

Brennstoffzellen für mobile Anwendungen Wo stehen wir auf diesem Weg?

Detlef Stolten

AKE Herbstsitzung 2010
Bad Honnef, 21.10.2010

Institut für Energie- und Klimaforschung – Brennstoffzellen (IEK-3)

Rahmenbedingungen und Umfeld

Institut für Energie- und Klimaforschung – Brennstoffzellen (IEK-3)

Neue Energielösungen



Treiber

- Anthropogener Klimawandel
- Energieversorgungssicherheit
- Wirtschaftsfaktor Energie
- Lokale Emissionen

Technische Ansätze

- Hoher Wirkungsgrad
- Erweiterte Primärenergiebasis
- Speicherkonzepte
- (Inhärent) saubere Techniken

Ziele

- CO₂ Emissionen reduzieren
- Breite Primärenergiebasis
- Innovative Produkte
- Keine Emissionen am Auspuff

Grand Challenges

- Erneuerbare Energien
- Elektromobilität
- Effiziente Großkraftwerke
- Kraft-Wärme-Kopplung



Pkw-Konzepte für elektrischen Betrieb

Plug-in Hybride

- Batterie wird über Stromnetz geladen: Elektrofahrzeug für Kurzstrecken
- Bedient Spitzenlasten: Lastmanagement von Hauptaggregat vs. Anforderungen
- Hauptaggregat: Verbrennungsmotor oder Brennstoffzellensystem
- Reichweite im Batteriebetrieb: < 50 km; nachtankbar über chemische Energieträger

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

- Range Extender*: Verbrennungsmotor oder Brennstoffzellensystem
- Reichweite im Batteriebetrieb: 50 bis 100 km
- Unterschied zum Plug-in: nur chemische Energieträger; kein Strombezug aus Netz

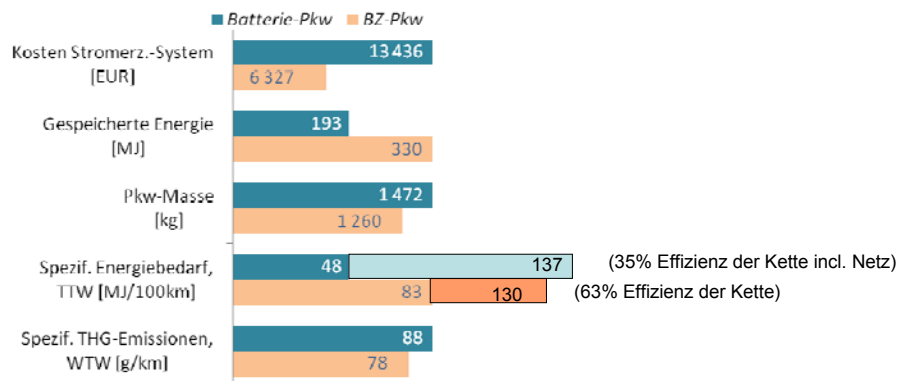
Batteriefahrzeug

- Reichweite: bis 80 km möglich, zukünftig bis ca. 150 km; Reichweite vs. Fahrzeugkonzept
- Begrenzung durch Fahrzeugmasse und Kosten
- „Unterwegs-Betankung“ kritisch

Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle und Batterie

- Hauptaggregat: Brennstoffzelle
- Reichweite: 400 - 600 km; schnell nachtankbar
- Voller Leistungsumfang verglichen mit heutiger Technologie;

Vergleich Elektrofahrzeuge mit Batterien und Brennstoffzellen



- BZ-Systemkosten: 50 EUR/kWe bei 90 kWe zuzüglich 15 EUR/kWh₂ (Druckgasspeicher, 700 bar mit 1,4 kWh₂/kg, Seyfried [2009])
- Energiebedarf BZ-Pkw: mechan. Energiebedarf am Rad als $f(m)$, 40% Wirkungsgrad im MVEG Biedermann et al. [2006]
- THG-Emissionen für H₂ aus Erdgas in Großanlage in Deutschland (Biedermann et al. [2006])

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

Warum Wasserstoff?

Wasserstoff fügt dem Energieversorgungssystem eine **Speicherkomponente** hinzu

Kompensiert **Fluktuationen** erneuerbarer Energie

Nutzung elektrischer Überschussenergie im **Transport**

Rückverstromung möglich

Wasserstoff bedient Anforderungen **dezentraler und zentraler Energieversorgung**

Zentrale und dezentrale Herstellung

Vergleichmäßigung dezentraler Wasserstoffproduktion in Pipelines

Wasserstofftankstellen passen zur derzeit halbzentralen Versorgungsstruktur im Verkehr



Institut für Energie- und Klimaforschung – Brennstoffzellen (IEK-3)

6

Vorteile der Wasserstoffnutzung gegenüber direkter Stromnutzung

Energieübertragung

Geringe Verluste beim Pipelinetransport 3% / 1000 km

Langstreckentransport effizient für Erdgas und Wasserstoff

Wasserstoffnetz wird dezentrale Einspeisung ermöglichen

Verluste bei Wasserstoff etwa 10% höher als bei Erdgas: 1/3 des Brennwertes, jedoch

Hochspannungsgleichstromübertragung 3% / 1000 km zuzügl. 4-6% Umspannung

Hochspannungsleitung 9% / 1000 km @ 400 kV; Quelle EoN

5% / 1000 km @ 765 kV; Quelle EoN

Energiespeicherung

Wasserstoff

Kavernen, ggfs. Pipelines über Druckvariation

Keine Selbstentladung; Langzeitspeicherung

Strom

Batterien, sinnvoll für kleine Energien

ggfs. Verwendung ausgemusterter Transportbatterien

zur stationären Speicherung; schnell: ideale Lastfolge

The Proposition of Hydrogen

Hydrogen is an efficient energy storage media

- Technical storage density 4 MJ/l compressed at 700 bar or liquid (incl. containment)
- Physical storage density 5 MJ/l @ 700bar and 8.5 MJ/l liquid
- Mass specific storage density 120 MJ/kg

	Physical capacity		Technical capacity*	
	MJ/l	MJ/kg	MJ/l	MJ/kg
Gasoline	31	43	-	35
Ethanol	21	27	-	
Hydrogen	5 @ 700bar	120	4 @ 700bar	15
Batteries	1.5	0.5	cooling cells	ditto

* including containment

Hydrogen is fit to form the future energy hub with storage capability

- Can be made effectively out of most primary energies
- Suits requirements for electromobility
- Complements electric grid with storage capability
- **No** local emissions like **soot** NO_x and SO₂ when being used
- Secondary energy carrier with storage capability

Efficient Production of Hydrogen via Electrolysis is Feasible

Electrolysis generally starts using liquid water, hence the higher heating (HHV) value is relevant for calculating the efficiency

Hydrogen applications mostly do not use the condensing enthalpy, hence for use the lower heating (LHV) value applies

In brief: the enthalpy of evaporation of water needs to be supplied (as power) and will be lost

Reference voltages:

$$\text{HHV: } U_{\text{H,HHV}}^0 = 1.48\text{V}$$

$$\text{LHV: } U_{\text{H,LHV}}^0 = 1.25\text{V}$$

	Cell Voltage (example)	Efficiency	Efficiency
HHV	1.8	1.48/1.8	82 %
LHV	1.8	1.25/1.8	69 %

DOE Target* Systems efficiency @ year	Assumed BoP efficiency	Resulting cell efficiency	Estimated Operating voltage
62 % @ 2006	95 %	65 %	1.9
69 % @ 2012	95 %	73 %	1.7
74 % @ 2017	95 %	78 %	1.6

* DOE target for hydrogen production from central wind electrolysis; Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan: Planned Program Activities 2005-2015; 2007 Technical Plan – Hydrogen Production

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 CO₂-frei
- Ist frei von lokalen Emissionen (NO_x mit Brennstoffzelle, SO₂, 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 CO₂arm, wie der Primärenergieträger es bei der Herstellung erlaubt

Safety I: Hydrogen vs. Gasoline

Hydrogen safety can be engineered

- Authorities are used to certifying hydrogen cars world-wide
- Different engineering is necessary
- Further investigations

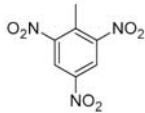


Source: Hydrogen learning center CEEP
<http://policy.rutgers.edu/ceep/hydrogen/basics/safety.php>
last accessed 05/14/2010

Safety II: Separation of the Oxidant from the Fuel

TNT	7,4 MJ/l
Diesel	36 MJ/l
Chocolate	22 MJ/l

⇒ High energy densities pose no inherent risk



The intimate mixture of an oxidant with a fuel plus potential gas formation poses the risk

Vehicle battery w/ cruising range of 400 km (250 miles) is proposed to have
 1500 Wh/kg = 5,4 MJ/kg
 w/ $\rho \sim 2 \text{ g/cm}^3 \Rightarrow$ **10,8 MJ/l**

Reactants of high energy batteries will inherently be close to each other in a μm or sub- μm distance
 Hence, mechanical aspects and prevention of gas formation will be of utmost importance in the development

Hydrogen is stored in a separate containment protected from access of the oxidant

Two Major German Initiatives Underline Industrial Viability

H2 Mobility: Common initiative of leading industrial companies to implement a hydrogen infrastructure in Germany
 Daimler, EnBW, Linde, OMV, Shell, Total, Vattenfall and NOW

CEP: Clean Energy Partnership; Partnership to demonstrate and develop hydrogen and fuel cell technology and prepare the market introduction



Stand der Brennstoffzellenfahrzeuge

Institut für Energie- und Klimaforschung – Brennstoffzellen (IEK-3)

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

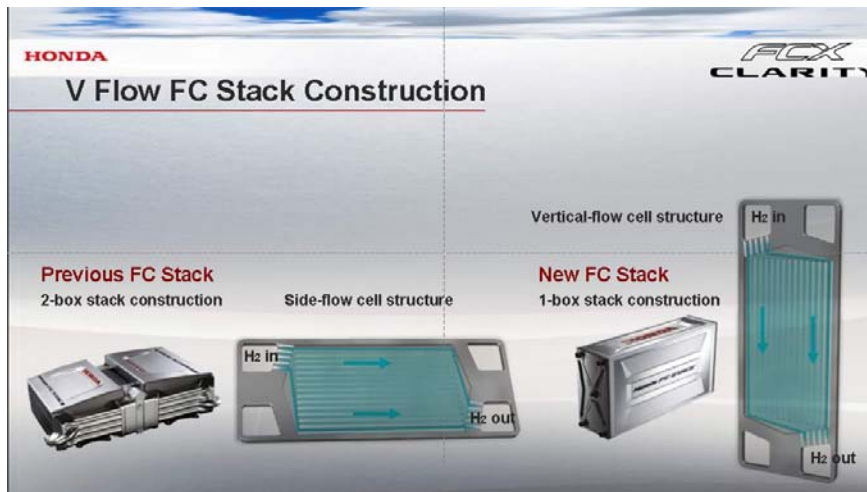
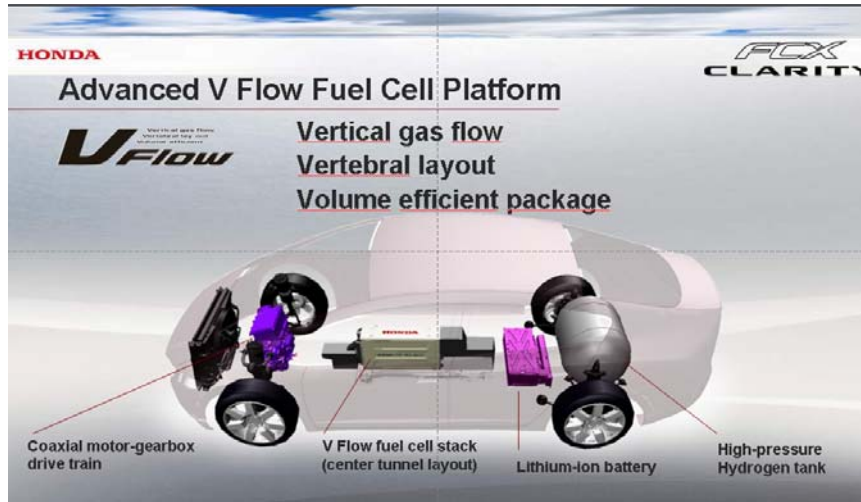
Honda Clarity

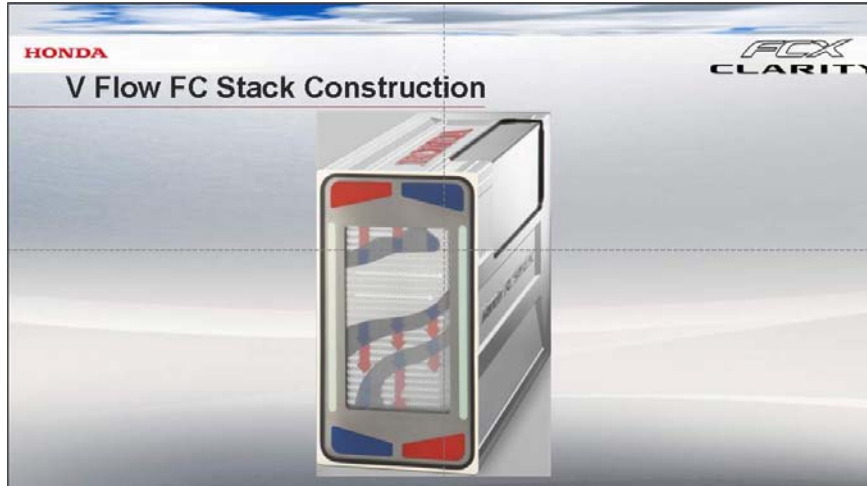
HONDA
FCX CLARITY

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	266 Nm
Fuel Cell Stack Output	100 kW	Energy Storage	Lithium-ion battery
		Hydrogen Tank	171 L (35 MPa)

*Honda calculation





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 heute Brennstoffzellenfahrzeuge mit Spezifikationen, die konventionellen Fahrzeugen vergleichbar sind

Themen sind:

Feldversuche zur Serienreifmachung 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 (-20°C erreicht; -30°C in Entwicklung)

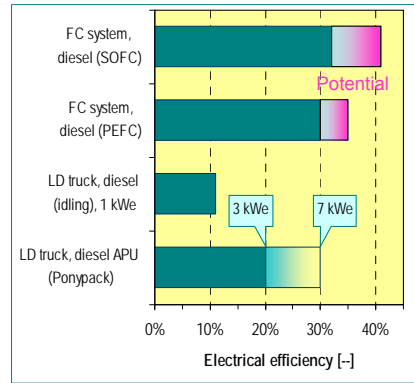
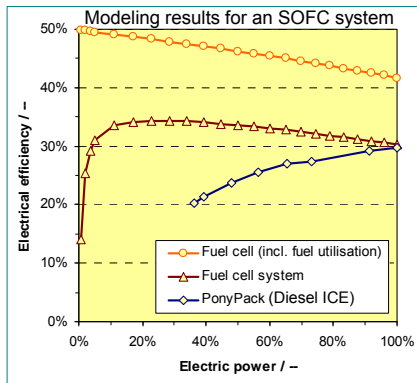
cold start-up time

etc.

Bordstromversorgung Auxiliary Power Units, APU

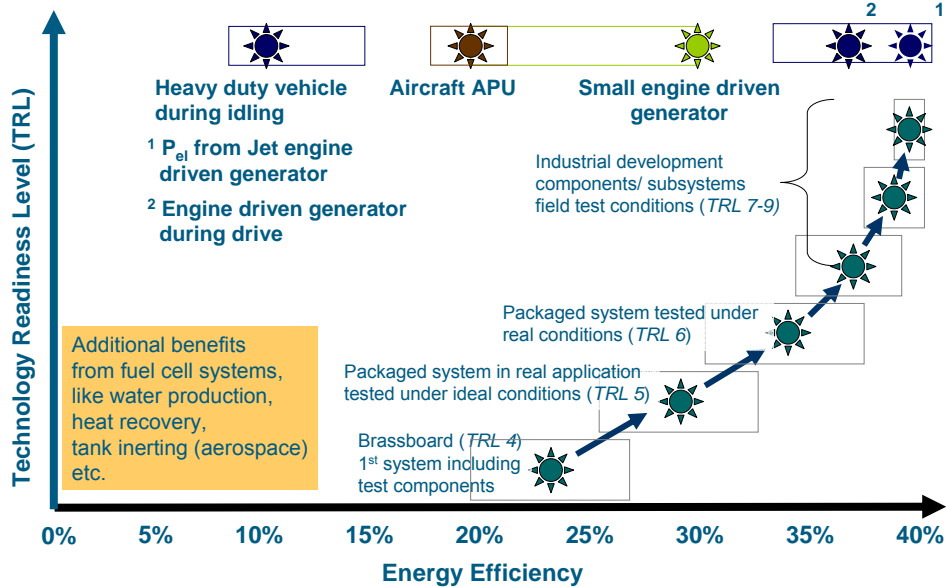
On-board Power Generation

- 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

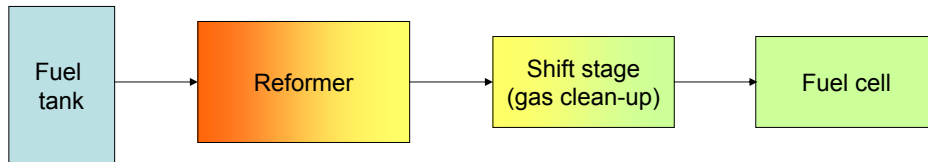


APU...Auxiliary power unit; FC...Fuel cell, LD...Long-distance; SOFC...Solid oxide fuel cell
 Institut für Energie- und Klimaforschung – Brennstoffzellen (IEK-3)

Systems Development with Regard to Systems Efficiency



Simplified Block-Diagram of an APU



Fuels for Transportation Applications

Options APUs in mobile application

Important thermodynamic and chemical property data of fuels
! – Attention; X – difficult to solve

Boiling range						!	X
Residue					!	X	X
Aromatics			X	!	!	!	!
Di-, Tri and Poly aromatics						X	X
S content	!			X		X	X
S species				!		X	X
	LPG	Alcohols	Gasoline	Kerosene	Diesel	Heating oil	Marine Gas Oil

Comparison of Fuel Cell Concepts With regard to APU Applications

Low temperature fuel cells	High temperature fuel cells
Advantages: Quick start-up Mechanically benign electrolyte Solid electrolyte with fixed acid	Advantages: Tolerant to impurities Nickel as Catalyst (cheap)
Disadvantages: Low CO-Tolerance Intricate water management Ineffective cooling because of low operating temperature	Disadvantages: Brittle electrolyte (SOFC) Corrosive Electrolyte (MCFC) Valuable materials for peripheral components (Ni-base alloys) Long start up procedures
High Temperature PEFC (120-180°C)	
Advantages: Enhanced cooling, CO-tolerance about 1%, benign temperature level	
Disadvantages: high cathodic overpotential	

HT-PEFC and Auxiliary Power Units

HT-PEFC systems prove to be well suited for Auxiliary Power Units:

- Long life time
- Compatible with reforming

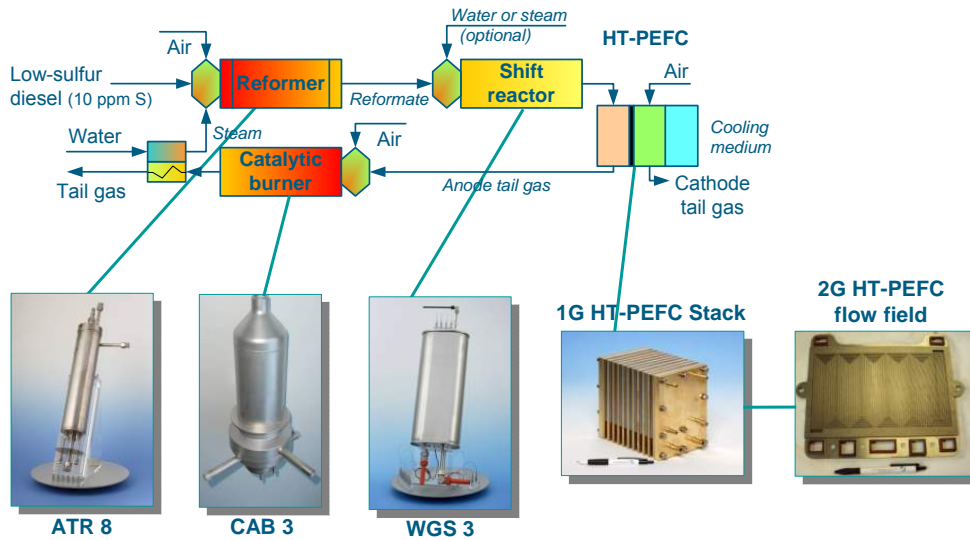
Auxiliary Power Units (APU) provide advantages by separating the on-board power generation from traction through employing fuel cells as high efficiency energy converters

- Independent of revolution speed of main engine
- On-board consumers use DC power. Generators other than fuel cells provide AC

Requirements of APUs:

- Fuel that is already on board for traction is to be used
- Efficiency of 30 to 40% is requested depending on application
- Rule of thumb: the bigger the main engine, the higher the efficiency requirement
- Dynamic operating capabilities required; less stringent though than for traction
- Swift start-up characteristics in the minute range
(traction requires ~10 times swifter start up)

Juelich APU Design and Components for 5 kW Class APUs



Summary

Anthropogenic climate change is real

Renewable fuels, hence a broader variety of fuels will constitute the primary energy basis

Higher fluctuation

More decentralized

Hydrogen

fits into that scenario for its storage capability and is decentralist nature

fueling stations keep the existing semi-centralized pattern

can be transported with little losses over long distances

can form an energy hub with storage capability

can be produced efficiently

fits into transportation for propulsion and auxiliary power units

Fuel cells

Fuel cell cars w/ attractive driving properties & cruising ranges are being demonstrated

Stationary fuel cells will primarily work on natural gas

Safety

Hydrogen safety can be engineered and certification is a proven process

High energy batteries impose an inherent safety issue that requires more focus

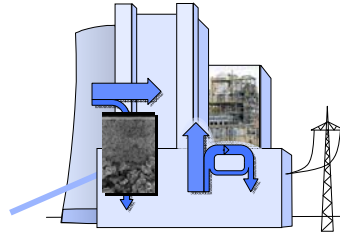
R&D

Hydrogen and fuel cells need more research alongside the demonstration

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

First Announcement

**2nd International Conference on Energy Process Engineering:
Efficient Carbon Capture for Coal Power Plants**



June 20-22, 2011, Frankfurt, Dechema Haus

www.icepe2011.de