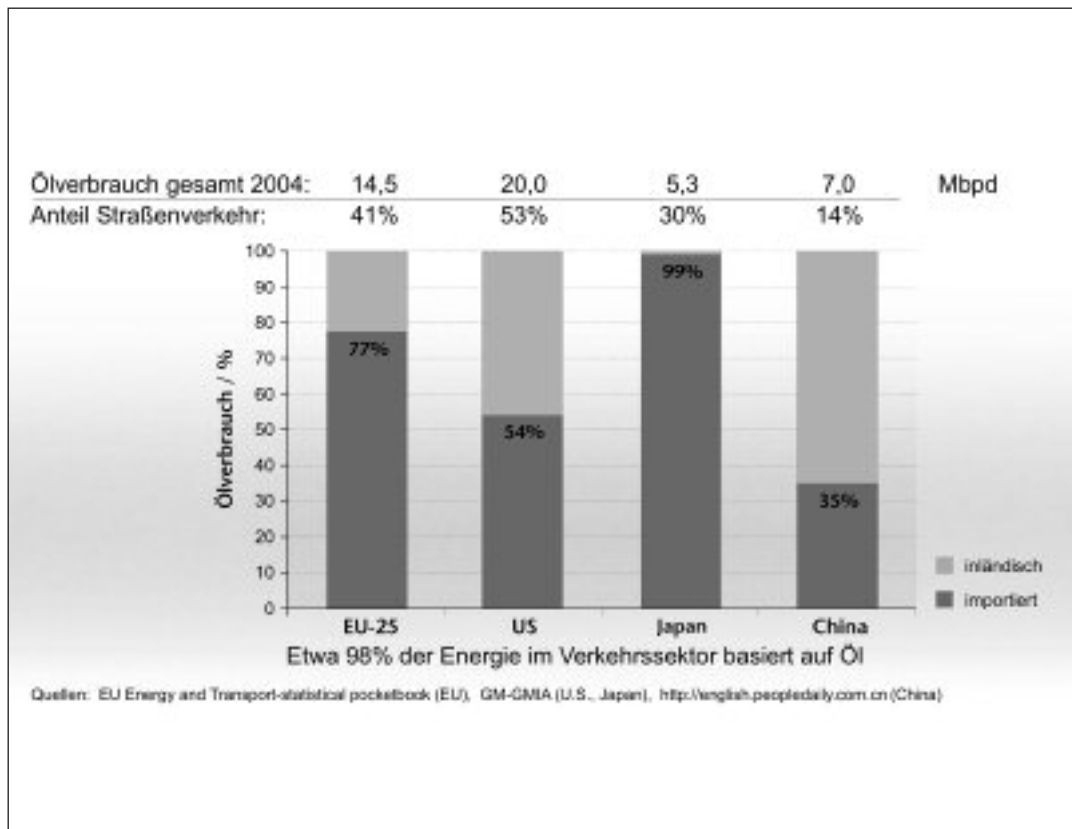


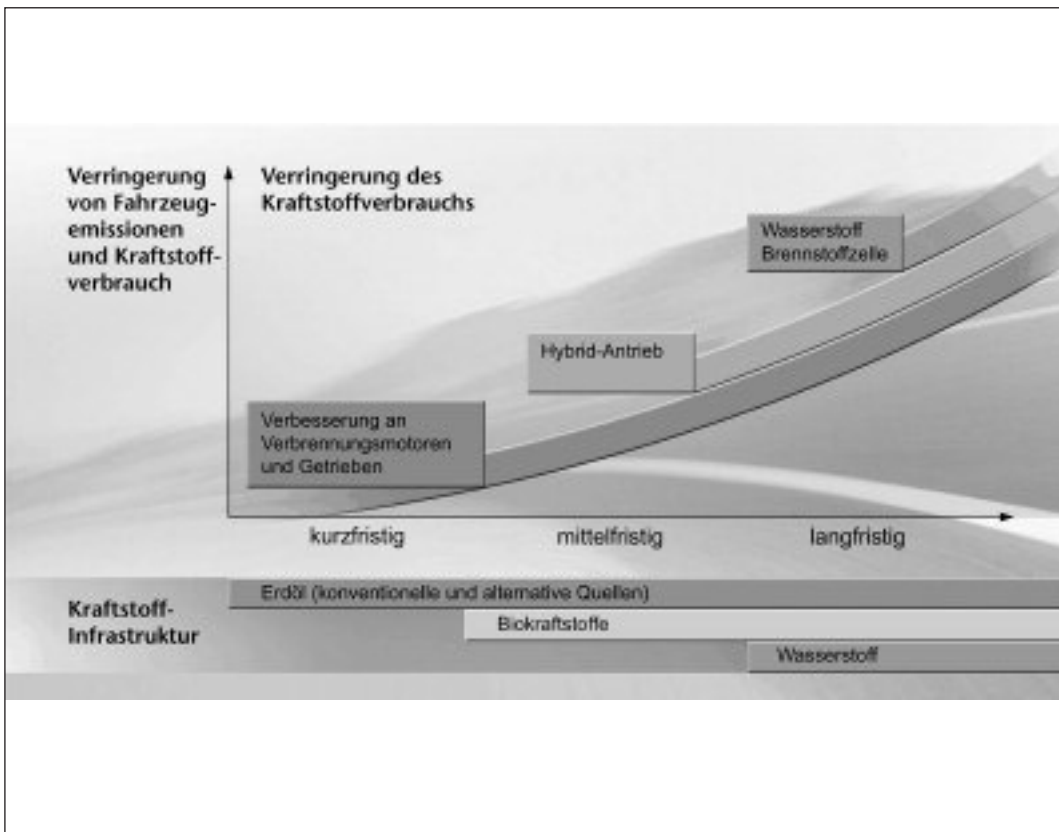
# Technologischer Status und verbleibende Herausforderungen der Wasserstoffspeicherung

U. Eberle  
 Adam Opel AG  
 ulrich.eberle@de.opel.com

Im Rahmen der Einführung des Vortrages wurde kurz allgemein die alternative Antriebsstrategie von GM Europe und im Speziellen die Motivation für Wasserstoff als alternativer Kraftstoff für die Automobilindustrie dargelegt.

Abhängigkeit von Ölimporten





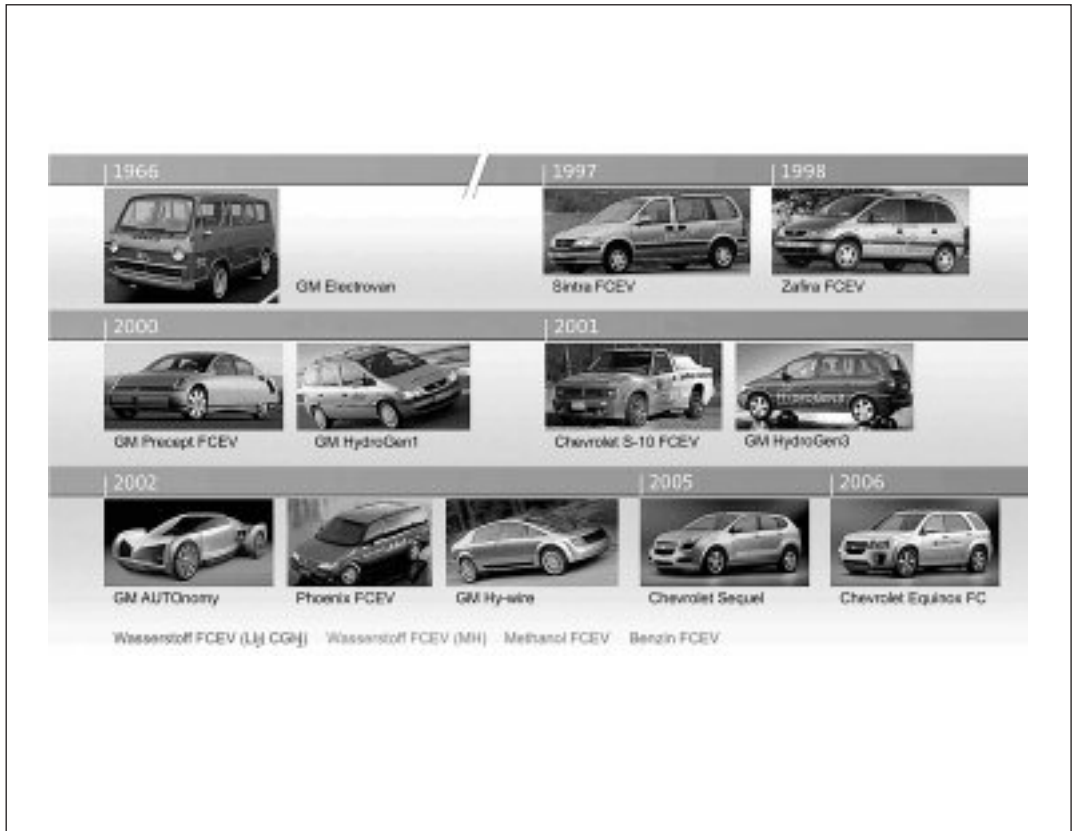
Alternative Antriebsstrategie von GM Europe

Im weiteren Verlauf wird dann der aktuelle technologische Stand der Wasserstoffspeicherung sowie deren Limitierungen beschrieben. Dabei werden sowohl konventionelle Speichermethoden wie Druck- und Flüssigwasserstoff (CGH<sub>2</sub> bzw. LH<sub>2</sub>), als auch die am weitesten fortgeschrittenen Systeme im Bereich der Festkörperspeicherung diskutiert.

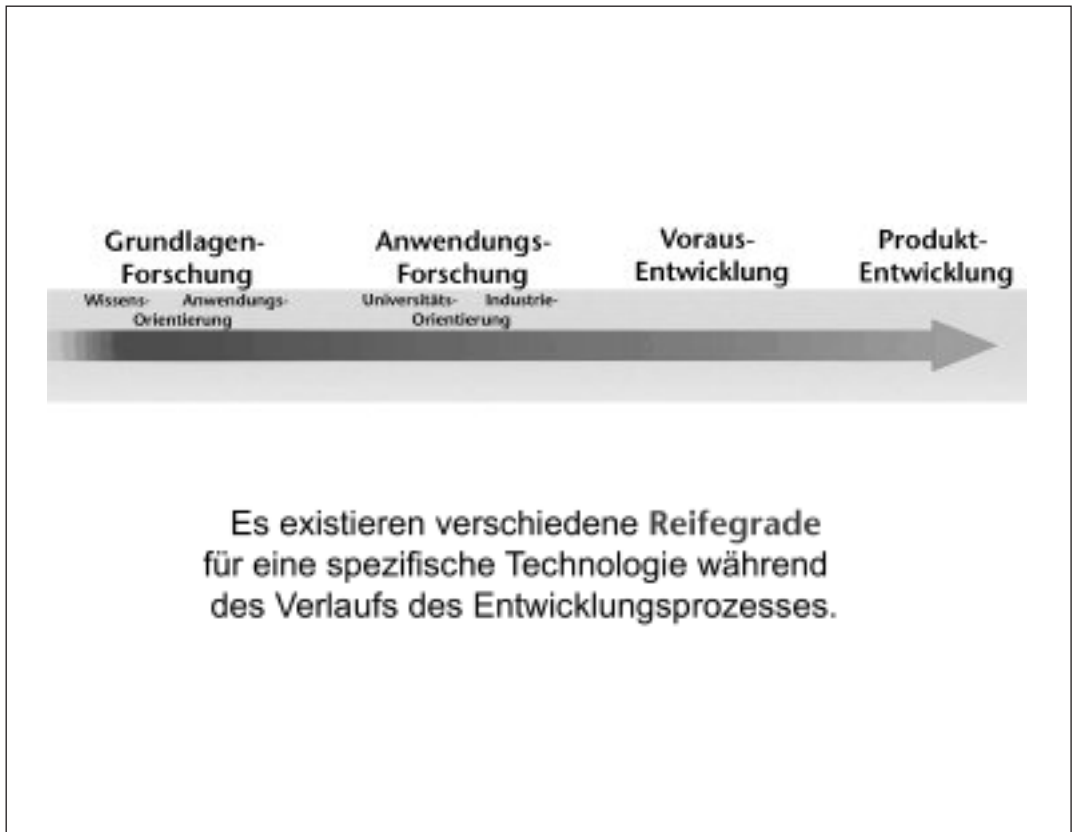
Eine Brennstoffzellen-basierte Antriebseinheit stellt bestimmte Anforderungen (bezüglich thermodynamischer Fragen, aber auch betreffend der technischen Auslegung) an die Betriebsbedingungen des Tanksystems; deshalb werden diese Punkte und ihre Auswirkungen ausführlich beschrieben und behandelt.

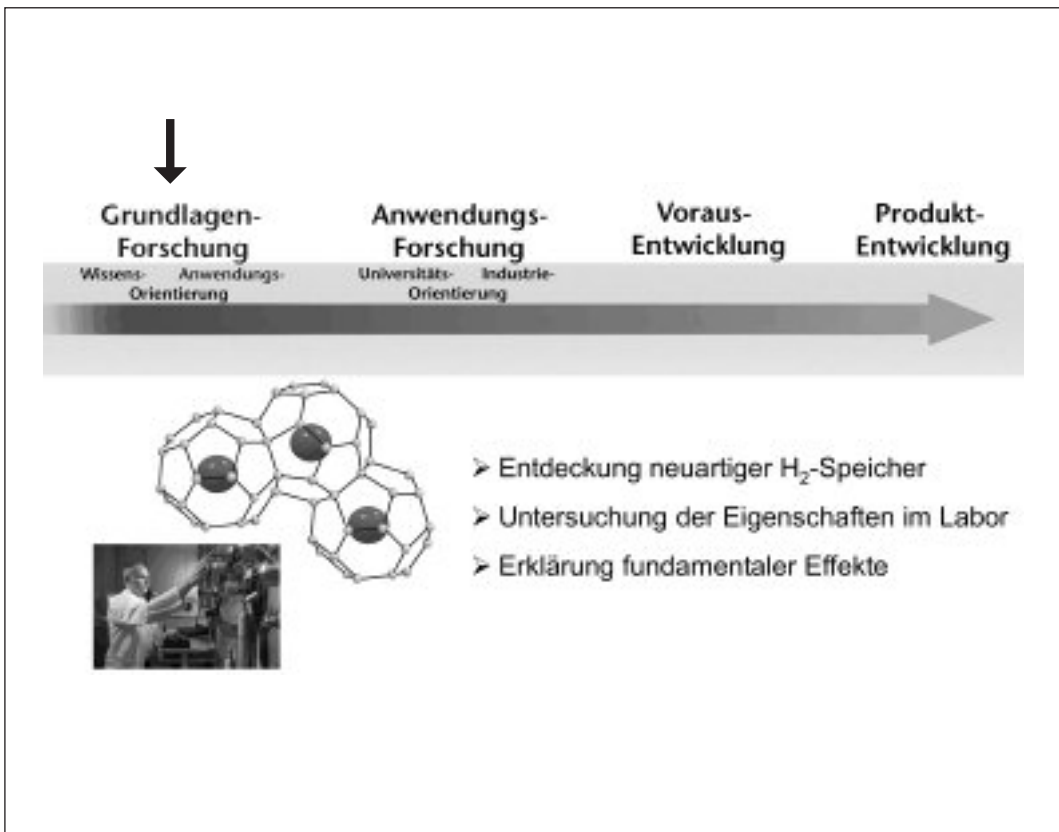
Im Anschluss werden die derzeit viel versprechendsten Forschungsstrategien im Bereich der Festkörperspeicherung präsentiert und deren Betriebsparameter bezüglich der Anforderungen der Autoindustrie eingeordnet.

GM Brennstoffzellen-Fahrzeuge  
1966–2006

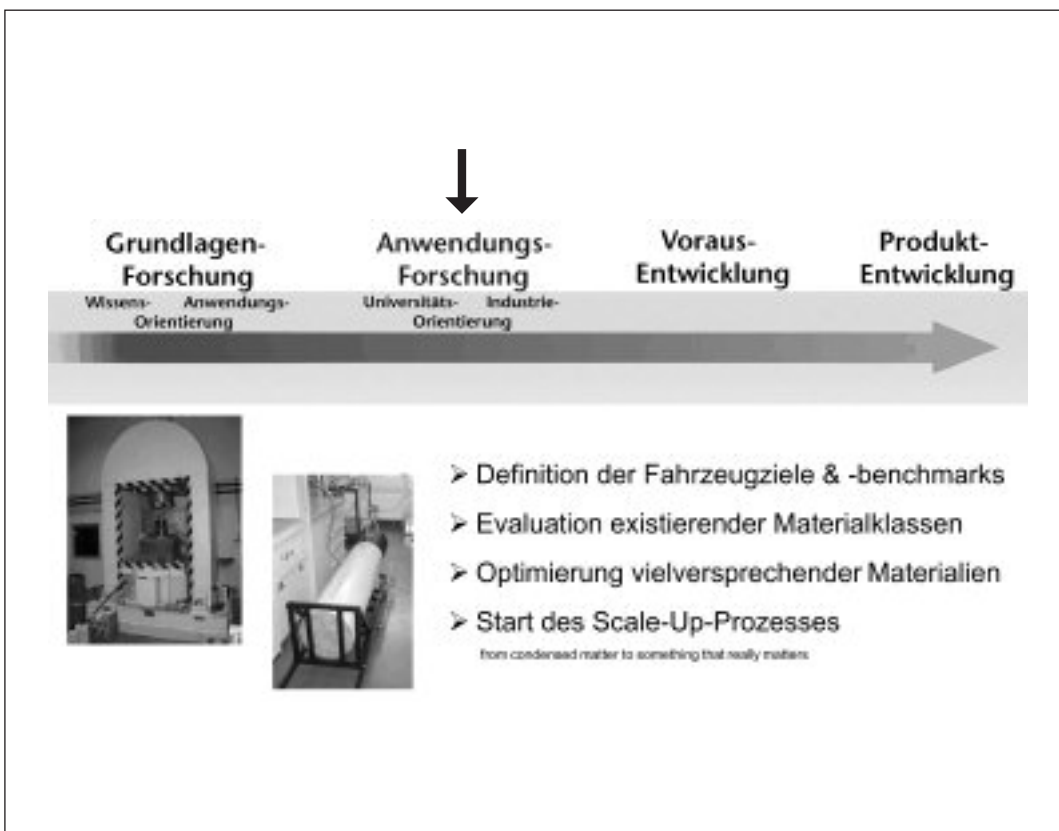


Von der Grundlagenforschung zur Kfz-Technik



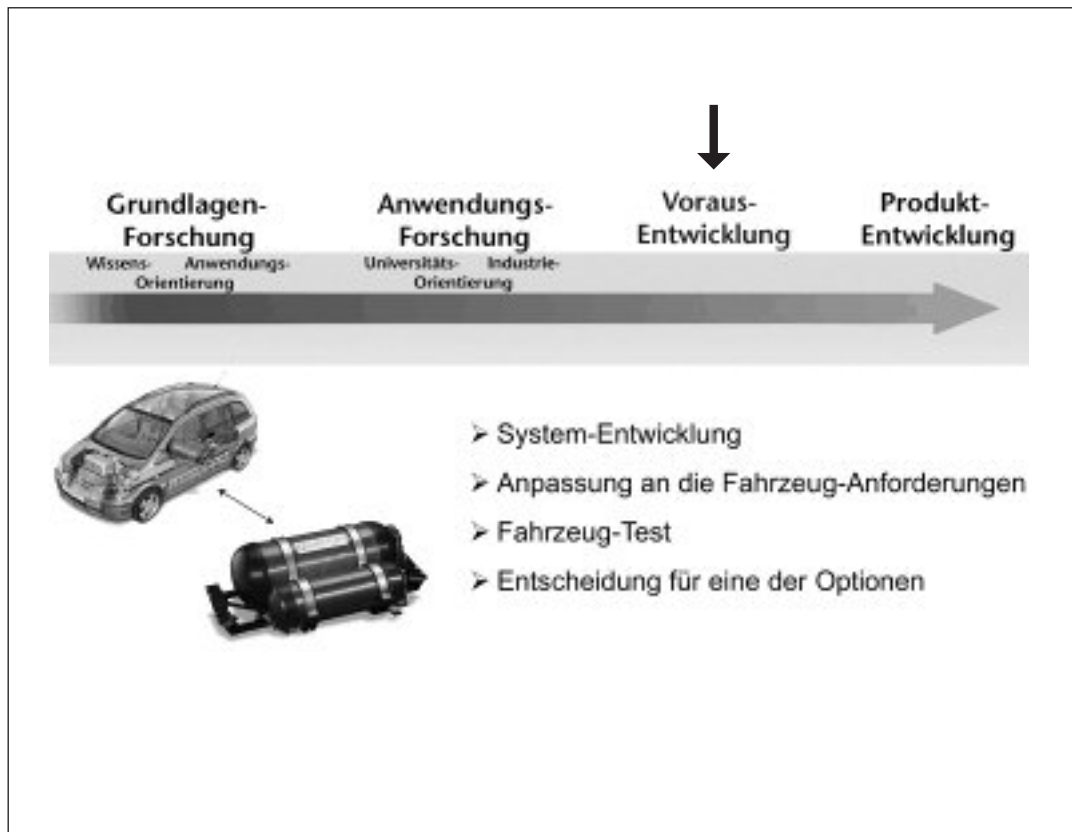


Von der Grundlagenforschung zur Kfz-Technik

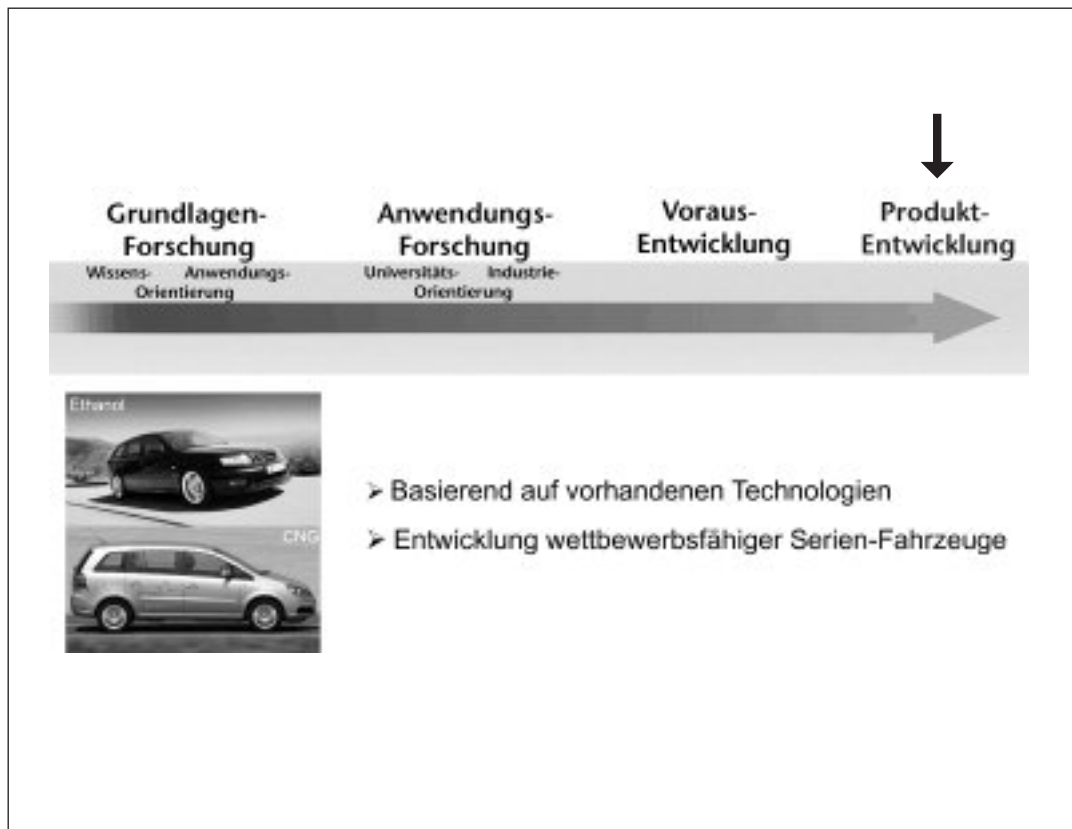


Von der Grundlagenforschung zur Kfz-Technik

Von der Grundlagenforschung zur Kfz-Technik



Von der Grundlagenforschung zur Kfz-Technik



Wasserstoff-Speicherung bei GM

GM R&D Warren - Materialwissenschaft (MI, USA)

GM FCA Mainz-Kastel Systemintegration (Deutschland)

HRL Labs Malibu Materialwissenschaft (CA, USA)

**HRL** LABORATORIES

**Memo:**  
Ein gleichzeitiger Anzeiger GM Ressourcen ist auf das Management Labörateil, externer F & E Projekte konzentriert.

Konventionelle Technologie

Minimaler Wärme-Eintrag (300 K → 20 K)

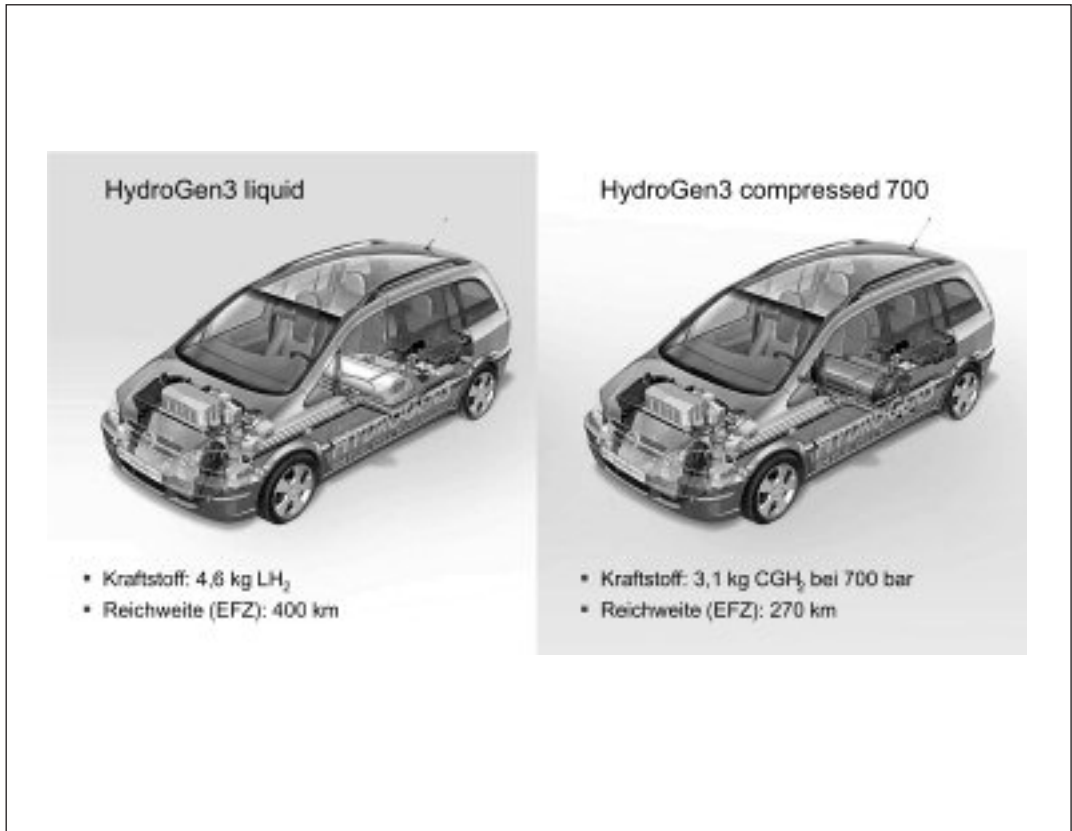
Optimierung des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses

Mechanische Stabilität bei 70 MPa

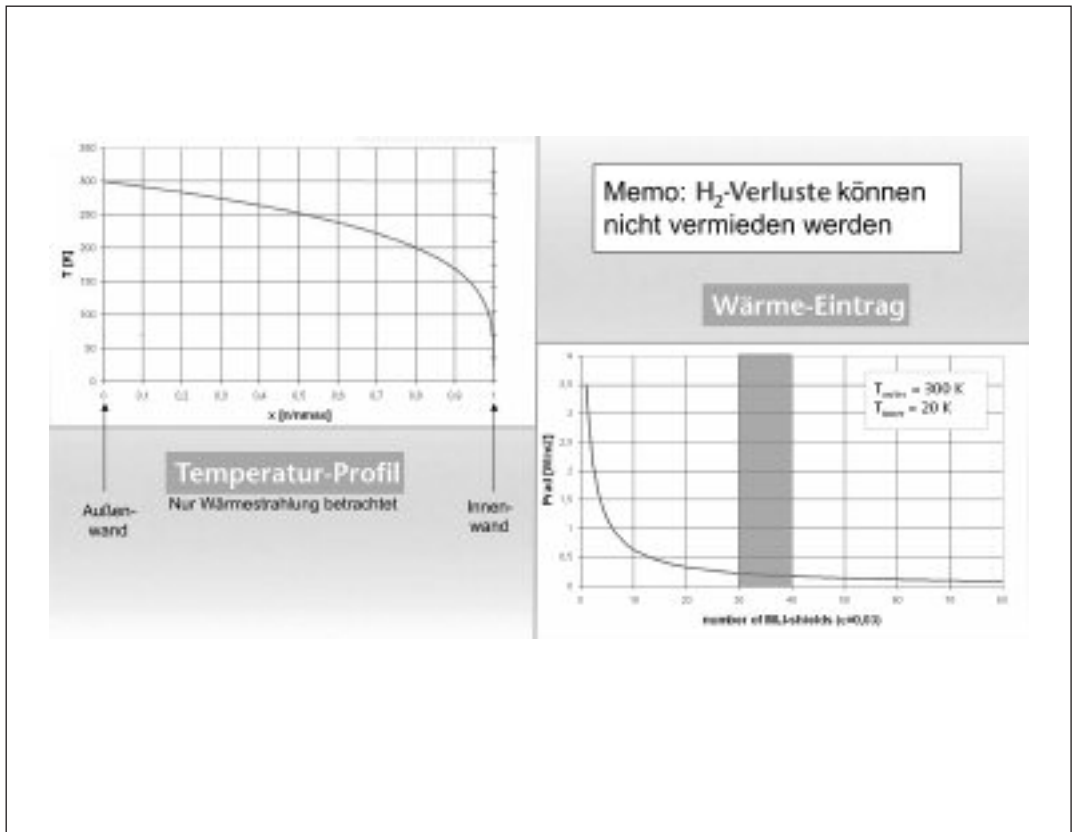
Optimierung der Geometrie

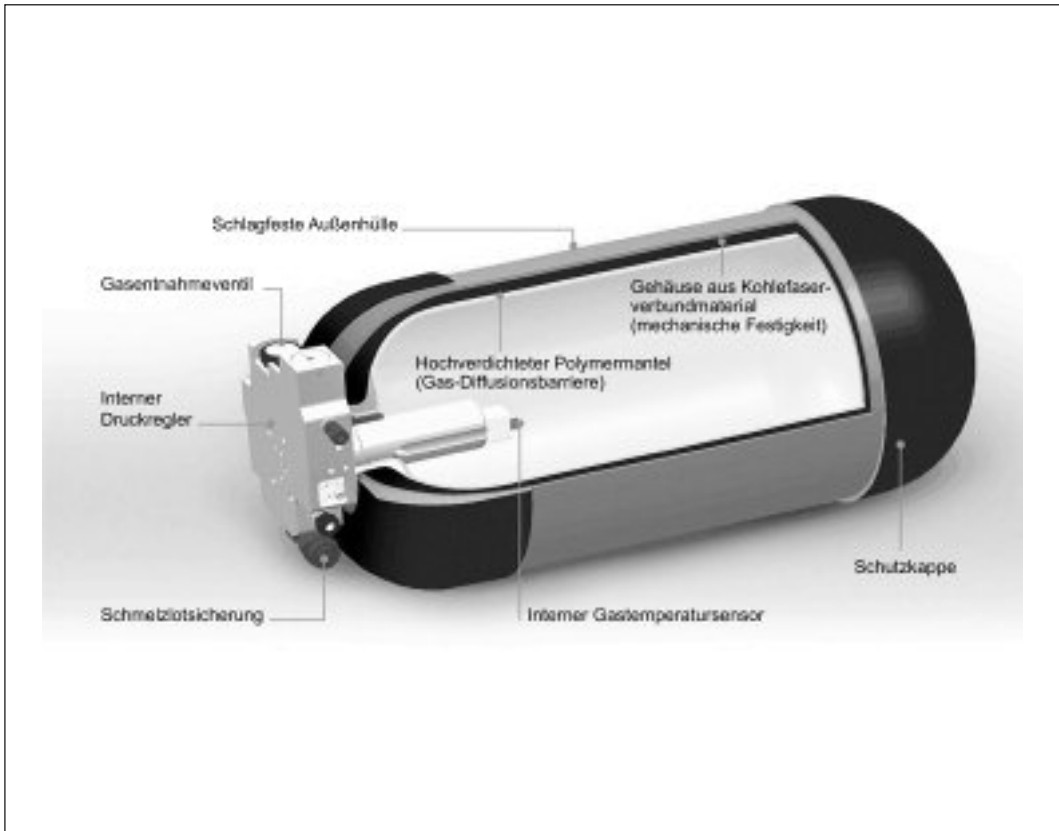
→ LH<sub>2</sub> und CGH<sub>2</sub> Tanks basieren auf einem Zylinder-Design

HydroGen3  
Speicherung von  
Flüssig- und  
Druckwasserstoff

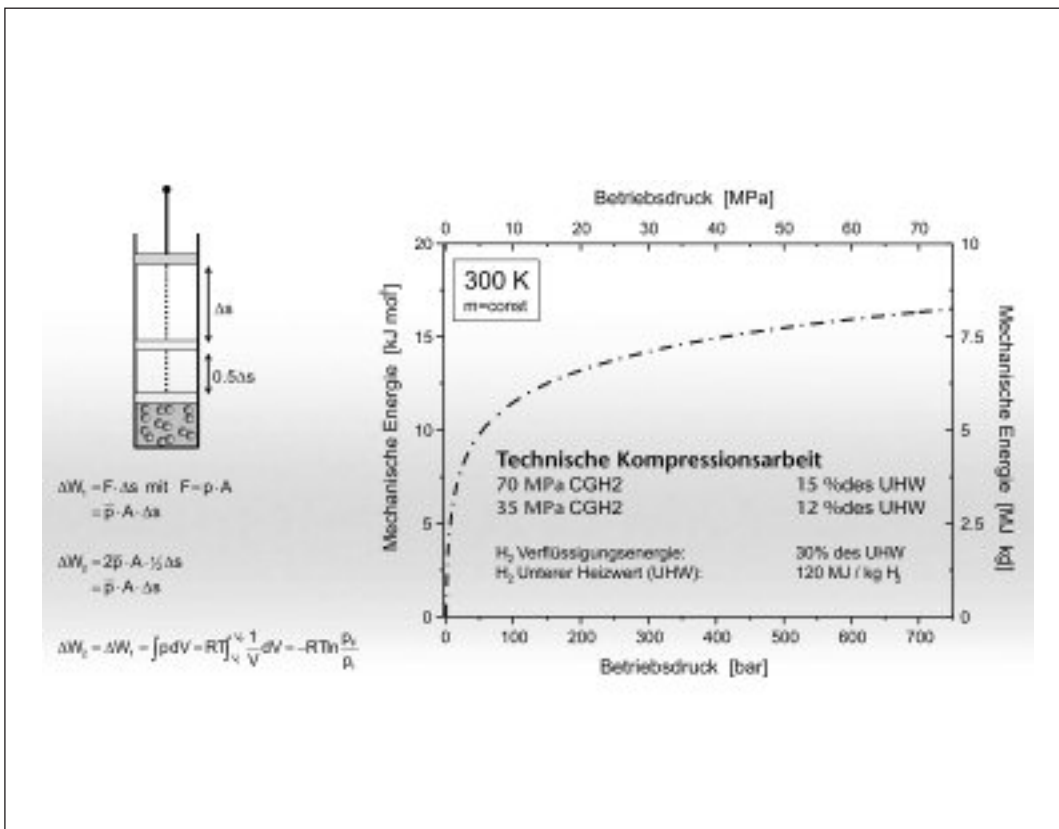


LH<sub>2</sub>-Tanks – Effizienz  
der Wärmedämmung





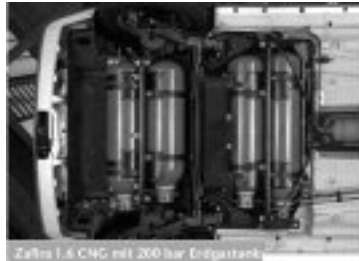
Druckwasserstoff-Speichersystem



Druckwasserstoff  
Mechanische  
Kompressionsarbeit  
für ein ideales Gas  
(isotherme  
Prozessführung)



Wasserstoff-Druckbehälter  
Kohlefaser-Verbundwerkstoff-Tanks sind notwendig



Zafira 1.6 CNG mit 200 bar Erdgas-Tank



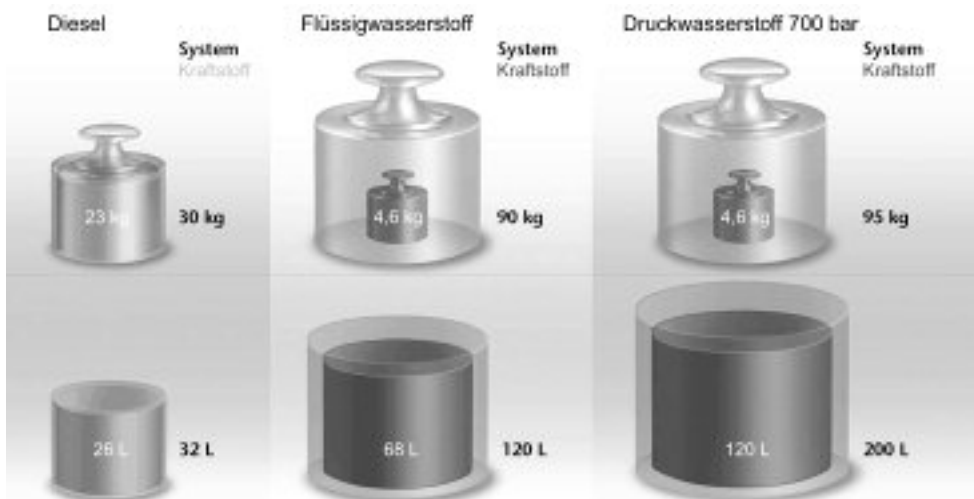
Stahl-Drucktanks für die Wasserstoffspeicherung bei 700 barsind nicht sinnvoll.

Ein 3-Behälter-System (4.2 kg) würde eine Wandstärke von 24 mm aufweisen, was zu einer extrem hohen Tankmasse führt:

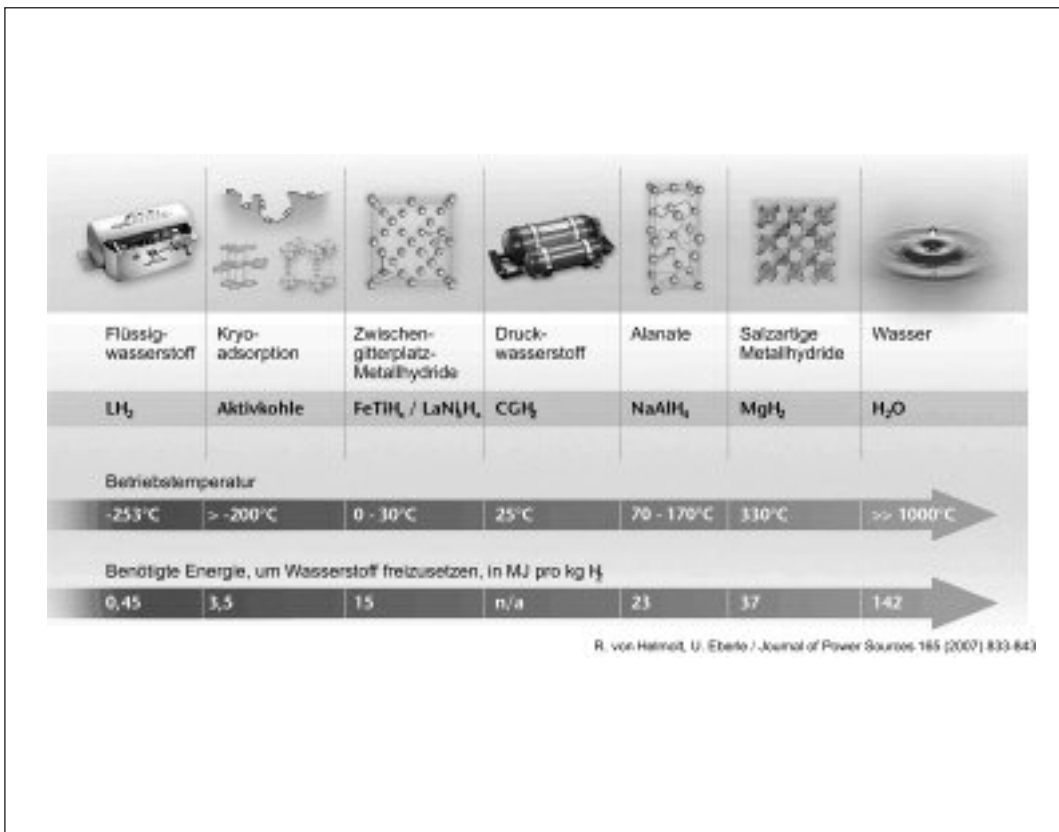
- Stahl: 594 kg
- Kohlefaser-Verbundwerkstoff: 135 kg

	Tensile Strength TS	Density	TS/ρ/g
Steel	1.10 GPa	7.83 g/cm <sup>3</sup>	140 km
T700 Fiber	4.90 GPa	1.80 g/cm <sup>3</sup>	2722 km
T700 Composite	2.45 GPa	1.75 g/cm <sup>3</sup>	1400 km

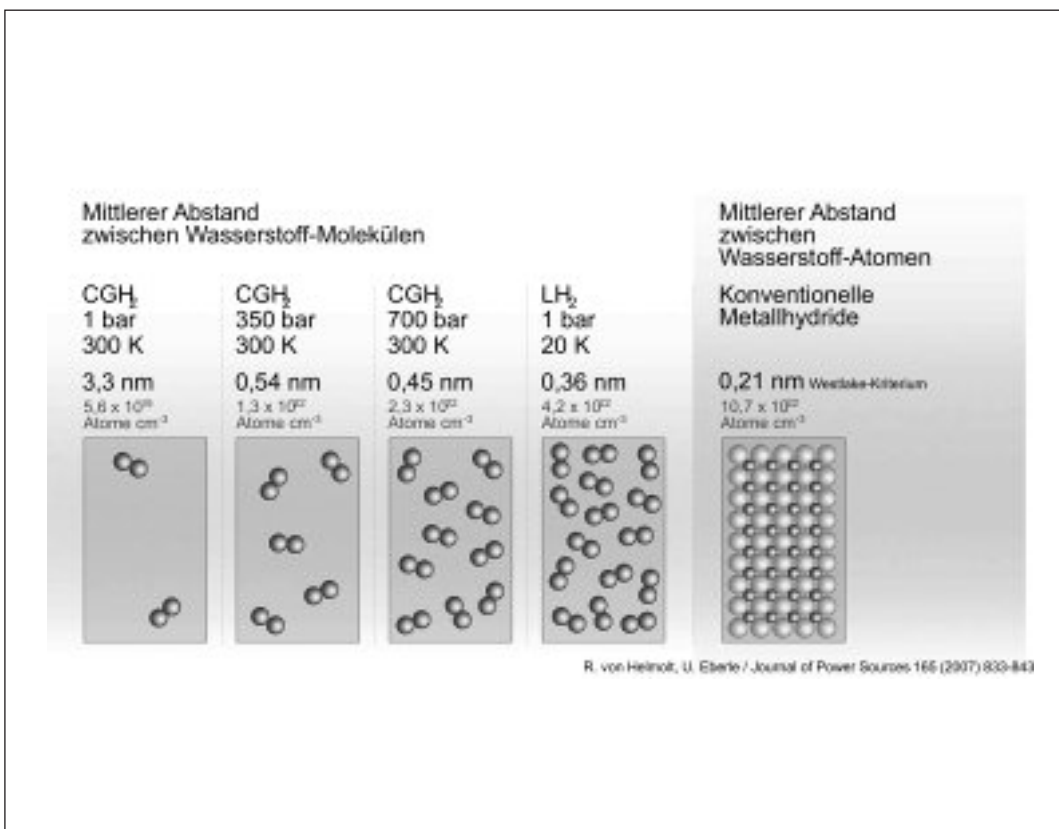
Gewicht und Volumen des Tank-Systems



*Betriebsbedingungen für Wasserstoff-Speichertechnologien*



*Volumetrische Speicherdichte von Wasserstoff*



Ein Blick auf die Zahlen ...

**NaAlH<sub>4</sub>, MgH<sub>2</sub> & Co. weisen drei Herausforderungen auf:**

- **Wärmemanagement**  
 Befüllung mit 5 kg H<sub>2</sub> innerhalb von 5 Minuten (z.B. 25 MJ / kg Enthalpie) 420 kW  
 Onboard-Versorgung der Brennstoffzelle mit 2 g H<sub>2</sub> / s 50 kW
- **Hohe Betriebstemperaturen und -drücke**  
 T > 80 °C und/oder p > 100 bars sind notwendig
- **System-Energiedichte**  
 5 wt.-% auf Materialbasis entsprechen ca. 2,5 wt.-% auf Systembasis  
 Die Packungsdichte eines Metallpulvers ist deutlich niedriger als die „Kristalldichte“

**Behälter**

**Wärme-  
management-  
System**

**Festkörperspeicher**

Gewichtverteilung

U. Eberle, G. Arnold, R. von Helldorf / Journal of Power Sources 154 (2006) 456–460  
 B. Bogdanovic, U. Eberle, M. Felderhoff, and F. Schöth / Scripta Materialia 56 (2007) 813–816

Herausforderungen für Wasserstoff-Speichermaterialien in Festkörpern

**Absorptionswärme / Kinetik**

- Leistungsfähige Wärmetauscher sind erforderlich
- Pulvermaterialien zeigen zu niedrige thermische Leitfähigkeit
- Große aktive Fläche erforderlich, wegen schlechten Wärmeübertrags von Rohrleitungen zu Speichermedium

→ Absorptionswärme muss verringert werden (soweit wie thermodynamisch möglich)

**Betriebstemperatur**

- Thermische Isolierung notwendig
- Wasserstoff muss verbrannt werden, um die Betriebstemperatur aufrecht zu erhalten, falls  $T > T_{BZ-Abwärme} = 80^\circ\text{C}$

→ Betriebstemperatur sollte niedriger sein als die der Brennstoffzelle  $T_{BZ-Abwärme} = 80^\circ\text{C}$

**Betriebsdruck**

- Hochleistungs-Kohlefaser tanks erforderlich
- Sicherheitsaspekte müssen berücksichtigt werden

→ Betriebsdruck sollte kleiner sein als 50 bar

Mögliche Lösungsansätze

A)

B)

C)

**Welche Strategien werden verfolgt?**

- A) Entwicklung von Destabilisatoren für Speichermaterialien
- B) Kryo-Adsorption auf Hoch-Oberflächen-Materialien
- C) Kombinierte Hochdruck- und Hydrid-Anwendungen bei Raumtemperatur

➔ **Technologie-Status: Grundlagen-Forschung**

J. I. Vajo et al. / J. Phys. Chem. B, 2005, 109, 3719–3722  
 M. Felderhoff, C. Weidenhafer et al. / PCCP, 2003, DOI: 10.1039/b101563c

A)

B)

C)

Wegen ihrer niedrigen effektiven Energiedichte und der hohen Komplexität werden Off-board Recycling-Systeme als nicht tauglich für die automobiler Anwendung angesehen.

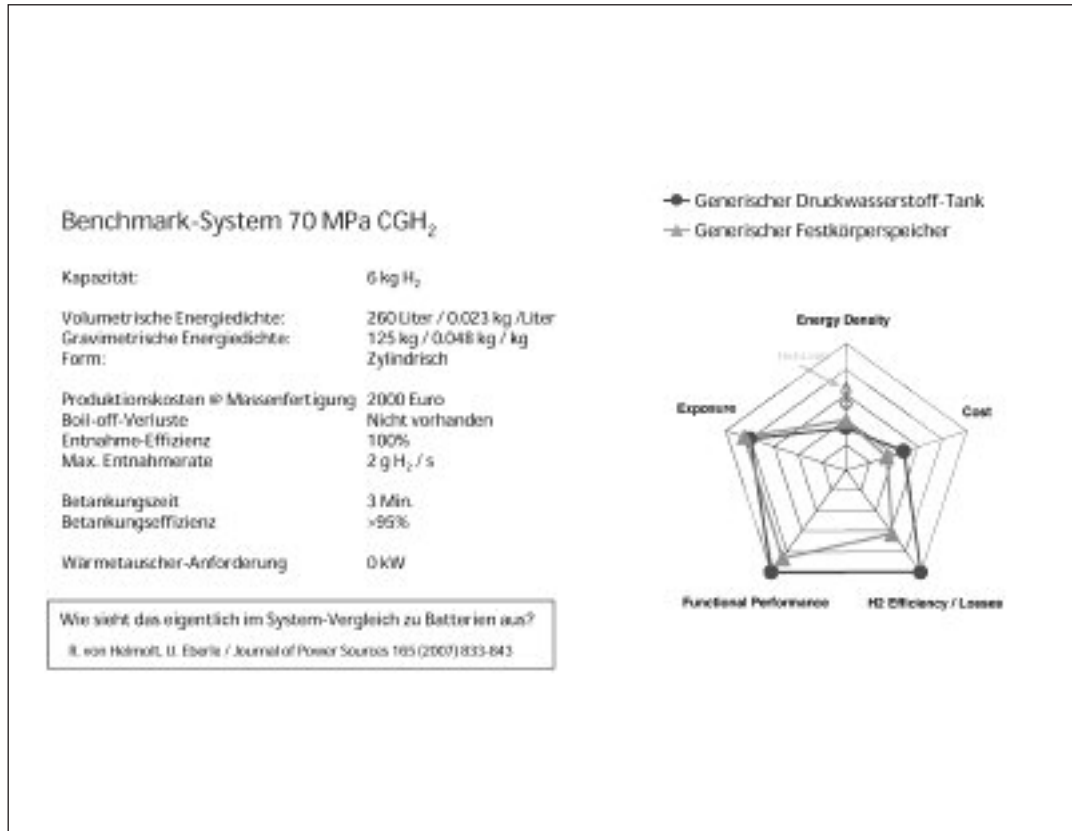
**Welche**

- A) Entw
- B) Kryo-
- C) Komb

➔ **Technologie-Status: Grundlagen-Forschung**

J. I. Vajo et al. / J. Phys. Chem. B, 2005, 109, 3719–3722  
 M. Felderhoff, C. Weidenhafer et al. / PCCP, 2003, DOI: 10.1039/b101563c

Bewertung der H<sub>2</sub>-  
Speicher-Technologien



Abschließend werden aktuelle Fahrzeugprojekte von General Motors im Bereich der Wasserstofftechnologie vorgestellt: Hierbei handelt es sich unter anderem um den „Chevrolet Equinox Fuel Cell“ und das damit verbundene Flotten-Demonstrationsprogramm „Project Driveway“.

*Chevrolet Equinox Fuel Cell*

- Leistung: 73 kW
- Höchstgeschwindigkeit: 160 km/h
- Kraftstoff: 4,2 kg CGH<sub>2</sub> (700 bar)
- Reichweite: 320 km



*„Project Driveway“*

- Mehr als 100 Chevrolet Equinox Fuel Cell ab Herbst 2007 in Kundenhand
- Erfahrungsgewinn aus Kundeneinsatz an drei Orten in den USA: Kalifornien, New York, Washington D.C.
- Chevrolet Equinox Fuel Cell:
  - Entwickelt für eine Lebensdauer von 80.000 km bzw. 2,5 Jahren
  - Kaltstart und Betrieb bei Temperaturen unter 0°C
  - Erfüllt die US-Sicherheitsnorm FMVSS (2007)



Der Chevy Sequel und das Skateboard-Konzept


## Das Auto neu erfinden

**Chevrolet Sequel (Drive-By-Wire Technologie)**


3 Carbon Composite Druckbehälter  
8 kg H<sub>2</sub> @ 700 bar / Reichweite 400 km

72 kW	Brennstoffzelle
65 kW	Li-Ionen Batterie
60 kW	Asynchron-Motor
2 x 25 kW	Radnaben-Motoren
110 kW	Gesamtleistung

Chassis & Body




Sequel 200 Mile Drive, New York, State



15. Mai 2007

Skateboard Chassis



Der Chevy Volt Fuel Cell und das E-Flex-System  
Ein völlig neuartiges Konzept für Zero-Emission-Fahrzeuge (ZEVs)







<b>PEM Brennstoffzelle:</b>	60 kW
Max. Leistung (Peak):	
Li-Ionen Batterie-System:	
Energie:	8 kWh (total)
Max. Leistung (Peak):	50 kW
Spannung:	320 bis 350 V
Ladegrad:	
Typ:	Onboard plug-in
Wasserstoff-Speicher:	
Kapazität:	4 kg H <sub>2</sub> bei 700 bar
<b>Elektrisches Antriebssystem:</b>	
Antriebsmotor (Front), max. mech. Leistung / Drehmoment:	70 kW / 250 Nm (Motor)
Radnabenmotoren, max. mech. Leistung / Drehmoment (x2):	25 kW / 500 Nm (am Rad)
Reine elektrische Reichweite / Gesamt-Reichweite:	20 Meilen / 300 Meilen
Beschleunigung 0 to 60 mph:	6 bis 8.5 Sekunden
Höchstgeschwindigkeit (kurzfristig) (mph):	126 mph



Gemeinsames  
Positionspapier



Gemeinsamer Versuch von Energieunternehmen und Automobilherstellern zur Definition eines kurz- und mittelfristigen Aktionsplans zur Einführung Wasserstoff-basierter Mobilität in Europa

Vorgesehene Einführung von Wasserstoff-Fahrzeugen in drei Phasen:

- Phase I (bis 2010): Technologische Entwicklung und Kostenreduktion
- Phase II (2010 bis etwa 2015): Vorwettbewerbliche Verfeinerung der Technologie und Marktvorbereitung
- Phase III (Start etwa 2015): Markteinführung

Auswahl der Standorte für europäische Lighthouse-Projekte (LHPs):

- LHP für Pkw und Stadtbusse in Berlin (D)
- LHPs für Stadtbusse in Hamburg (D), Brüssel/Rotterdam (B/NL), Madrid/Barcelona (E), Südtirol (I), London (UK), Nordrhein-Westfalen (D) und an anderen Standorten

Zusammenfassung

### Es existieren zwei Optionen für Wasserstoff-Fahrzeuge

Integration in eine Serien-Architektur:  
Platzmangel, Reichweitenlimitierungen



HydroGen3 Antriebs-system und Wasserstofftank

Neuartige Architekturen:  
Optimiert für alternative Antriebe,  
höhere Kosten in der Frühphase



Chevy Sequel Skateboard Chassis

↔

**Trade-Off**

Ist eine Kombination (inkl. Festkörperspeicher) der Vorteile beider Welten denkbar?

**Schlussbemerkung**

Die Elektrifizierung der Fahrzeuge wird in Zukunft kontinuierlich weiter zunehmen