

# **Brennstoffzellen für mobile Anwendungen**

## **Wo stehen wir auf dem Weg zur mobilen Anwendung?**

74. Jahrestagung der DPG und  
DPG Frühjahrstagung, Bonn

*16. März 2010*  
*Dr. Detlef Stolten*

# Leistungsdaten von Batterien

Parameter	Blei	Ni-MH	Li-Ionen
Theoretische spezifische Energie [Wh/ kg]	167	214	420
Spezifische Energie [Wh/ kg]	35...49	45...75	65...150
Spezifische Leistung [W/ kg]	227...310	250...1.000	600...1.500
Energiedichte [Wh/ l]	70...96	125...182	130...300
Leistungsdichte [W/ l]	445...620	600...2.800	1.200...3.000
Kalendarische Lebensdauer [a]	2...6	12	7...10
Zyklenlebensdauer [1.000]	0,1...0,3	2,5...300	2...300
Selbstentladung [1/Monat]	2%...3%	20%...30%	2%...10%
Temperaturbereich [°C]	-30...70	-10...60	-25...50

Daten nach Wallentowitz [2006]; Energiedichte bei 25°C; Spezifische Leistung: Blei- und Li-Ionen-Akkumulatoren bei 10 s, Ni-MH bei 18 s Pulslast (Laden und Entladen); Zyklenlebensdauer: Ni-MH und Li-Ionen: unterer (oberer) Wert für 100% ( $\pm 3\%$ ) Entladetiefe; Temperaturbereich: für in-Betrieb befindliche Zellen

# Herausforderung Lebensdauer und Kosten

## **Lebensdauer:**

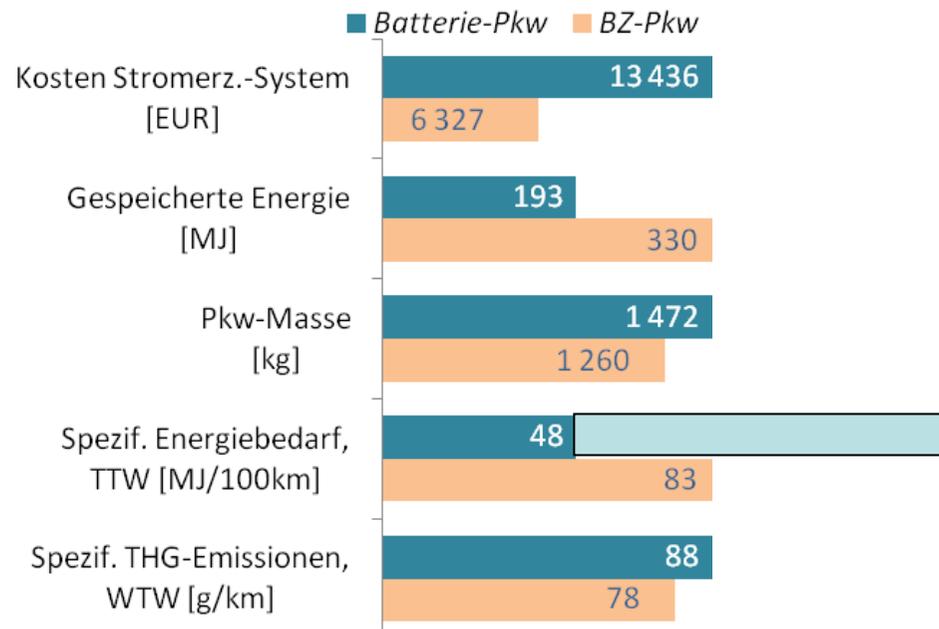
Alterungsvorgänge stark abhängig von Entladetiefe:

geringe Entladetiefe => größere Nennkapazität mit Masse- und Kostennachteil

## **Kosten:**

Kostenprognosen bei Li-Ionen Akkumulatoren schwierig, da künftige Elektrodenmaterialien und Herstellverfahren unklar

# Vergleich Elektrofahrzeuge mit Batterien und Brennstoffzellen



- BZ-Systemkosten: 50 EUR/kW<sub>e</sub> bei 90 kW<sub>e</sub> zuzüglich 15 EUR/kWh<sub>H2</sub> (Druckgasspeicher, 700 bar mit 1,4 kWh<sub>H2</sub>/kg, nach Seyfried [2009])
- Energiebedarf BZ-Pkw: mechan. Energiebedarf am Rad als f(m), 40% Wirkungsgrad im MVEG nach Biedermann et al. [2006]
- THG-Emissionen für H<sub>2</sub> aus Erdgas in Großanlage in Deutschland (nach Biedermann et al. [2006])

# Bewertung

- Die Entwicklung wettbewerbsfähiger Elektro-Pkw mit Batterie oder Brennstoffzelle (BZ) als Hauptstromlieferant ist mittel- bis langfristig angelegt.
- Deutliche Unsicherheiten bestehen bezüglich dem Erreichen wettbewerbsfähiger Antriebskosten
- ‚Unterwegs-Betankung‘ von Batterie-Pkw ist nur mit aufwendigen Batteriewechselsystemen möglich
- Batterie-Pkw für Langstrecken werden auch dann – wegen zum Energievorrat proportionaler Kosten – deutlich teuer sein als Pkw mit Hubkolbenmotoren oder BZ-Elektroantrieben
- Vorteile für Batterie-Pkw gegenüber BZ-Pkw bei THG-Emissionen und Primärenergienutzung sind nur bei gegenüber heute verändertem Strommix erzielbar (spezif. Emissionen/ spezif. Primärenergiebedarf)

# Motivation der Brennstoffzellenentwicklung



## **Triebkräfte**

- Klimawandel
- Energieversorgungssicherheit
- Wettbewerb
- Lokale Luftverschmutzung

## **Technische Vorteile**

- Hoher Wirkungsgrad
- Geringe Emissionen
- Breitere Primärenergiebasis
- Systemvorteile

## **Stationäre KWK**

## **Stationäre Stromerzeugung**

## **Leichte Traktion**

## **Bordstromversorgungen**

## **Portable Anwendungen**

## **Traktion**

# Leitgedanken für zukünftige Fahrzeugantriebe

## PkW

- Brennstoffzellen für Langstrecke und Stadt (schnell nachtankbar)
- Batterie für Kurzstrecken
- Range extender: Batterie hybridisiert mit kleinem Verbrennungsmotor oder kleiner Brennstoffzelle
- Hybride mit Verbrennungsmotor fraglich aus europäischer Sicht; in Asien verfolgt
- Diesel, Benzindirekteinspritzer, homogener Verbrennungsmotor für überwiegenden Autobahnbetrieb
- Eventuell Bordstromversorgung mit Brennstoffzellen separat

## Nutzlastverkehr und Personentransport

- Busse: Brennstoffzellen für Stadt; Diesel für Überlandbusse
- Schwerlastverkehr: Diesel für Antrieb
- Flugverkehr: Kerosin für Antrieb
- Bahn: Strom für Antrieb; Diesel auf Nebenstrecken
- Bordstromversorgungen mit Brennstoffzellen für alle Bereiche von 10 kW bis > 1 MW

## Pkw-Konzepte für rein elektrischen Betrieb

### **Plug-in Hybride**

- Hauptaggregat: Verbrennungsmotor oder Brennstoffzellensystem
- Reichweite im Batteriebetrieb: < 50 km

### **Elektrofahrzeuge mit Batterie und *Range Extender* (RE):**

- Range Extender*: Verbrennungsmotor oder Brennstoffzellensystem
- Reichweite im Batteriebetrieb: 50 bis 100 km

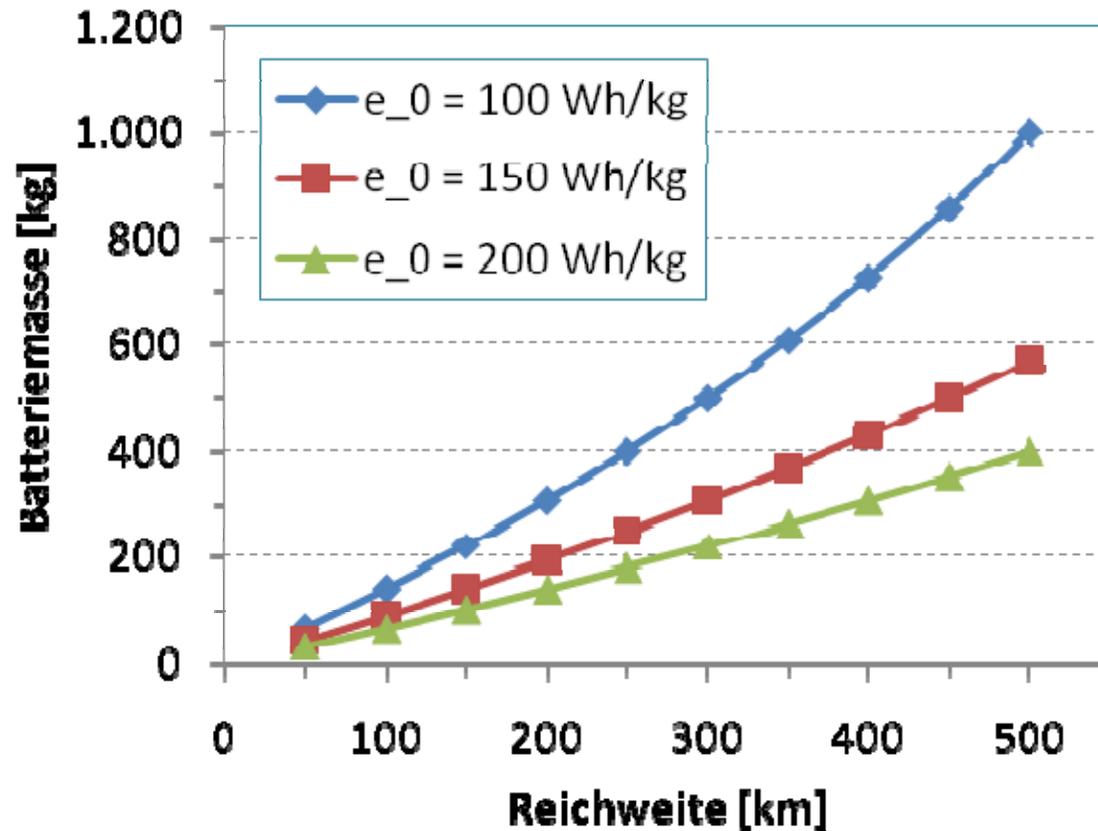
### **Elektrofahrzeuge mit Batterie**

- Reichweite: bis 150 km sinnvoll
- Begrenzung durch Fahrzeugmasse und Kosten
- „Unterwegs-Betankung“ kritisch

### **Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle und Batterie**

- Hauptaggregat: Brennstoffzelle
- Reichweite: > 400 km

## Vergleich zu Batteriefahrzeugen: Reichweite und Batteriemasse

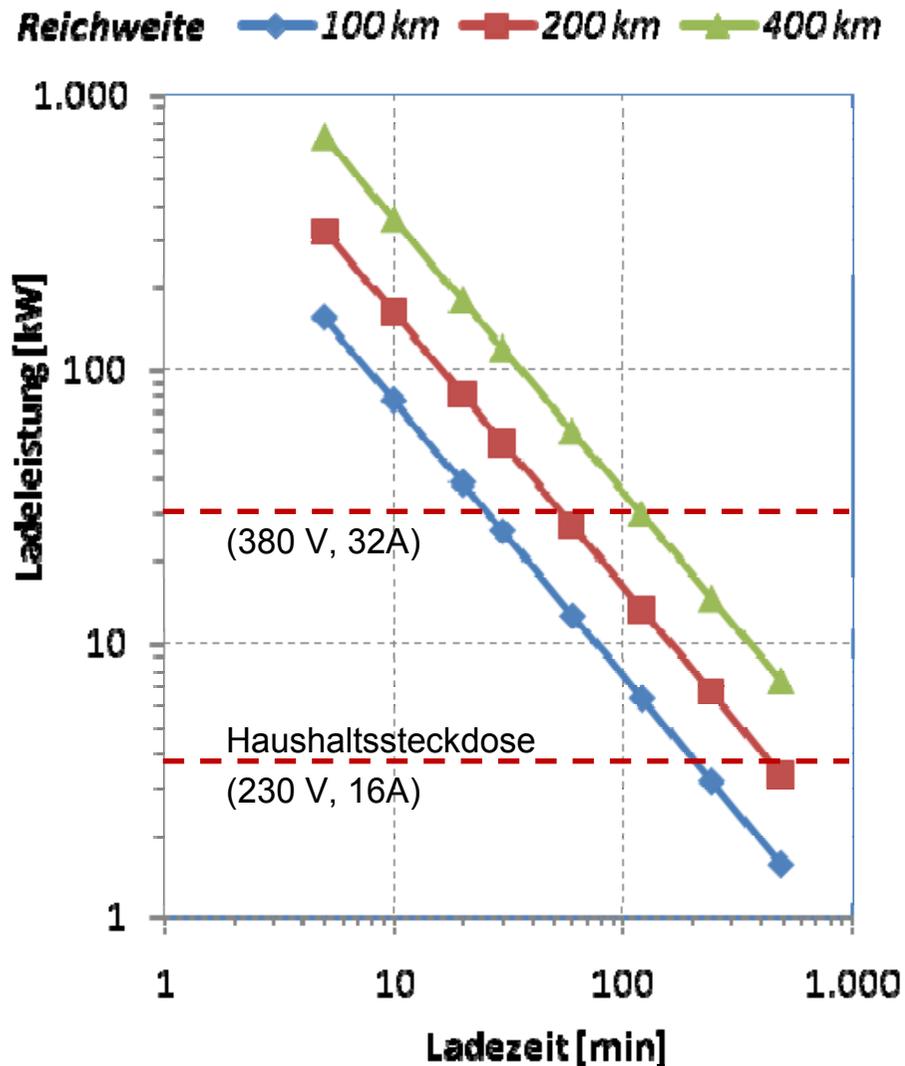


### Annahmen:

- Fahrprofil MVEG
- Fahrzeugmasse (o. Antrieb): 900 kg
- *Wirkungsgrade:*

Batterie entladen:	90 %
Leistungselektronik:	95 %
Elektromotor:	93 %
Kraftübertragung:	95 %
Batterie bis Rad:	76 %

## Vergleich zu Batteriefahrzeugen: Betankung von Batterie-Pkw

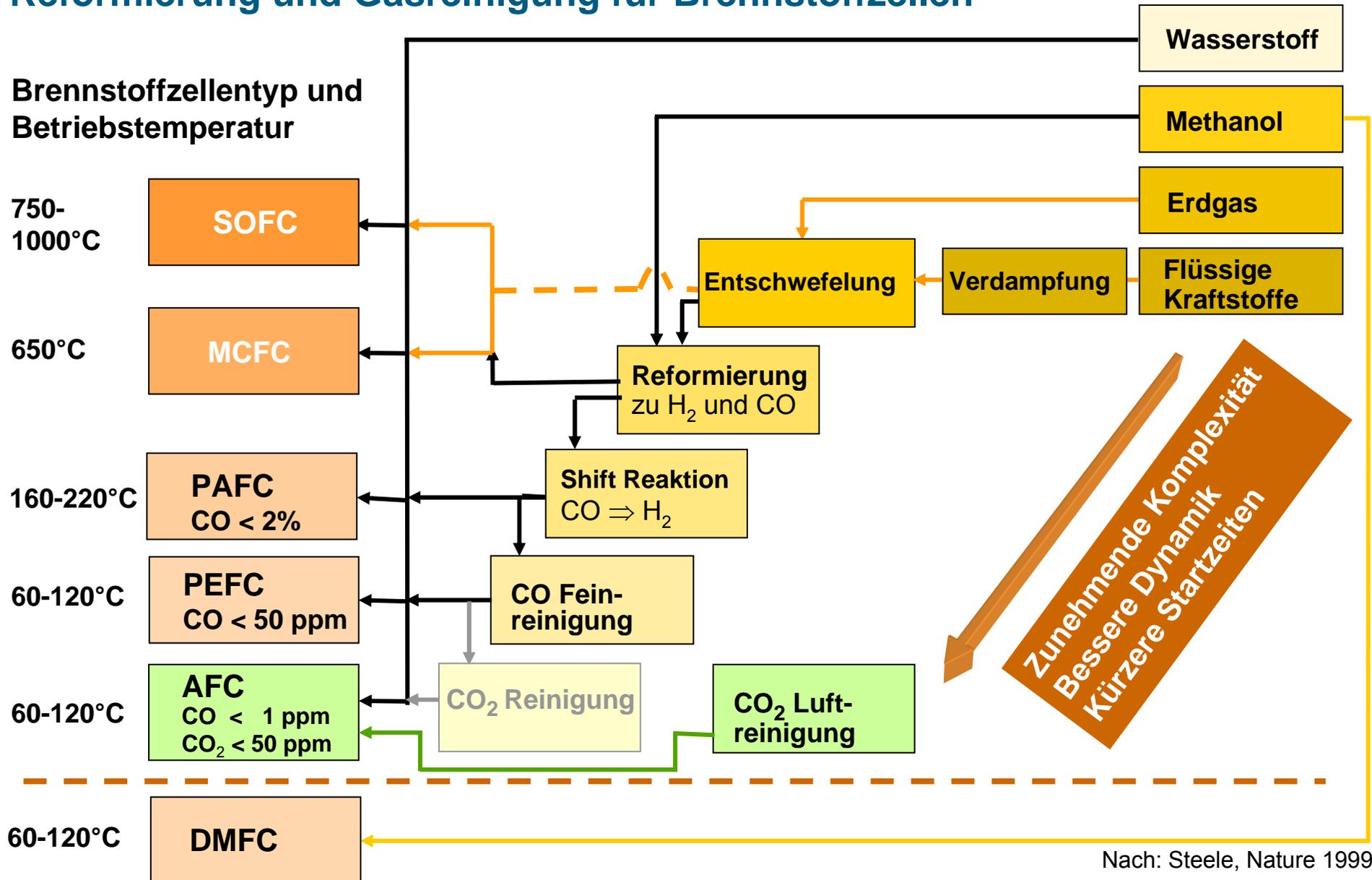


- Batterieladezeiten mit heutiger Stromnetztechnik deutlich höher als heutige Pkw-Betankungsdauer
- „Unterwegs-Betankung“ praktisch nur mit Batteriewechsel möglich.
- Anpassungen im Stromnetz und im Netzmanagement notwendig

# Übersicht über die wesentlichen Brennstoffzellen

Arbeits- temperatur	Brennstoffzelle		Vor- Nachteile	
	Akronym	Elektrolyt		
1000°C	<b>SOFC</b> Keram. IC Metallischer IC	$Y_2O_3$ -dotiertes $ZrO_2$	Guter Wirkungsgrad Einfaches System Interne Reformierung	Sprödigkeit der Keramiken Korrosion mit metall. IC
750°C				
650°C	<b>MCFC</b>	$Li_{0,5}(Na,K)_{0,5}CO_3$	Große Zellfläche Einfache Systeme Interne Reformierung	Korrosion Phaseübergang $l \leftrightarrow s$ Niedrige Leistungsdichte
220°C	<b>PAFC, HT-PEM</b>	e.g. $H_3PO_4$ , PBI	Einfache Kühlung; Kein Wassermanagement	PAFC: fortgeschritten PBI: früher Status
160°C				
120°C	<b>PEFC</b>	Sulfoniertes Polymer	Fortgeschr. Status Gut mit Wasserstoff	Wassermanagement Nicht für Reformierung
60°C	<b>DMFC</b>	Sulfoniertes Polymer	Robust Flüssiger Energieträger	Methanolpermeation Begrenzter Wirkungsgrad

# Reformierung und Gasreinigung für Brennstoffzellen



# Brennstoffzelle und Energieträger für den PkW Antrieb

## **Ausschließlicher Zelltyp für Antrieb: Polymerbrennstoffzelle**

Betriebstemperatur 80-95°C; bis 120°C angestrebt

Start-up von -30°C nachgewiesen

Zyklisierbar

> 5000 h Lebensdauer

## **Energieträger für Antrieb: gasförmiger Wasserstoff 350-700 bar**

Fahrdynamik realisierbar

Hohe Effizienz

Einfaches System an Bord

Gute Lebensdauer

## Daimler B-Class F-Cell

- Small scale production started
- Delivery of 200 vehicles beginning of 2010



<http://media.daimler.com/dcmmedia/>  
Stuttgart 28.8.2009

Drive train	Electric motor with fuel cell
Net power (kW/PS)	100/136
Nominal torque (Nm)	290
Top speed (km/h)	170
Fuel consumption NEDC (l Diesel equivalent/100 km)	3,3
CO2 total (g/km min.–max.)	0,0
Cruising range (km) NEDC	385
Capacity/ power lithium ion battery (kWh/kW)	1,4 /35
Freeze start-up capability	Down to -25 °C

# Honda Clarity

**HONDA**
**FCX  
CLARITY**

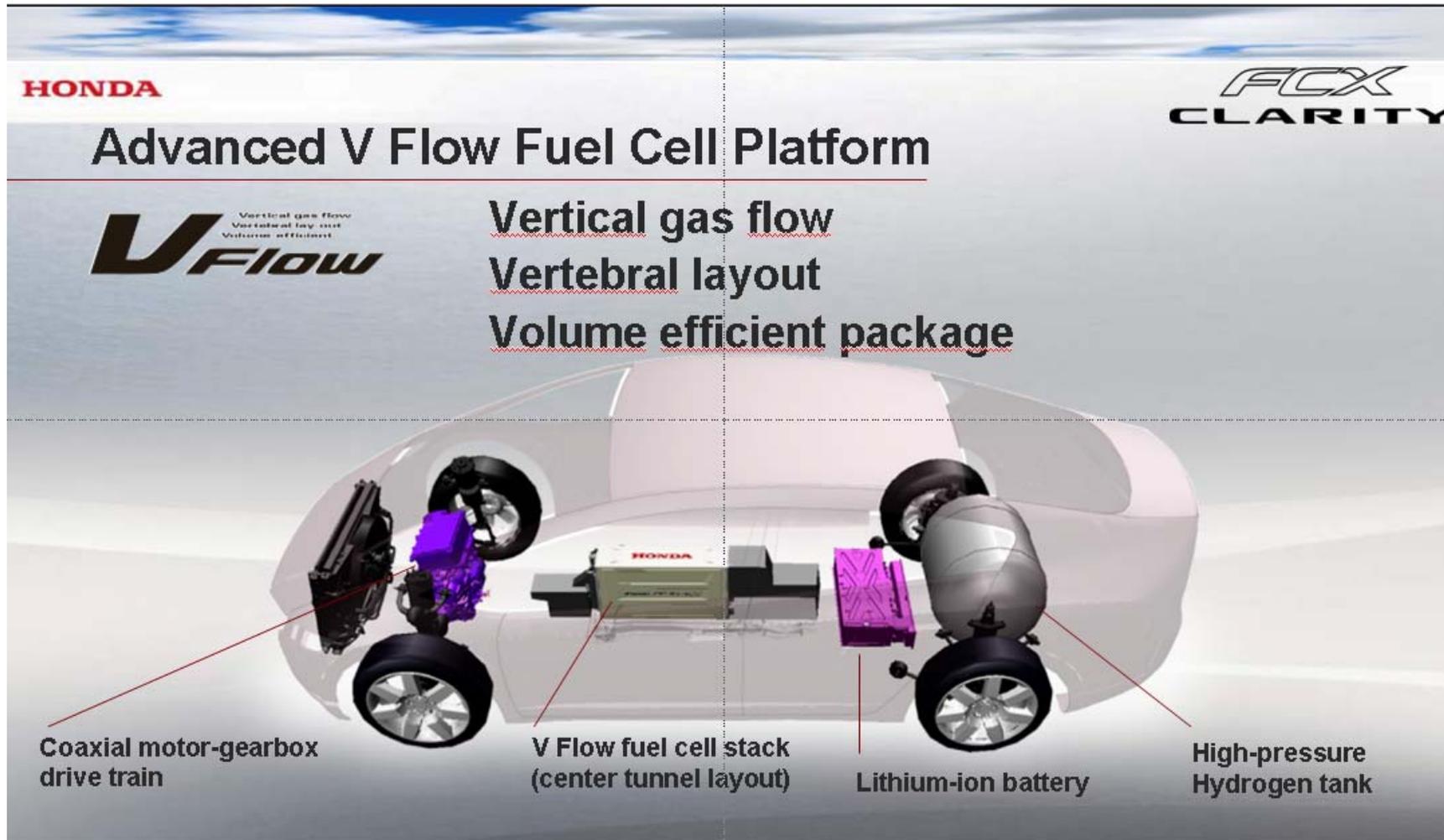
## Specifications, FCX Clarity



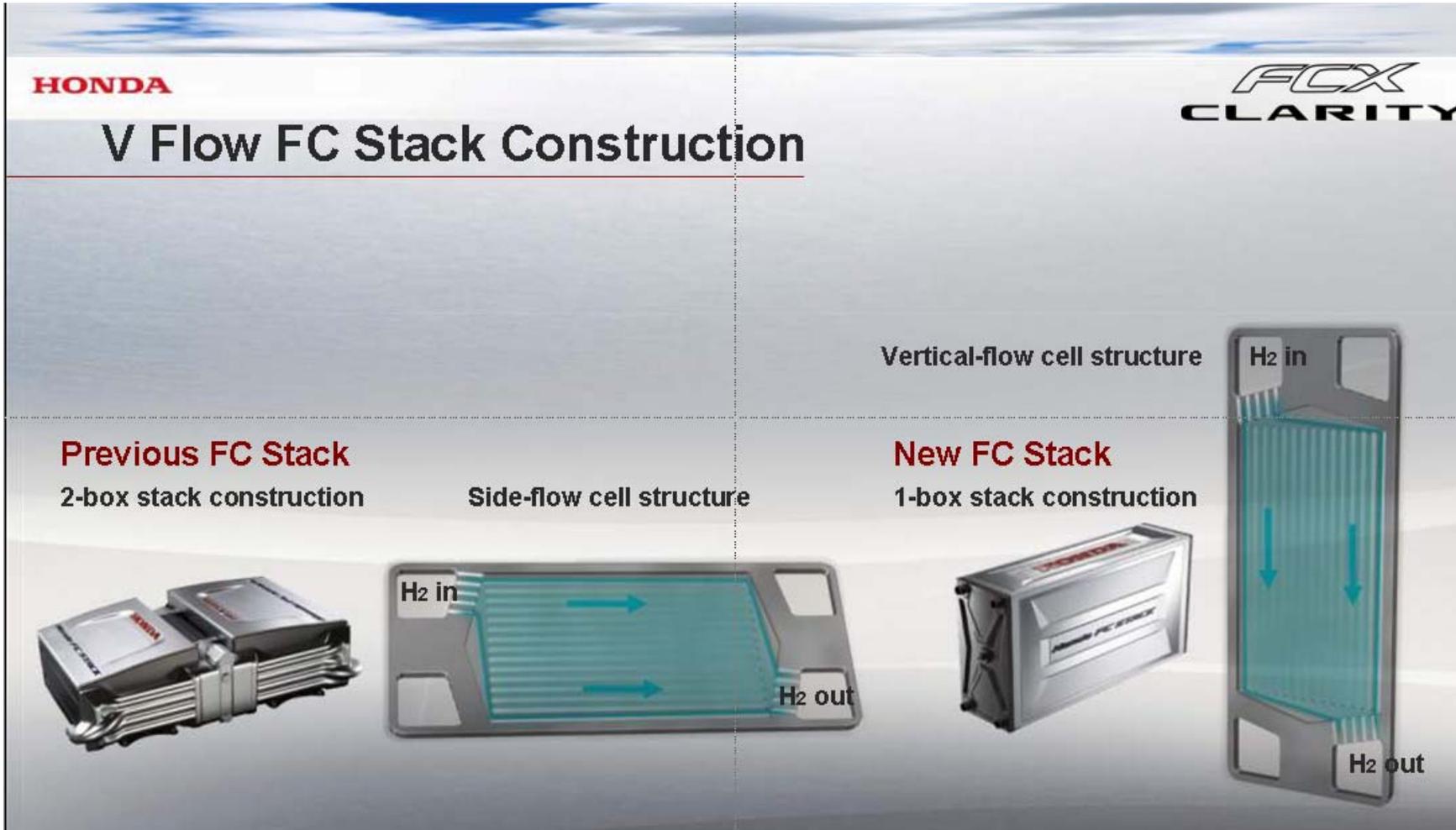
Maximum Speed	160 km/h	Maximum Motor Output	100 kW
Range	270 miles* [434 km] <small>EPA combined mode</small>	Maximum Motor Torque	256 Nm
Fuel Cell Stack Output	100 kW	Energy Storage	Lithium-ion battery
		Hydrogen Tank	171 L (35 MPa)

\*Honda calculation

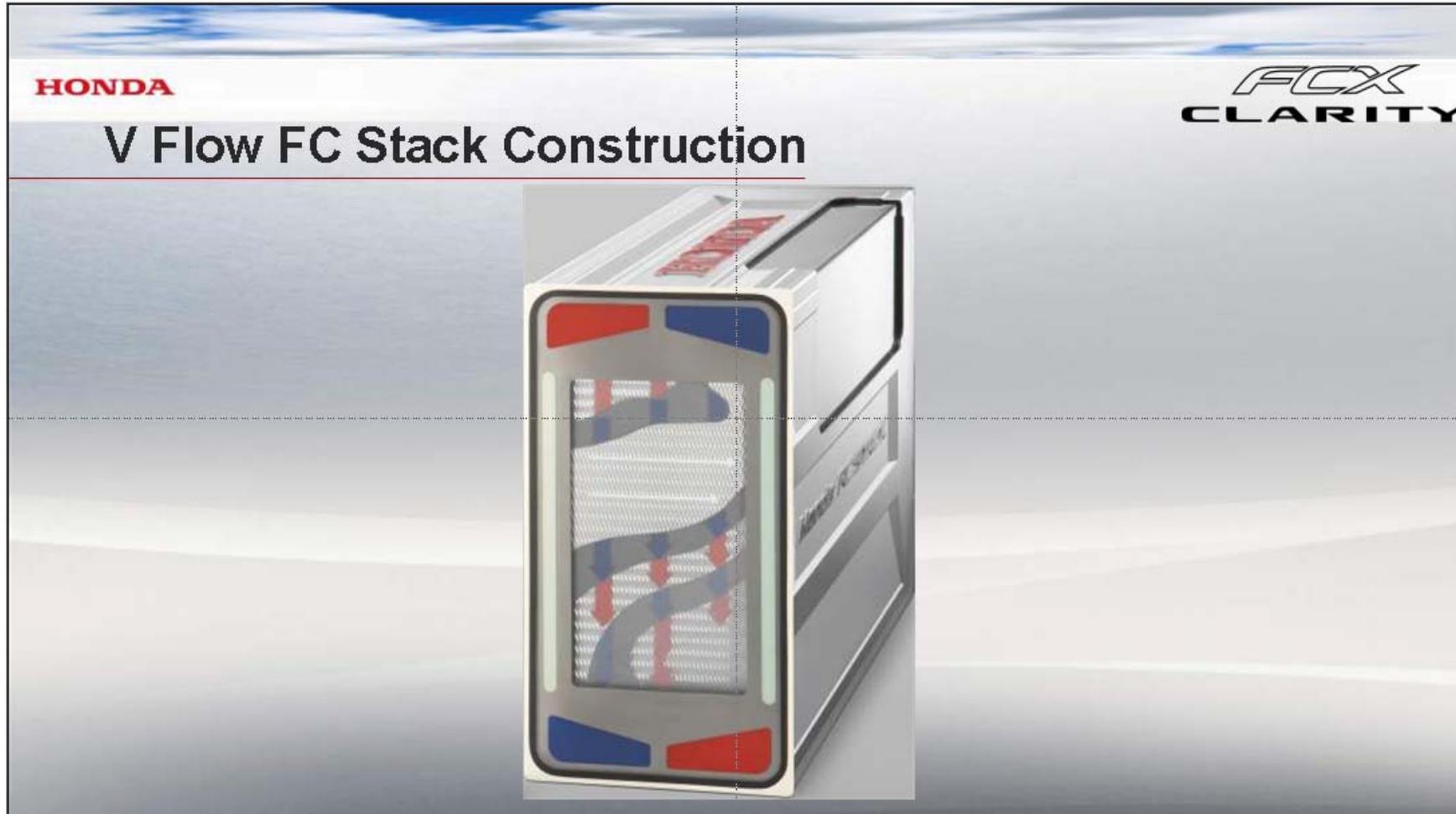
# Honda Clarity



# Honda Clarity



## Honda Clarity



# Honda Clarity

HONDA		FCX CLARITY		
Performance Improvements				
	1999	2003	2006	
Stack Overview				
Output	60 kW	86 kW	100 kW	
Size	134 L	66 L	52 L	
Weight	202 kg	96 kg	67 kg	
Electrolyte Membrane	Fluorine Max. operating temp. 80 °C	Aromatic Max. operating temp. 95 °C	Aromatic Max. operating temp. 95 °C	
- Stack Construction	- Bolt-on type construction - Machined carbon graphite separators	- Panel box construction - Stamped metal separators with unitized seals	- 1-box stack construction - Vertical flow cell structure	
- Separator Structure	- Separate seals			

## Fahrzeugentwicklung

### Es gibt Brennstoffzellenfahrzeuge mit realistischen Spezifikationen

#### Themen sind:

Feldversuche zur Serienreife für Markteinführung

Erprobung beim Anwender

Zuerst ausgesuchte Anwender, dann zunehmend generelle Anwender

Über Kleinserien mit zunehmender Seriengröße zur Serienreife

#### Weiterentwicklungen hinsichtlich

Kosten

Design

Herstellung

Lebensdauer

Zuverlässigkeit

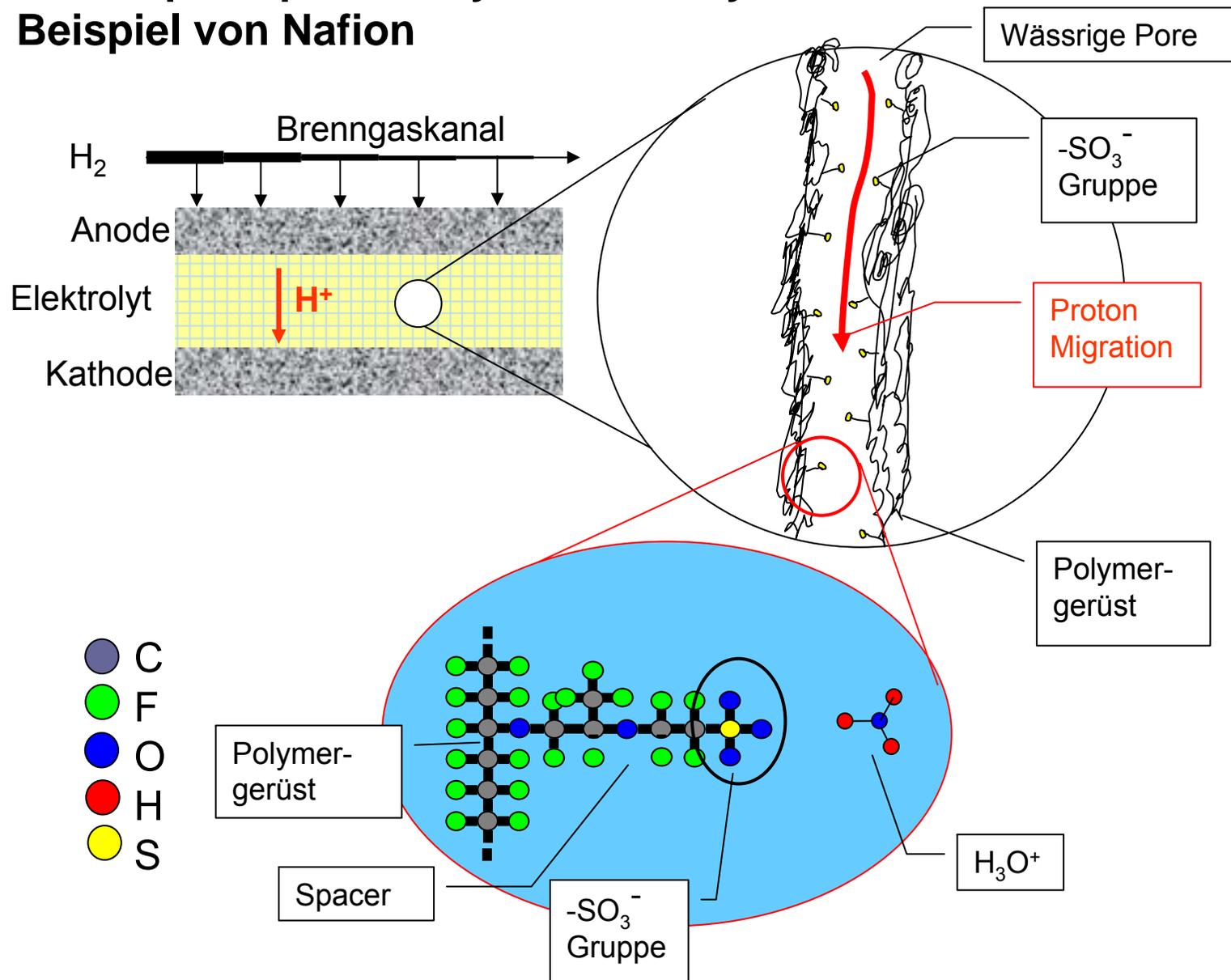
Anwenderfreundlichkeit

freeze start-up

cold start-up time

etc.

# Arbeitsprinzip des Polymerelektrolyten am Beispiel von Nafion



## F&E Themen: Wasser- und Wärmemanagement

Sulfonierte, perfluorierte Membranen haben sehr gute Eigenschaften:

- Gute Leitfähigkeit
- Gebundene Säure
- Mechanische Widerstandsfähigkeit
- Aber: sie benötigen Wasser
- Arbeitstemperatur auf ca. 80°C begrenzt

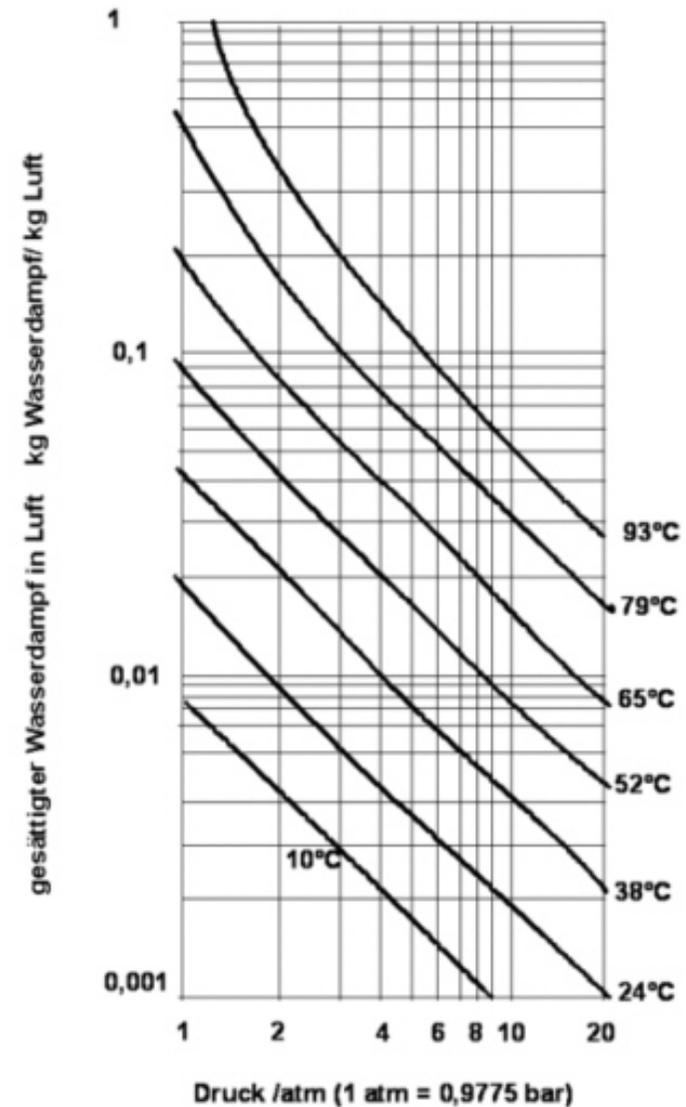
Anforderungen:

- Wasserautarkie des Systems
- Geringe thermische Last des Wassermanagements
- Kühlung des Systems auch bei 60°C unter Motorhaube

Lösungswege:

Erhöhter Systemdruck 2-4 bar für Wassermanagement  
 „Trockener“ leitfähige Membranen  
 Höhere Arbeitstemperatur bis 120°C für Kühlung

Verdampfungsenthalpie von Wasser  $\approx 2300 \text{ kJ/kg}$   
 $\approx 41 \text{ kJ/mol}$

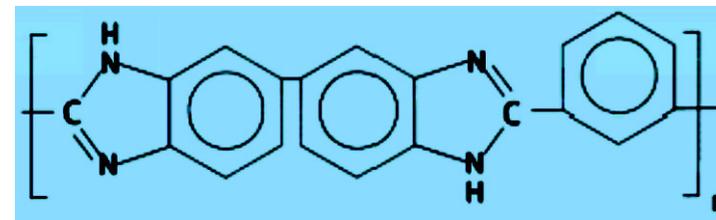
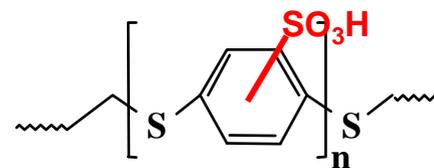
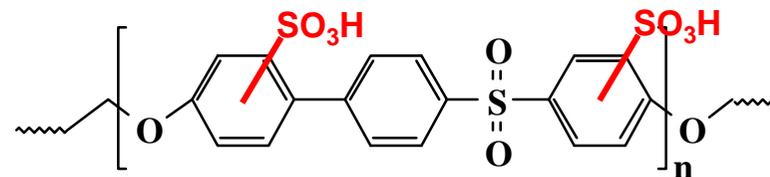
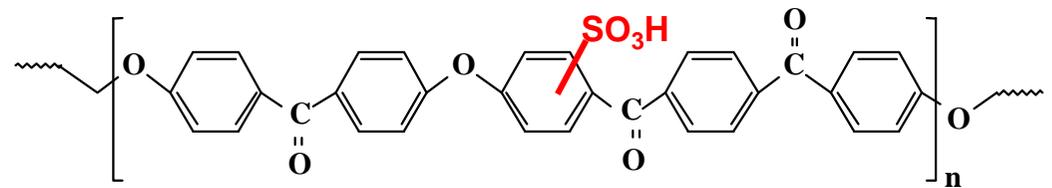
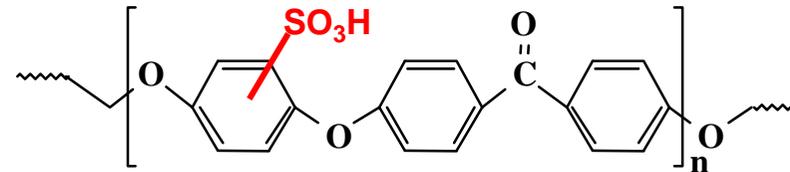


Nach: Perry's Chemical Handbook  
 7th ed., p.2-90



# Neue Materialien

Materialklasse	Abkürzung	Ionische Gruppe
Polyetherketon	PEEK	-SO <sub>3</sub> H
	PEKEKK	-SO <sub>3</sub> H
Polyphenylensulfon	PPSU	-SO <sub>3</sub> H
Polyphenylensulfid	PPS	-SO <sub>3</sub> H
Polybenzimidazol	PBI	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>



## Weitere Ansätze zur Optimierung der Materialeigenschaften

### Zielgrößen:

- **Mechanische Stabilität**
- **Quellung**
- **Leitfähigkeit**

### **Mikroskopisch heterogene Materialien → Nafion**

- Ein hydrophobes Makromolekül mit hydrophilen Gruppen
- Phasenseparation im nm-Bereich

### **Makroskopisch heterogene Materialien → Gore Select**

- Inerte Polymermatrix
- Ionomer eingebracht
- Gefüge im  $\mu\text{m}$  bis mm-Bereich

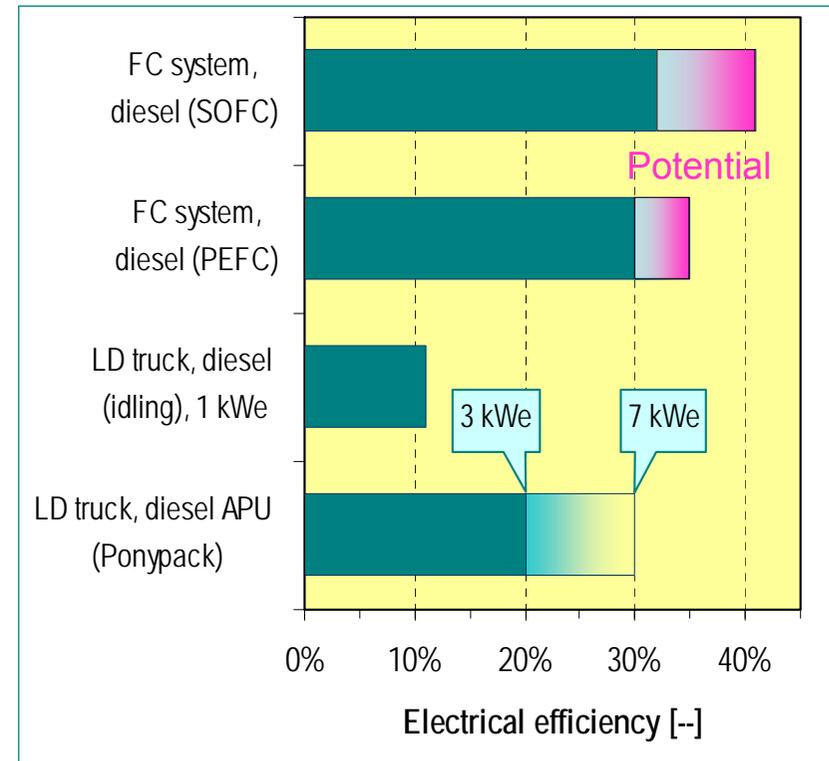
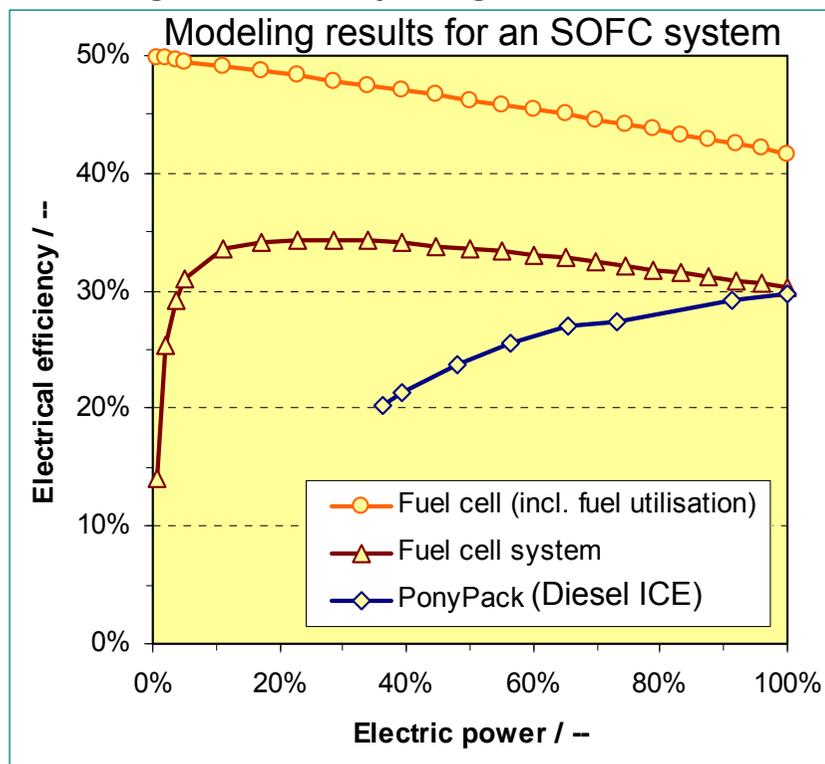
### **Homogene Materialien → Ballard** (perfluoriertes Polystyrolpolymer)

- Ein hydrophobes Makromolekül mit hydrophilen Gruppen
- keine Phasenseparation

- Blends aus verschiedenen fluorfreien Basispolymeren (z.B. PEEK-PPS)
- Vliesverstärkung
- Mehrschichtsysteme

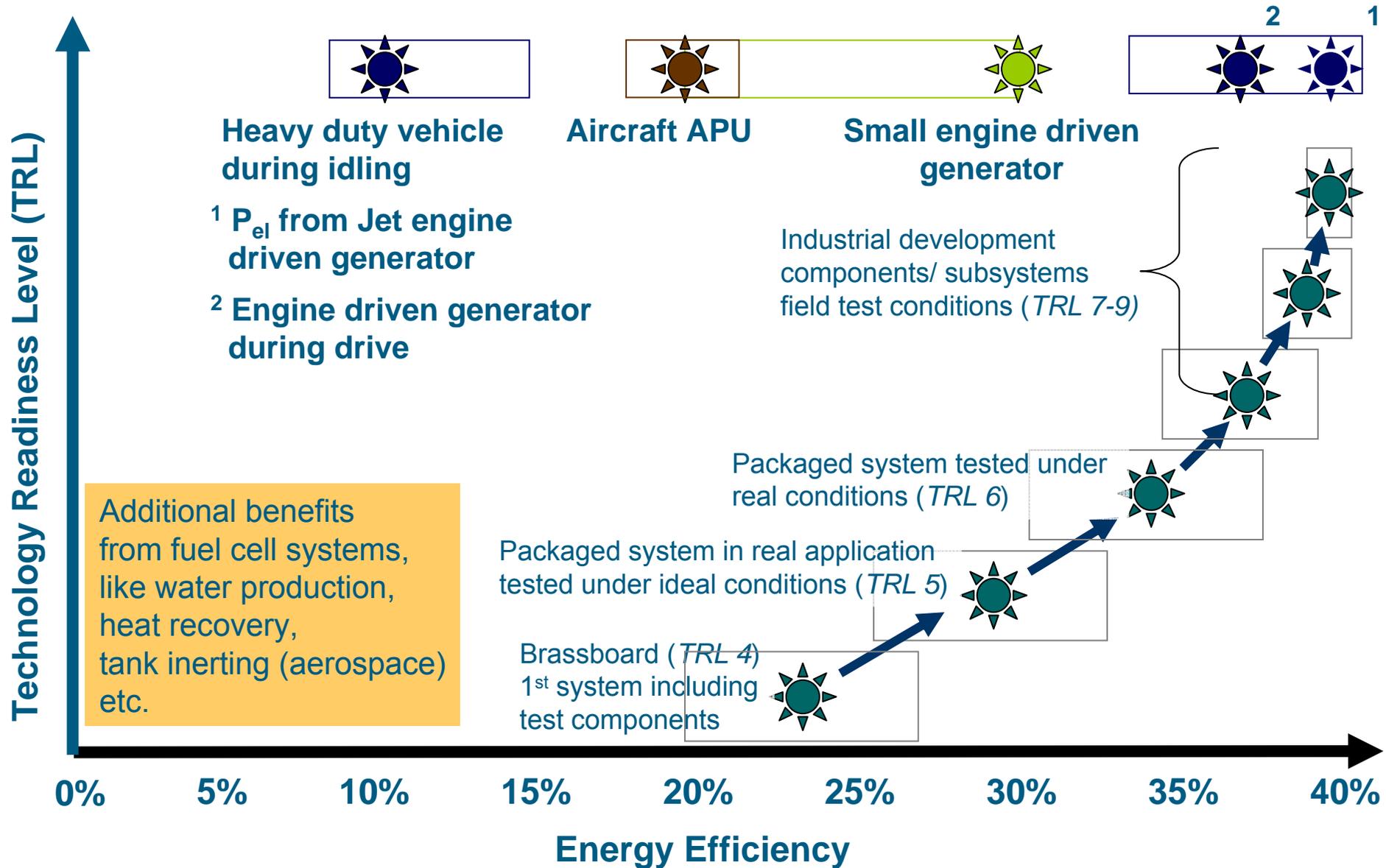
# On-board Power Generation

- APUs show substantial advantages over idling truck engines
- Fuel Cell APUs such as PEFC and SOFC based ones offer significantly higher efficiencies at partial load

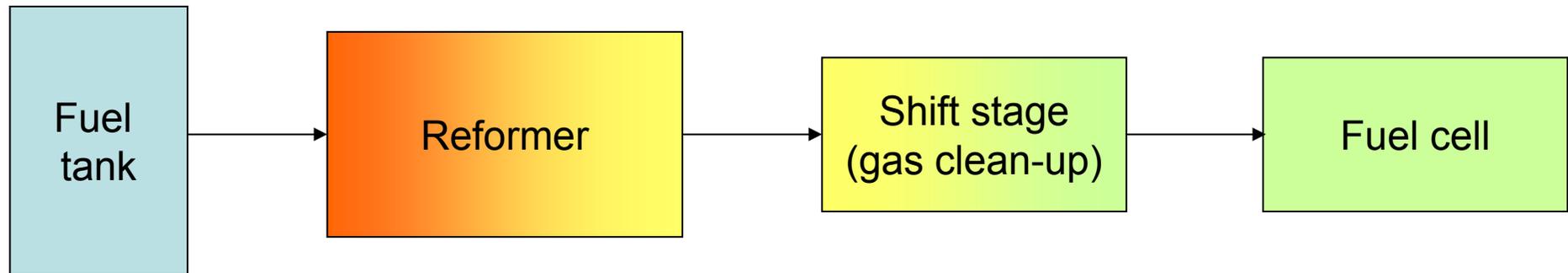


APU...Auxiliary power unit; FC...Fuel cell, LD...Long-distance; SOFC...Solid oxide fuel cell

# Systems Development with Regard to Systems Efficiency



## Simplified Block-Diagram of an APU



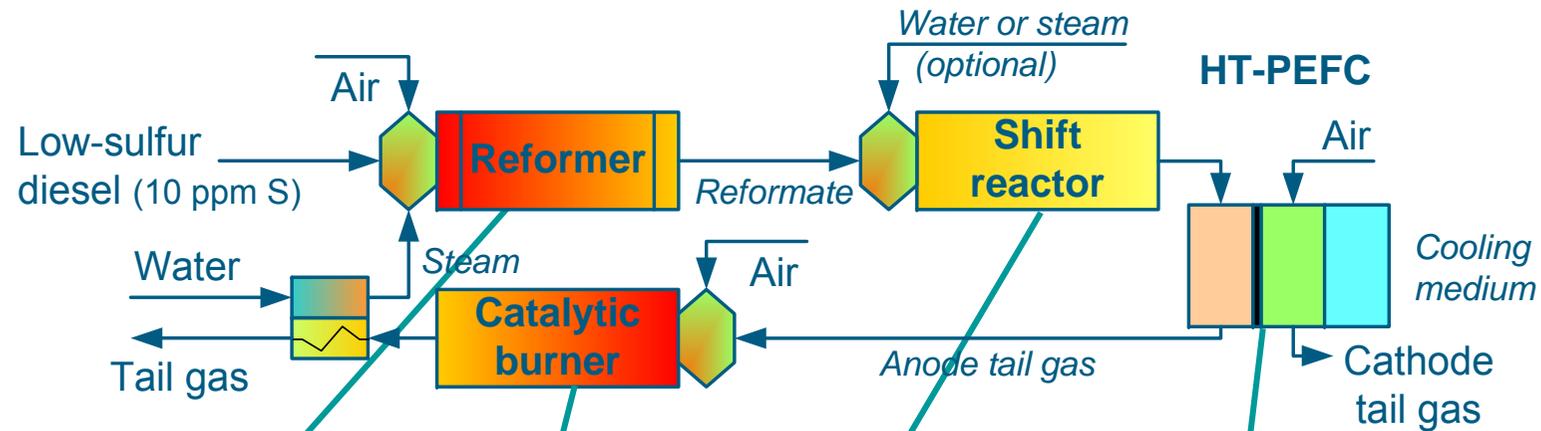
# Fuels for Transportation Applications

Options APU in mobile application	LPG	Alcohols	Gasoline	Kerosene	Diesel	Heating oil	Marine Gas Oil
<p><b>Important thermodynamic and chemical property data of fuels</b> ! – Attention; X – difficult to solve</p>							
	Boiling range					!	X
	Residue					!	X
	Aromatics			X	!	!	!
	Di-, Tri and Poly aromatics					X	X
	S content	!			X		X
	S species				!		X

# Comparison of Fuel Cell Concepts With regard to APU Applications

Low temperature fuel cells	High temperature fuel cells
<p><b>Advantages:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Quick start-up</li> <li>Mechanically benign electrolyte</li> <li>Solid electrolyte with fixed acid</li> </ul>	<p><b>Advantages:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tolerant to impurities</li> <li>Nickel as Catalyst (cheap)</li> </ul>
<p><b>Disadvantages:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Low CO-Tolerance</li> <li>Intricate water management</li> <li>Ineffective cooling because of low operating temperature</li> </ul>	<p><b>Disadvantages:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Brittle electrolyte (SOFC)</li> <li>Corrosive Electrolyte (MCFC)</li> <li>Valuable materials for peripheral components (Ni-base alloys)</li> <li>Long start up procedures</li> </ul>
<p><b>High Temperature PEFC (120-180°C)</b></p>	
<p><b>Advantages:</b> Enhanced cooling, CO-tolerance about 1%, benign temperature level</p>	
<p><b>Disadvantages:</b> high cathodic overpotential</p>	

# Juelich APU Design and Components for 5 kW Class APUs



**ATR 8**



**CAB 3**



**WGS 3**

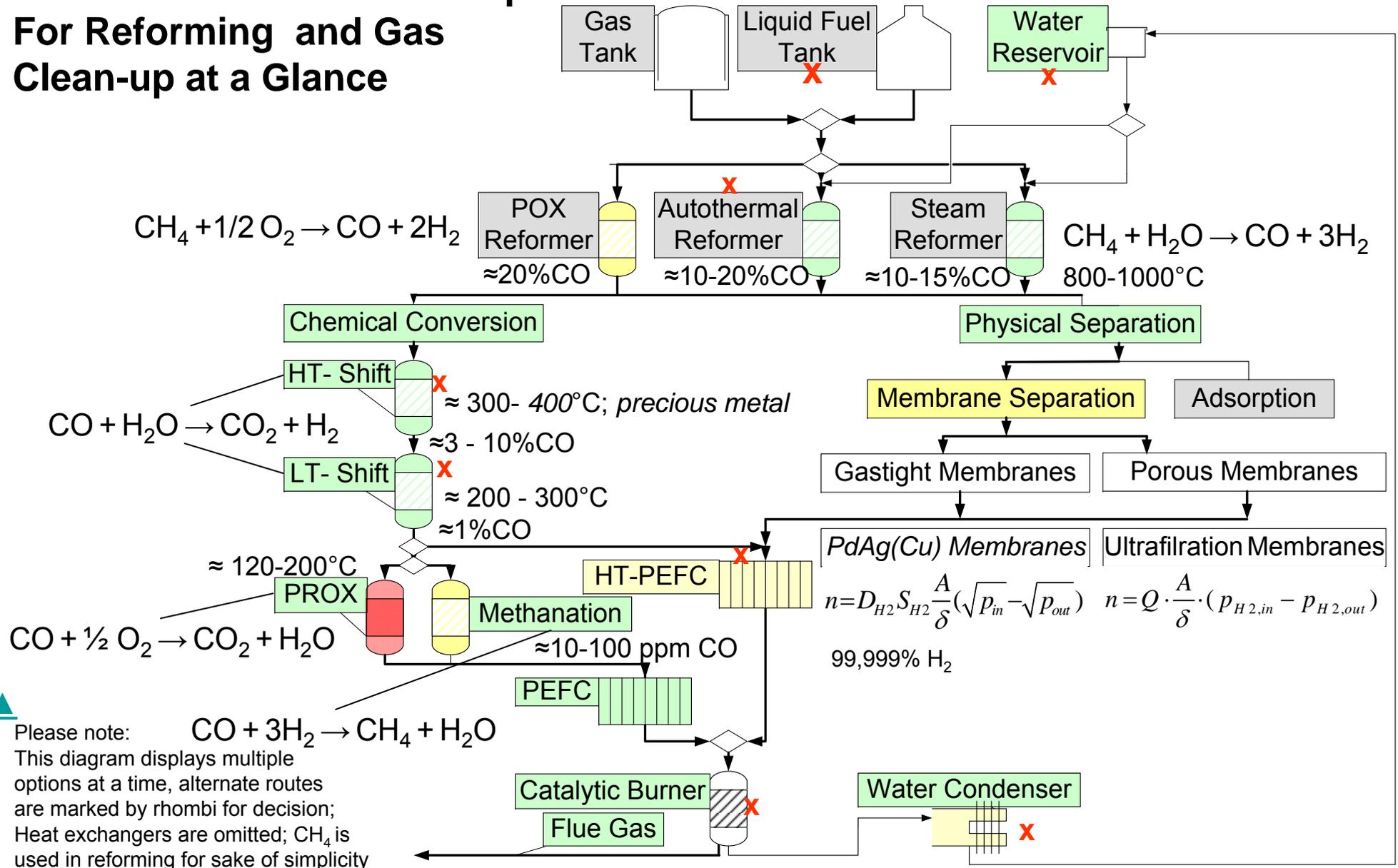
**1G HT-PEFC Stack**



**2G HT-PEFC flow field**



# The Most Prominent Concepts For Reforming and Gas Clean-up at a Glance



Please note:  
 This diagram displays multiple options at a time, alternate routes are marked by rhombi for decision; Heat exchangers are omitted;  $\text{CH}_4$  is used in reforming for sake of simplicity

## Die Rolle von Wasserstoff in der Energiewirtschaft

### **Wasserstoff ist ein guter Energiespeicher verglichen mit Stromspeichern**

Zusammen mit Brennstoffzellen kann Wasserstoff saubere Energielösungen ermöglichen

- Wasserstoff ist bei der Verwendung CO<sub>2</sub>-frei
- Ist frei von lokalen Emissionen (NO<sub>x</sub> mit Brennstoffzelle, SO<sub>2</sub>, Ruß)

### **Wasserstoff kann einen Energieknoten darstellen mit hoher Flexibilität**

- Er kann aus den meisten Energieträgern hergestellt werden
- Er kann in Brennstoffzellen, Motoren und Turbinen in vielen Anwendungen verwendet werden
- Er kann wie Erdgas über Gasleitungen verteilt werden
- Er kann flüssig angeliefert werden (Übergangsszenario und abseits von Pipelines)

### **Wasserstoff ist ein Sekundärenergieträger**

- Wasserstoff muß aus Primärenergien hergestellt werden
- Wasserstoff ist so CO<sub>2</sub>arm, wie der Primärenergieträger es bei der Herstellung erlaubt

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit  
Bitte merken Sie sich folgenden Veranstaltungstermin  
vor.

18 WHEC 2010  
**18<sup>th</sup>**  
**World Hydrogen Energy Conference 2010**  
May 16–21, 2010,  
Essen, Germany

Host and organizer

EnergieAgentur.NRW 

Under the auspices of

International Association for  
Hydrogen Energy (IAHE)



In cooperation with



First major sponsor

**VORWEG GEHEN**  
The energy to lead

Supported by



EUROPEAN UNION  
Investing in our Future  
European Regional  
Development Fund



Erkennbar für Geldverwendungszwecke



wirtschaftsförderung@metropoleruhr

