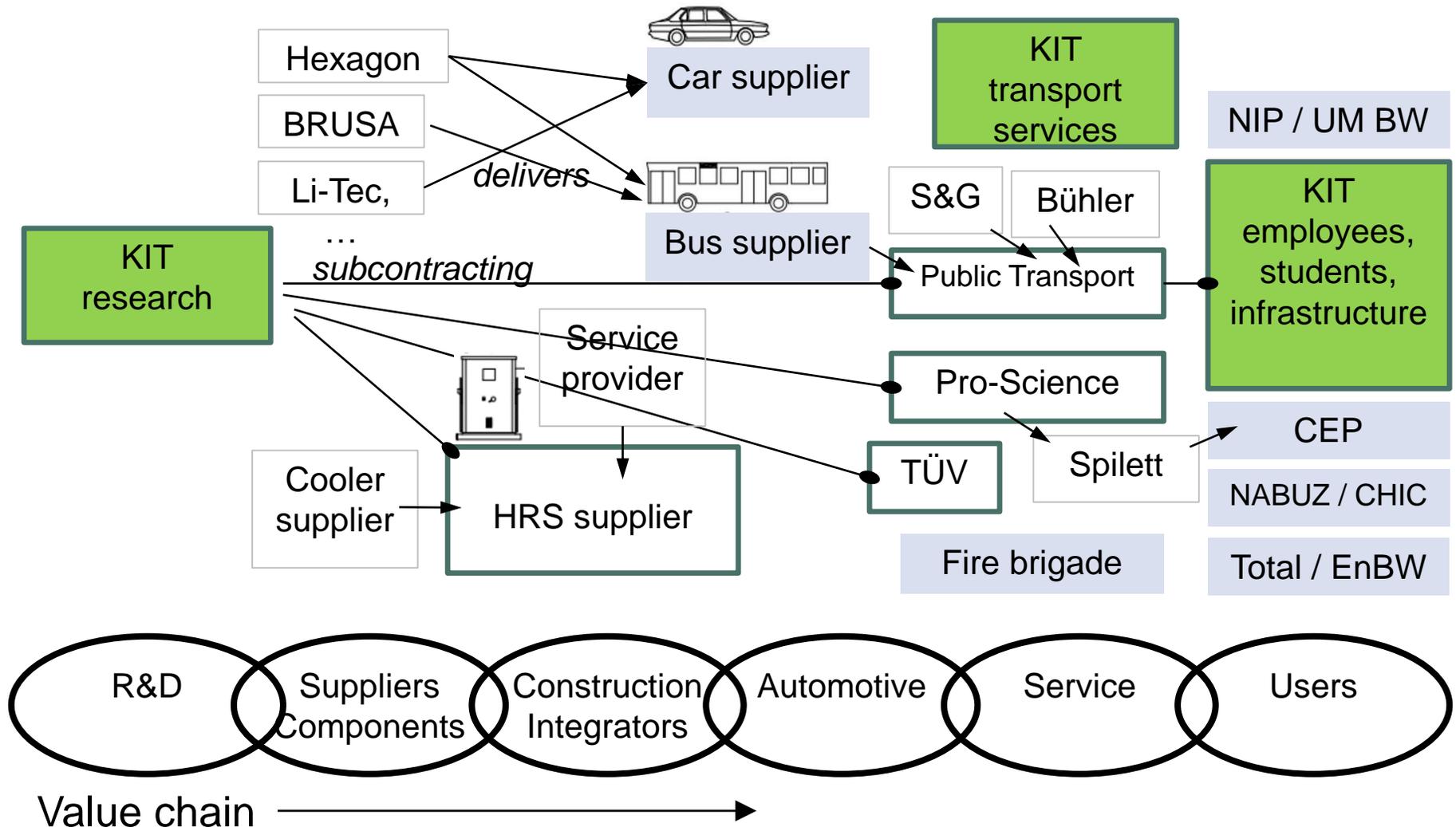
# Schema der Tankstelle mit SAE kompatibler 70 MPa Vorkühlung



- ✓ 2-stufiger elektrischer Kühler  
(bevorzugt gegenüber LN2 Kühlung bei geringer Abnahme)
- ✓ Notwendige Bauteile vorhanden  
(100 MPa Behälter, Kühler etc.)

- Einleitung:  
Forschung zur Wasserstoff-Technologie am KIT
- KIT H2 Shuttle Service
- **Allgemeine Erfahrungen aus dem Betrieb**
- Zusammenfassung

# Komplexe Projektstruktur



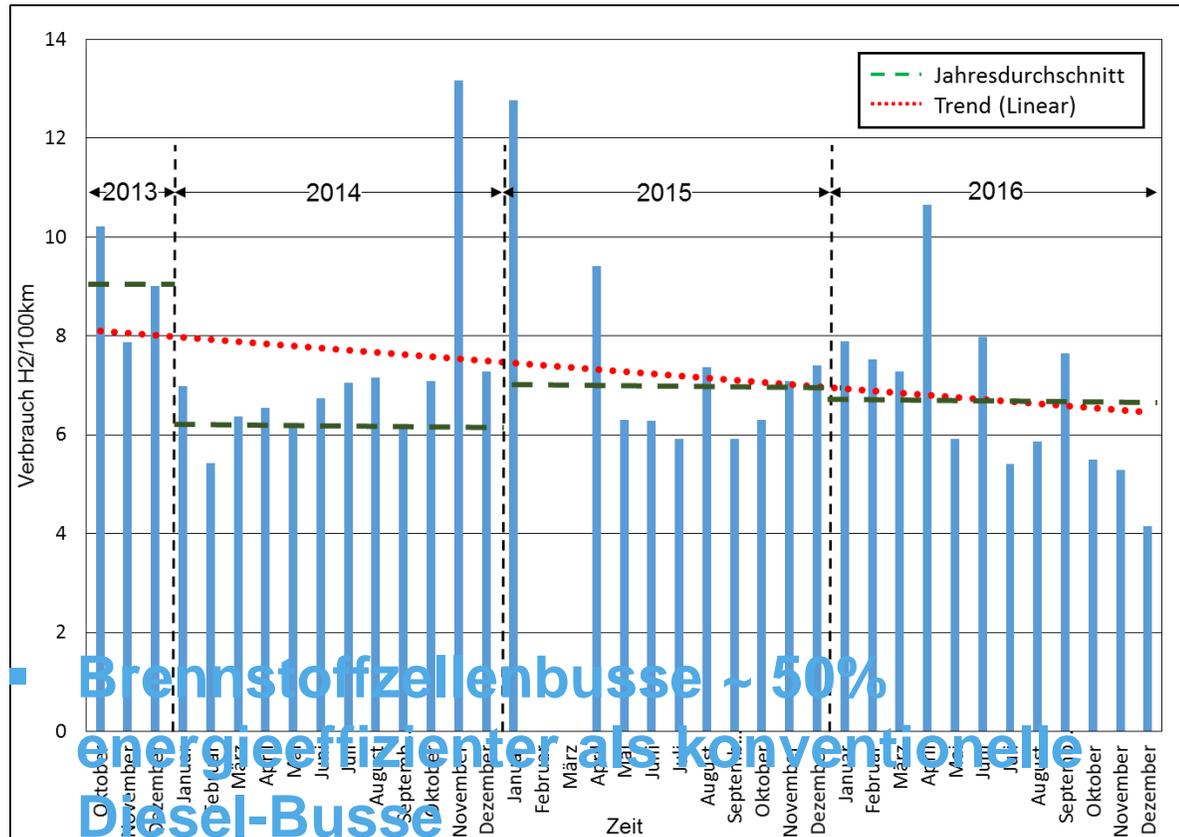
# Betriebsdaten 1

- Das KIT-Shuttle-Service transportiert durchschnittlich ca. 800 Passagiere am Tag was bei 200 Arbeitstagen zu einem Transport von 160.000 Passagiere pro Jahr führt.
- Fahrleistung der KIT Bus-Shuttles von 2013-2016

	2013	2014	2015	2016
	Fahrleistung (km)			
<b>Januar</b>		2925	4845	8130
<b>Februar</b>		255	3936	8592
<b>März</b>		4885	2090	9530
<b>April</b>		5665	1000	5290
<b>Mai</b>		2185	5000	8038
<b>Juni</b>		990	9000	6416
<b>Juli</b>		1180	7625	4159
<b>August</b>		553	5469	8310
<b>September</b>		9945	10070	6612
<b>Oktober</b>	1215	2961	5980	8028
<b>November</b>	6023	167	700	9083
<b>Dezember</b>	3936	2126	3892	10375
<b>Summe</b>	<b>11174</b>	<b>33837</b>	<b>59607</b>	<b>92563</b>

# Betriebsdaten 2

- Spezifischer Verbrauch der Busse



### Spezifischer Verbrauch im Mittel:

- 2013: 9,1 kg H2/100 km
- 2014: 6,2 kg H2/100 km
- 2015: 7,1 kg H2/100 km
- 2016: 6,5 kg H2/100 km

### Verbrauch ist abhängig von:

- Umweltbedingungen (z.B. Temperatur)
- von der Fahrweise der Fahrer
- zugeschalteten Stromverbrauchern (Sitzheizung, Klimaanlage etc.)

■ Brennstoffzellenbusse ~ 50%

energieeffizienter als konventionelle Diesel-Busse

- Ähnliche Brennstoffkosten für beide Technologien
- Eine sparsame Fahrweise von geübten Fahrern bewirkt eine deutliche Reduzierung des H2-Verbrauchs. Dies erklärt beispielsweise die niedrigen Verbrauchswerte im letzten Quartals 2016, in dem hauptsächlich erprobte Stammfahrer eingesetzt wurden.

## Betriebsdaten 3

- Durchschnittlicher H<sub>2</sub>-Verbrauch der Busse während des Shuttle Service:

7,7 kg<sub>H2</sub>/100 km

→ Brennstoffkosten

~ **62 € / 100 km** (Basis: 8 €/kg ohne Steuer)

- Verglichen mit konventionellen Diesel-Bussen mit Durchschnittsverbrauch von:

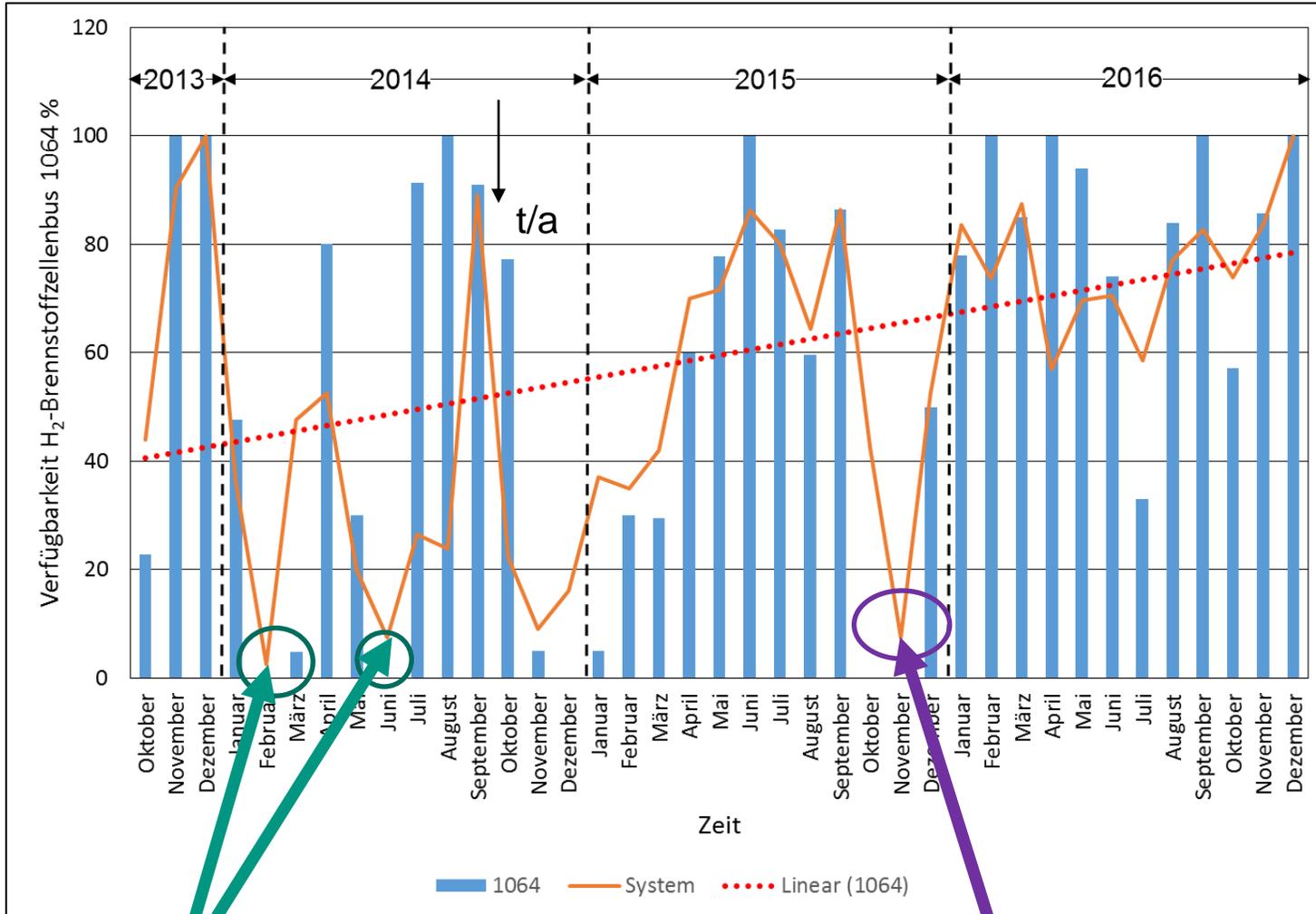
~50 l/100 km

→ Brennstoffkosten

~ **55 € / 100 km** (Basis: 1,10 €/l ohne CO<sub>2</sub>-Besteuerung)

- **Brennstoffzellenbusse ~ 50% energieeffizienter als konventionelle Diesel-Busse**
- **Ähnliche Brennstoffkosten für beide Technologien**

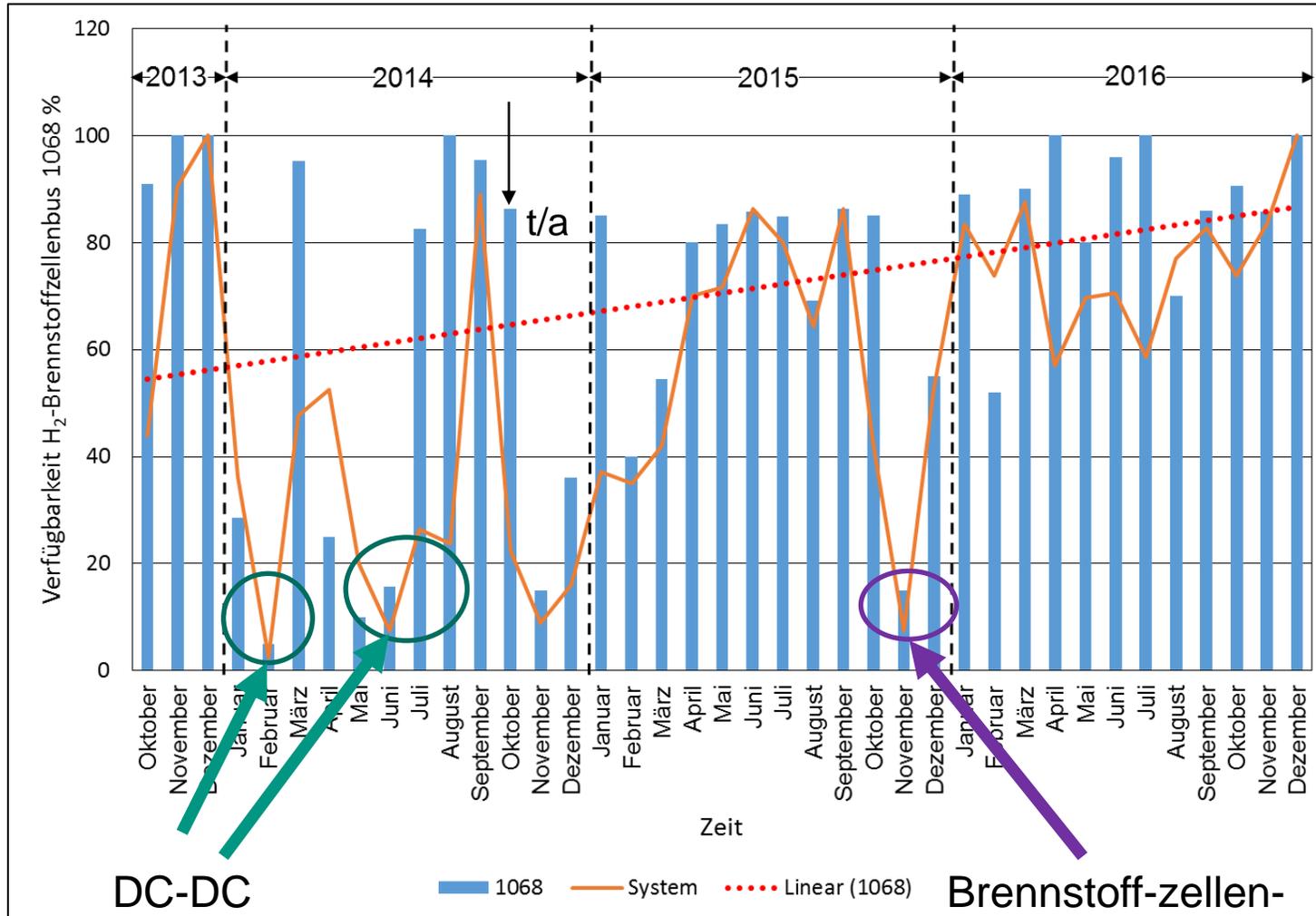
# Verfügbarkeiten: Bus 1064



DC-DC Konverter  
Probleme

Brennstoffzellen-  
Probleme  
(Anodenmodul)

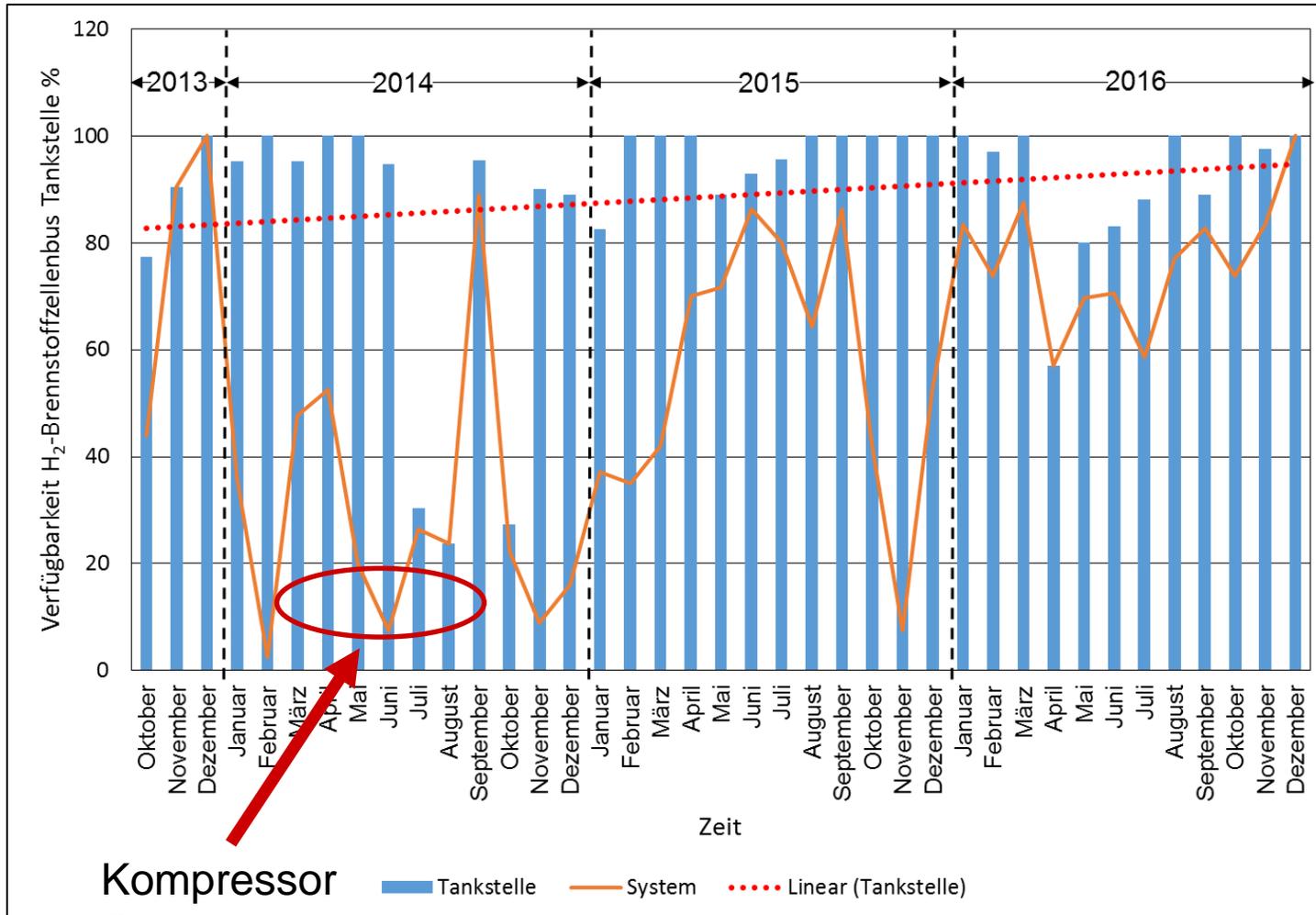
# Verfügbarkeiten: Bus 1068



DC-DC  
Konverter  
Probleme

Brennstoff-zellen-  
Probleme  
(Anoden-modul)

# Verfügbarkeiten: Tankstelle



Probleme  
(Vibrationen)

- Einleitung:  
Forschung zur Wasserstoff-Technologie am KIT
- KIT H2 Shuttle Service
- Allgemeine Erfahrungen aus dem Betrieb
- **Zusammenfassung**

## Verfügbarkeiten

- **Hohe Verfügbarkeit der KIT H<sub>2</sub>-Tankstelle**  
Ausfallzeiten hauptsächlich durch planmäßige Revisionen oder Nachrüstungen und geringfügige Probleme mit der Container-Lüftung und der Kompressor-Kühlung
- **Stetig verbesserte Verfügbarkeit beider Busse**  
anfänglich häufige Ausfälle von DC/DC-Wandler, Wärmetauscher des Brennstoffzellen Kühlkreises und des Anoden-Moduls
- Hohe Verfügbarkeiten benötigen einen dedizierten Projekt Koordinator

## Gegenüberstellung Kosten / Nutzen

- Projekt verursacht relativ **hohe Investitionskosten** und
- etwas höhere Betriebskosten (Reparaturkosten, Betrieb der Tankstelle), trotz **höherer Energieeffizienz** der Busse
- **Reduktionen von CO<sub>2</sub>-Ausstoß, Feinstaub-Emission und Lärm**



> 375 Tonnen  
CO<sub>2</sub> Emissionen  
eingespart nach 3  
Jahren (09/2016)

# Geschäftsmodelle mit Wasserstoff in KA

- Emmissionsfreier ÖPNV, flexible Elektrifizierung der Busflotte → KVV
- Netzservices, flexible Last (Elektrolyse), Lastmanagement, Netzstabilisierung, Erhöhung des EE Stromanteils durch saisonale Speicherung → Stadtwerke, EnBW, Grossabnehmer
- Höhere Ausnutzung von Wind- und PV-Anlagen → Betreiber
- Industrielle Nutzer → miro (Bsp. Rheinland Raffinerie REFHYNE, Shell)
- Erzeugung und Handel B2B, B2C → z.B. Total Tankstelle Südtangente
- Beratungs, Forschungs- und Entwicklungspartnerschaften, Public-Private-Partnerships → LH2-Lab mit am KIT mit Daimler & Linde



# Geschäfts-Hemmnisse

in Anlehnung an "Sektorenkopplung Agentur für Erneuerbare Energie  
LEE Frühjahrstagung 2018

- Akzeptanz
- Ausbau-Deckelung der EE laut EEG
- Fossile Überkapazitäten → niedriger Börsen-Strompreis, hohe Steuern und Umlagen
- Wettbewerbsverzerrungen gegenüber fossilen Brennstoffen
- „Einspeisemanagement“: Abregelung von EE-Strom rentabler als Nutzung
- „Eigenversorgungsverbot“: §27A EEG 2017 zwingt zur Einspeisung ins Netz – oder Verzicht auf Vergütung
- Kein Zertifikatsystem (Guaranties of Origin GoO)
- Fehlender politischer Fahrplan für Planungs- und Investitionssicherheit bei PtX Projekten generell



# Danksagung

Danke für Ihre Aufmerksamkeit

und vielen Dank für die Unterstützung durch das Landes-Umweltministerium



**Baden-Württemberg**

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

... und die Unterstützung durch unsere Sponsoren:



