



**Frühjahrstagung Arbeitskreis Energie (AKE)  
der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG)**

24.04.2009, Bad Honnef

**Batterien und Brennstoffzellen  
für die Elektromobilität**

Prof. Dr. Werner Tillmetz

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW)  
Baden-Württemberg

## Was erwartet Sie?

- Kurzporträt ZSW
- Herausforderungen
- Erneuerbare Energien und Mobilität
- Batterien für die Elektromobilität
- Brennstoffzellen für die Elektromobilität
- Fazit

# ZSW – Neue Energie Technologien

- Industriennahe Forschung & Entwicklung
- Photovoltaik – Dünnschicht-Technologie, Solar Test Feld
- Regenerative Kraftstoffe
- Systemanalyse & Politikberatung
- Brennstoffzellen – Technologie, Systeme, Test Zentrum
- Batterien & Superkondensatoren – Materialien, Systeme, Qualifikation



Stuttgart



Widderstall



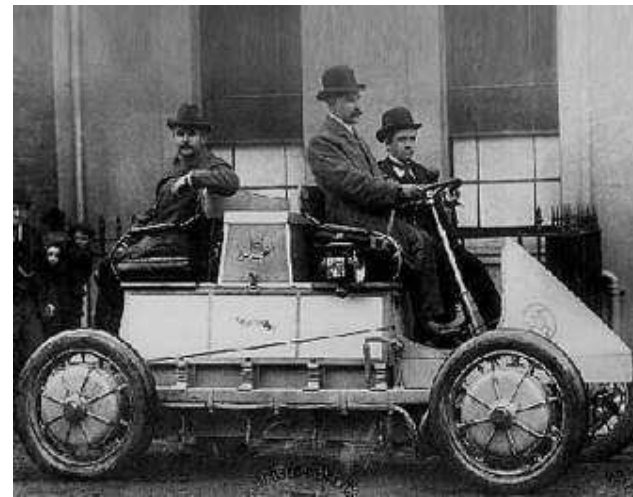
Ulm

# Was erwartet Sie?

- Kurzporträt ZSW
- Herausforderungen
- Erneuerbare Energien und Mobilität
- Batterien für die Elektromobilität
- Brennstoffzellen für die Elektromobilität
- Fazit

# Elektromobilität vor mehr als 100 Jahren

- Ferdinand Porsche entwickelt Elektrowagen (Lohner-Porsche)  
- die Sensation der Weltausstellung im Jahr 1900 in Paris
- AEG betrieb wenige Jahre später eine Serienfertigung von Elektrofahrzeugen in Berlin
- Das im Überschuss vorhandene Erdöl mit seiner unschlagbaren Energiedichte und das sich schnell ausweitende Fernstraßennetz waren das Ende von Elektrofahrzeugen



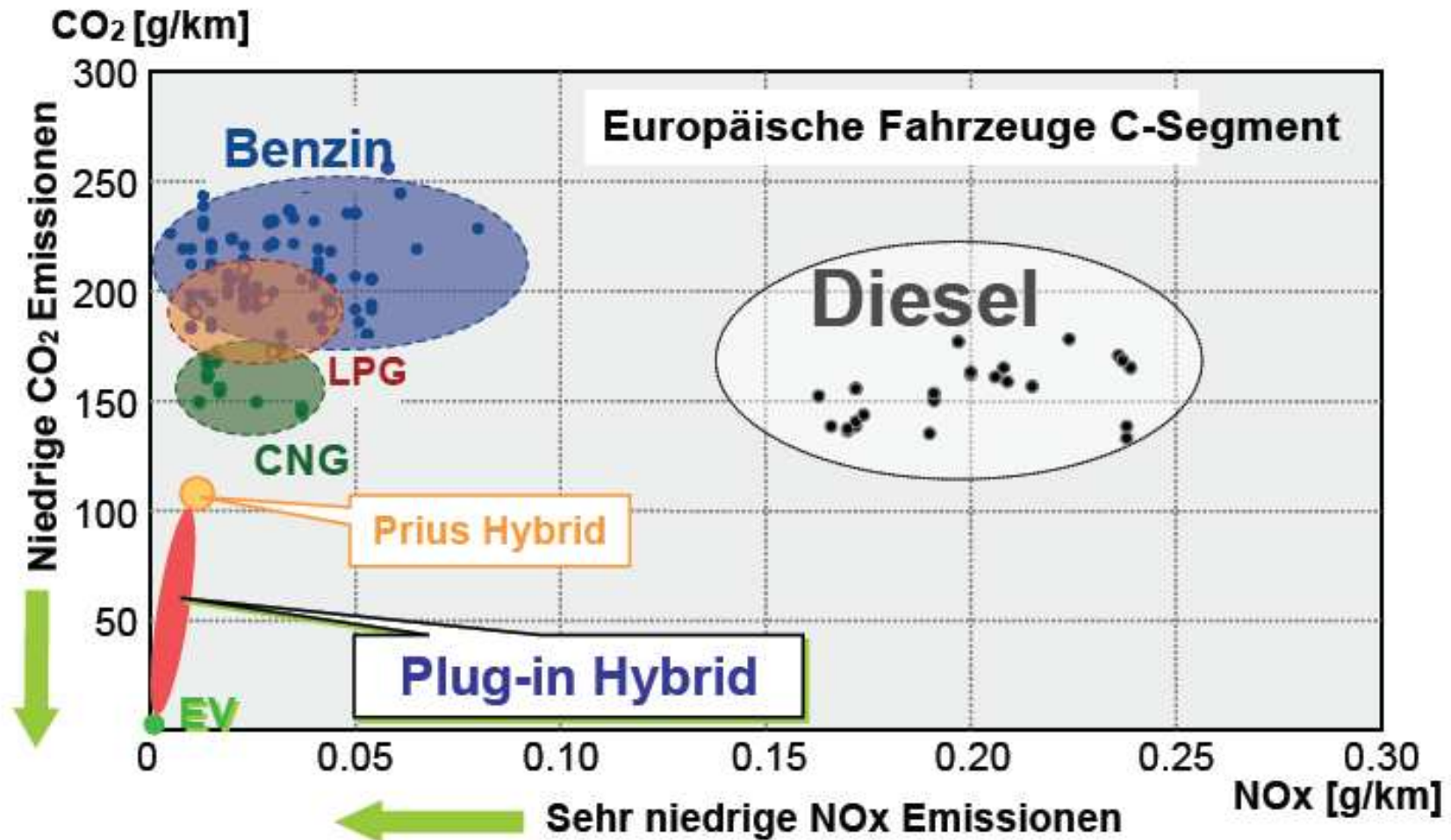
# Herausforderungen des 21. Jahrhunderts

- Dramatischen Umweltprobleme durch Klimawandel und Luftverschmutzung
- Alarmierende Zunahme des Weltenergiebedarfes
- Zunehmende geopolitische Abhängigkeiten
- Effizientere Nutzung fossiler und erneuerbare Energien
- Innovationen für einen nachhaltigen Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort Deutschland

**➔ Treiber für die Elektromobilität**

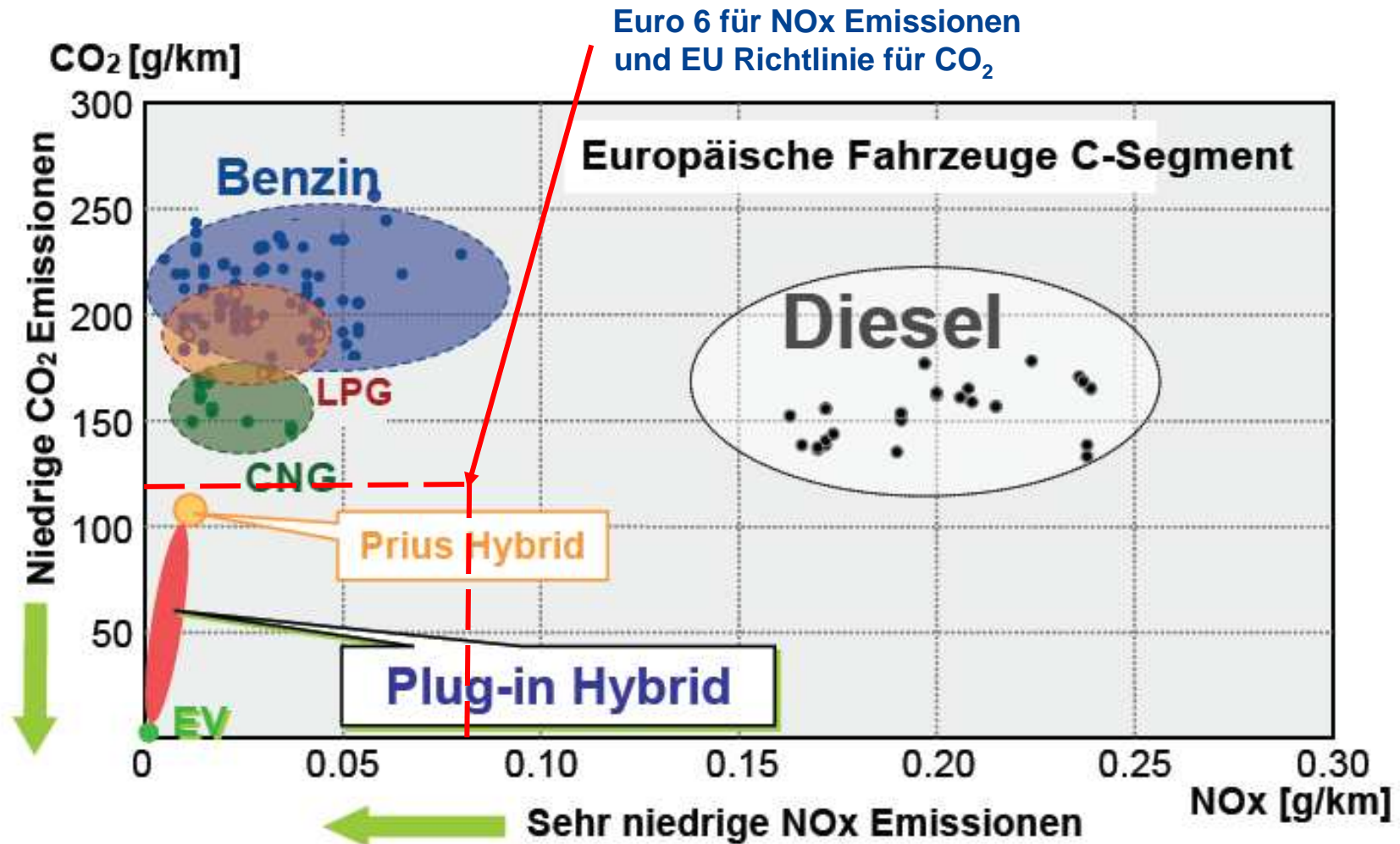


# Treiber: Emissionen



Quelle: Toyota

# Treiber: Emissionen



Quelle: Toyota



## Treiber: Wirkungsgrade

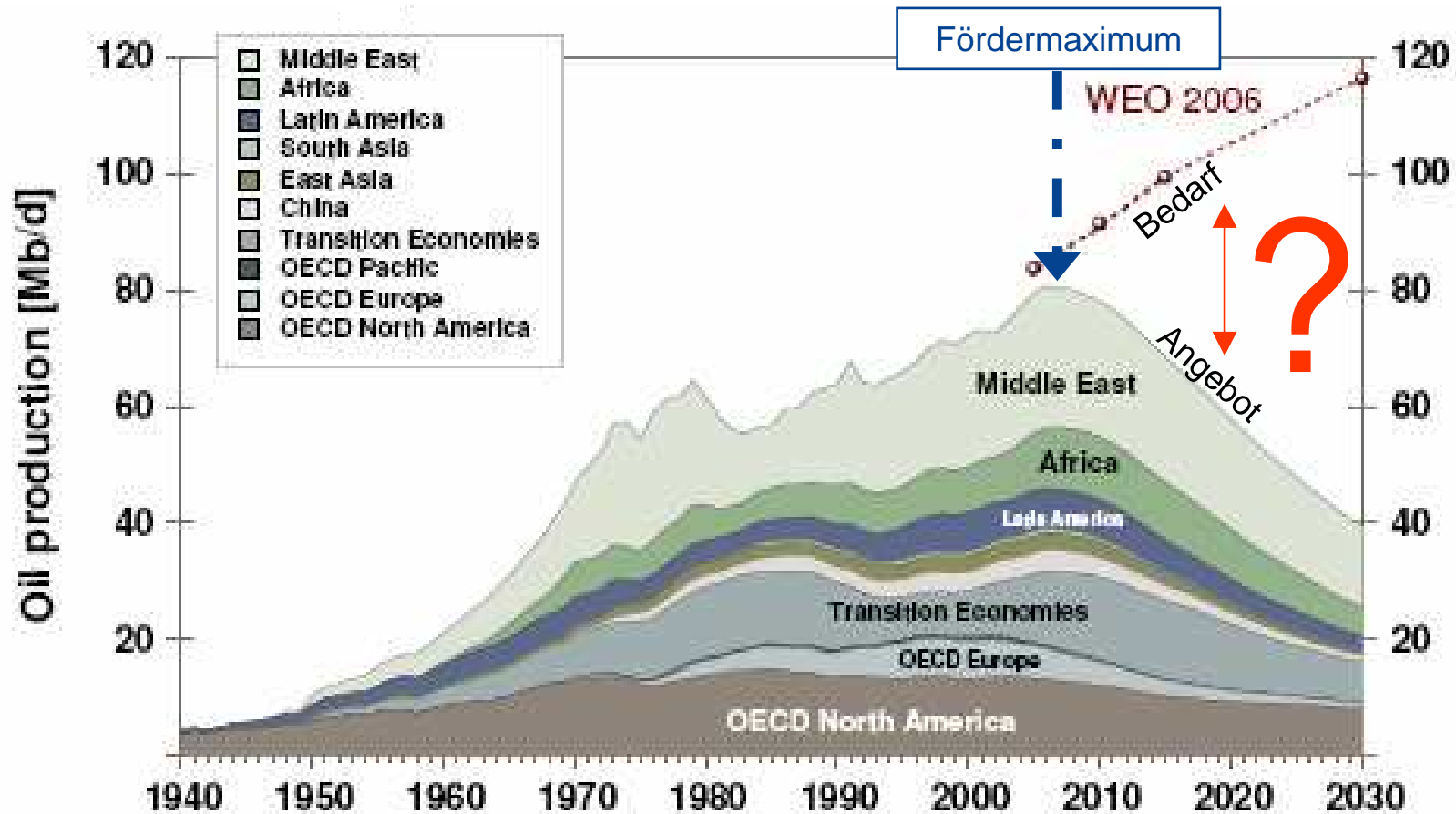
Typische Fahrzeug-Wirkungsgrade:

Verbrennungsmotor: 20 – 25 %

Brennstoffzellen-Elektroantrieb: 40 – 50 %

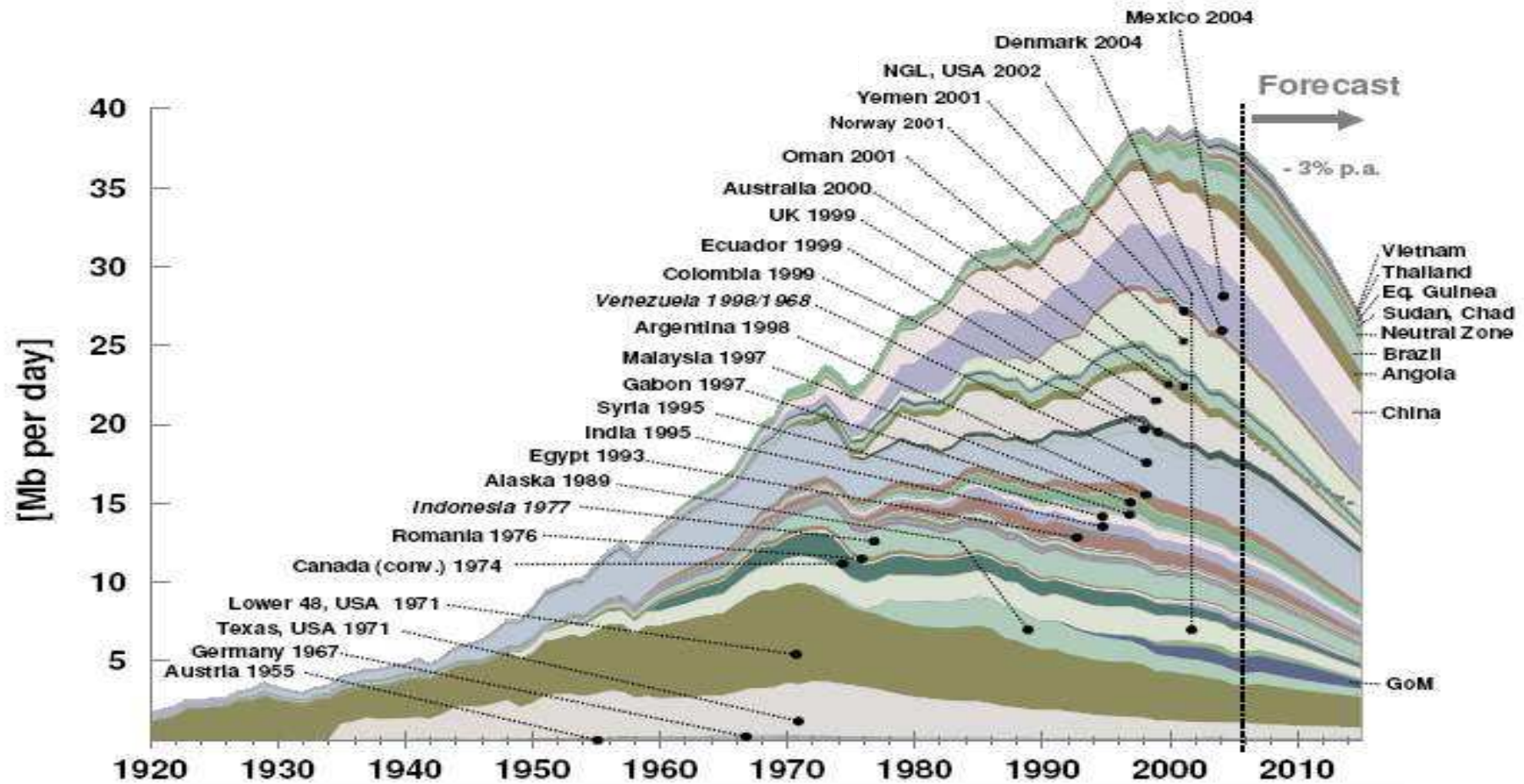
Batterie-Elektroantrieb: 70 – 80 %

# Treiber: Weltölproduktion



Quelle: Energy Watch Group 2008

# Ölproduktion von Ländern nach dem „Peak“



Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2007

Source: IHS 2006; PEMEX, petrobras ; NPD, DTI, ENS(Dk), NEB, RRC, US-EIA, January 2007

Forecast: LBST estimate, 25 January 2007

Quelle: Energy Watch Group 2008

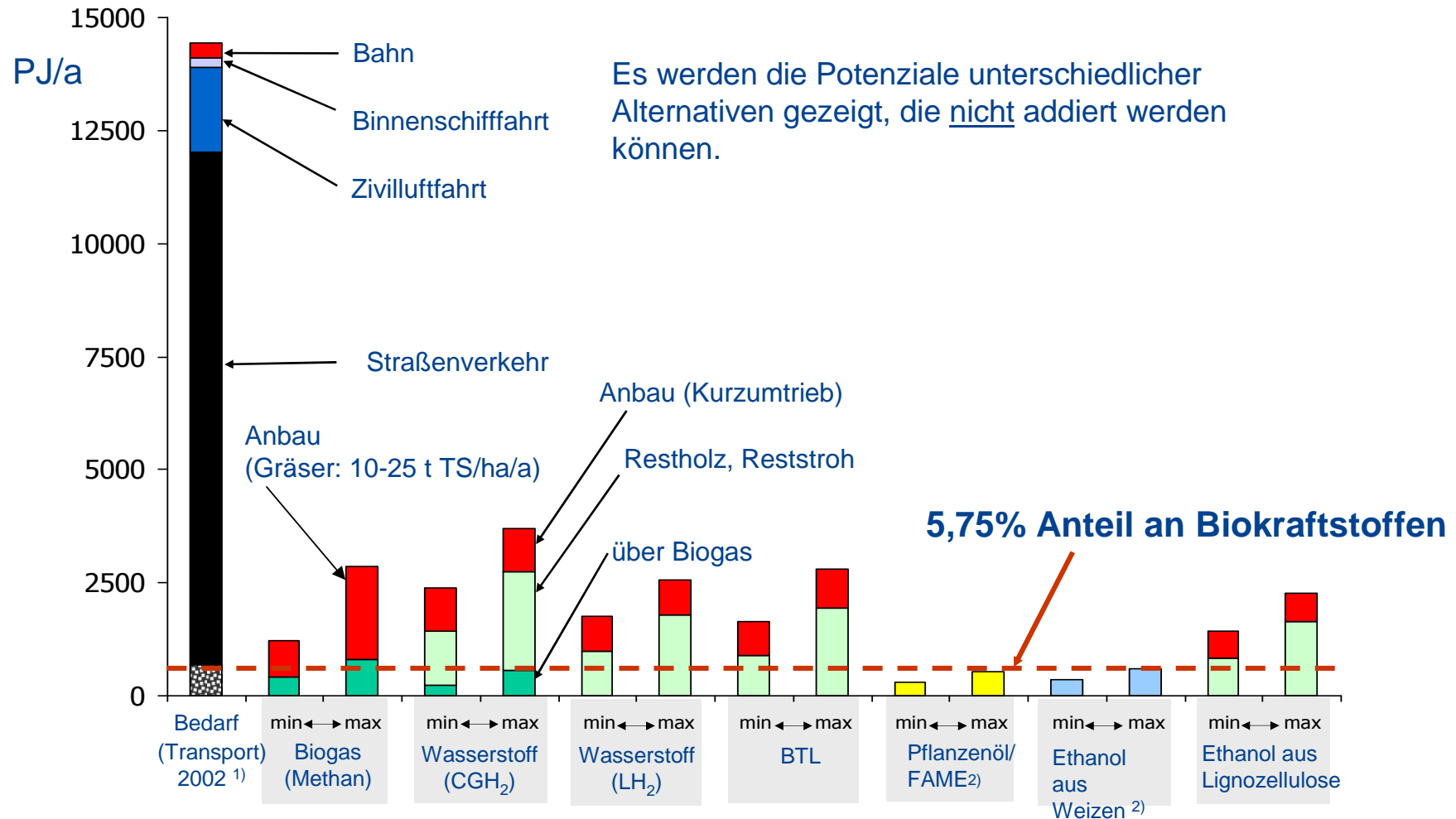
# Was erwartet Sie?

- Kurzporträt ZSW
- Herausforderungen
- Erneuerbare Energien und Mobilität
- Batterien für die Elektromobilität
- Brennstoffzellen für die Elektromobilität
- Fazit

# Potenzial Erneuerbarer Energien

Das nutzbare Potenzial der Erneuerbaren Energien ist ein Vielfaches des heutigen Weltenergie-Verbrauchs

# Technisches Potenzial verschiedener Biokraftstoffe in der EU



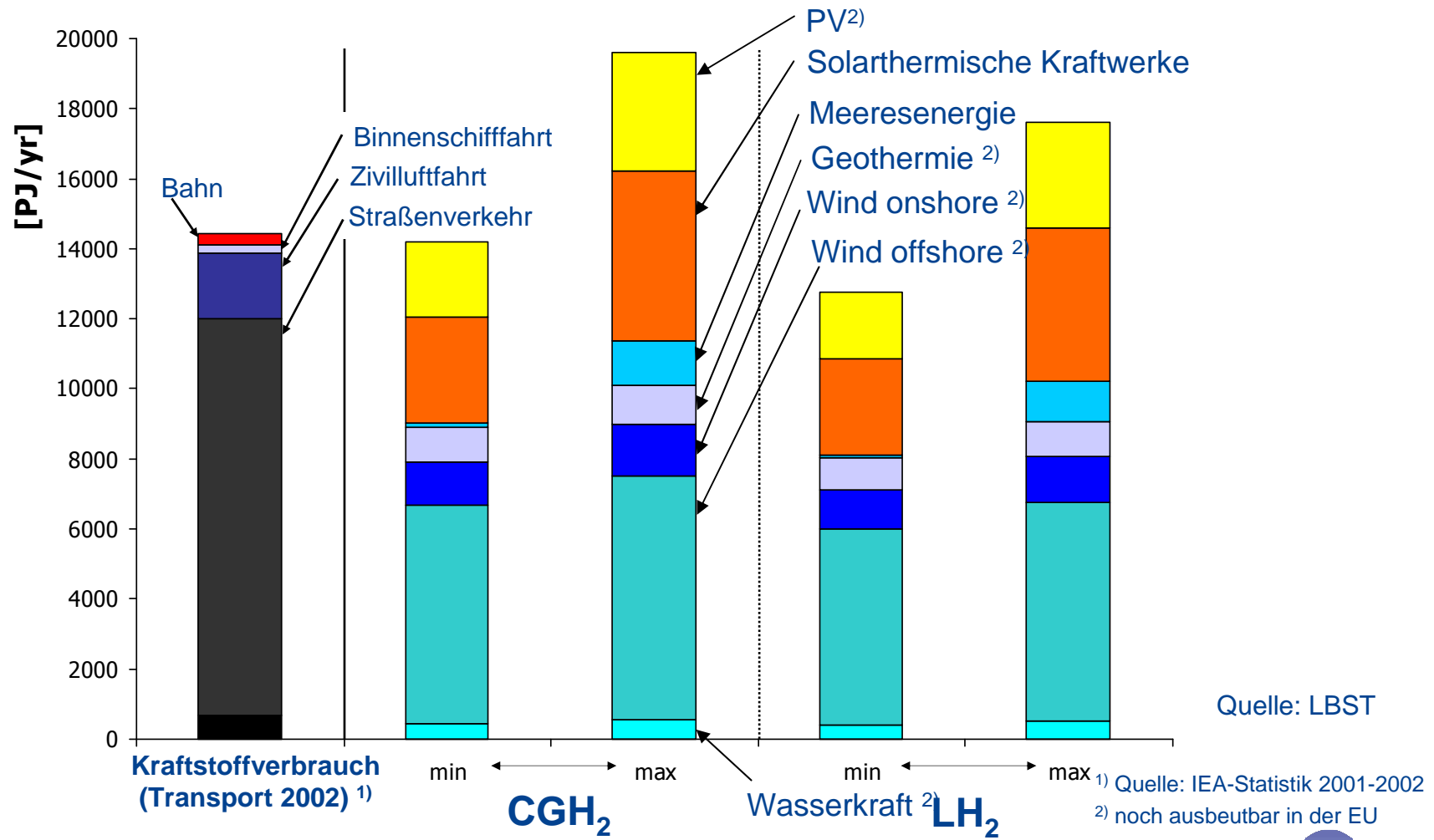
<sup>1)</sup> Quelle: IEA-Statistik 2001-2002

<sup>2)</sup> Brutto (ohne Energieaufwand für die Kraftstoffbereitstellung, z.B. der Einsatz externer Energie für die Ethanolanlage)

Quelle: LBST

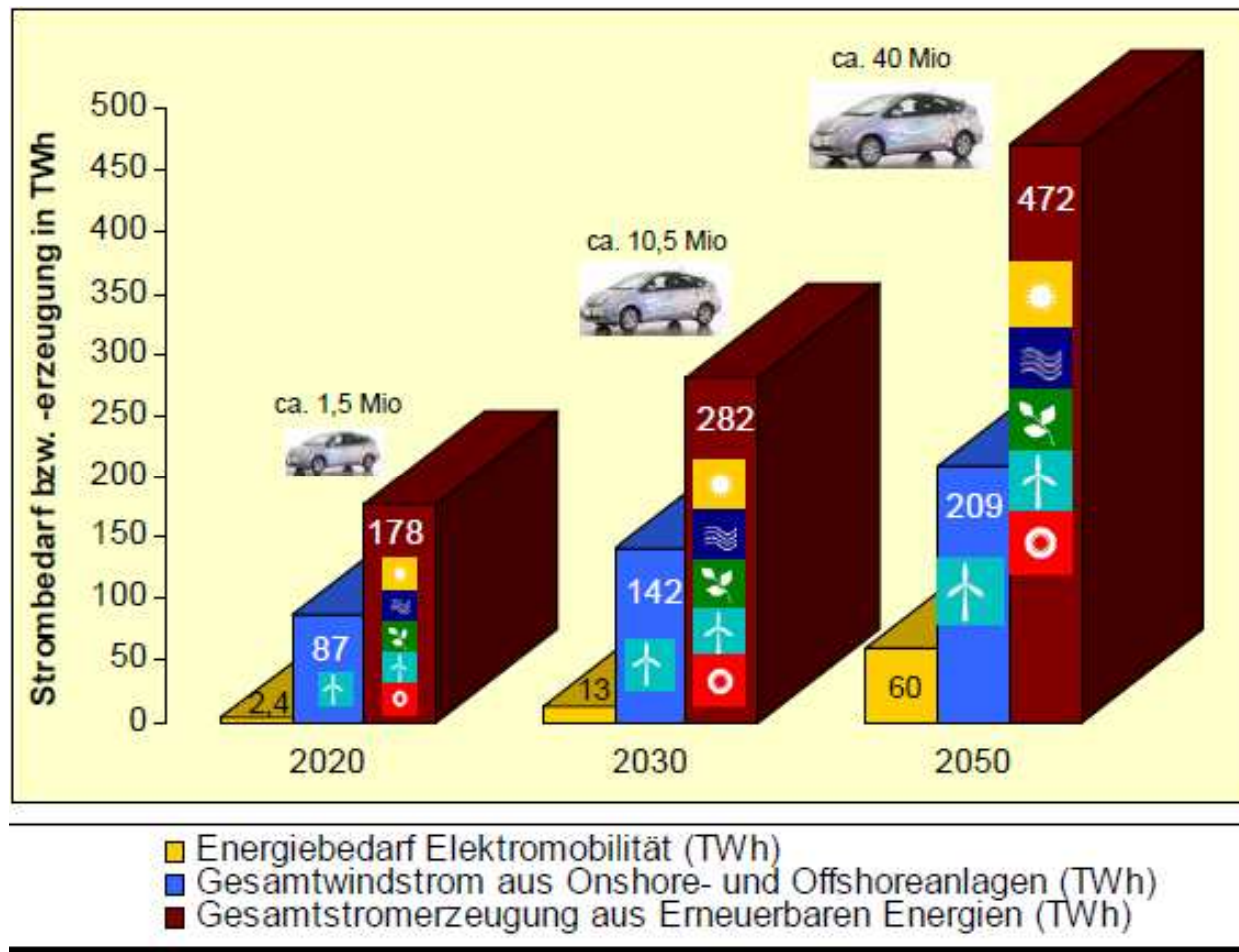
# Wasserstoff für Brennstoffzellen-Fahrzeuge

Technische Potenziale der Erzeugung aus erneuerbarem Strom in der EU



# Strom für Batterie-Elektro-Fahrzeuge

Technische Potenziale der Erzeugung aus erneuerbarem Strom in D



Quellen: Leitstudie 2008, BMU / RWE AG



# Elektromobilität und Erneuerbare Energien

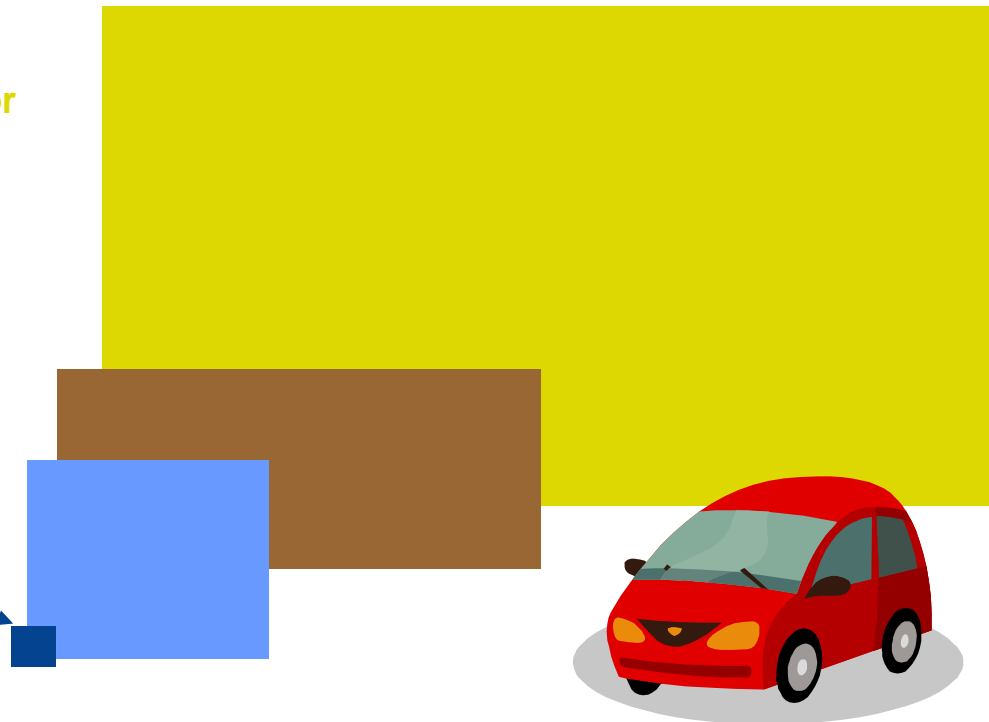
Flächenbedarf für regenerative Kraftstoffe zum Betrieb eines Pkw mit 12 000 km p.a. Fahrleistung

5000 m<sup>2</sup> für Biodiesel + Verbrennungsmotor

1000 m<sup>2</sup> für Wasserstoff aus Biomasse + Brennstoffzellenantrieb

500 m<sup>2</sup> für Wasserstoff aus Windenergie + Brennstoffzellenantrieb (Fläche gleichzeitig landwirtschaftlich nutzbar)

20 m<sup>2</sup> für PV-Strom + Batterie-E-Fahrzeug

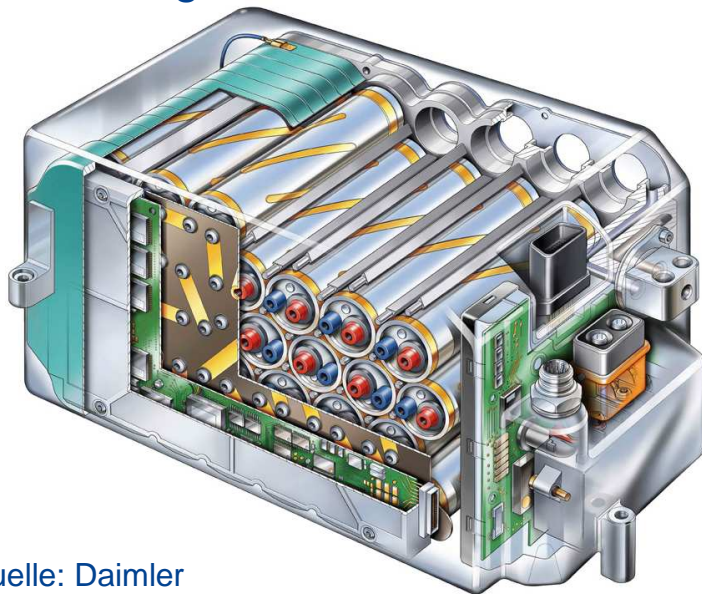


## Was erwartet Sie?

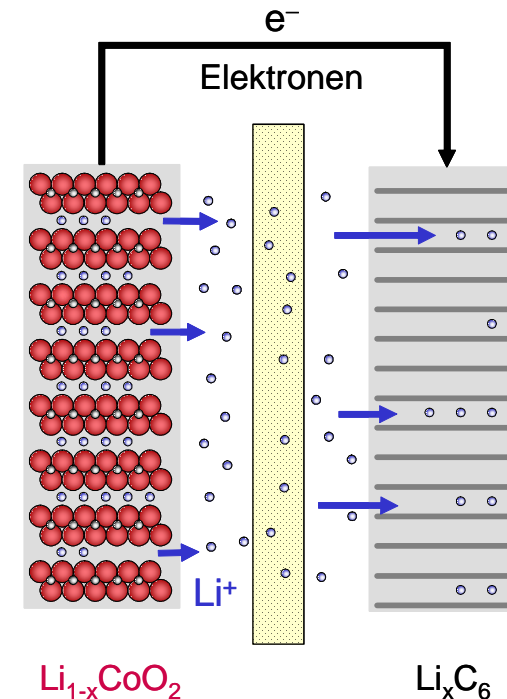
- Kurzporträt ZSW
- Herausforderungen
- Erneuerbare Energien und Mobilität
- **Batterien für die Elektromobilität**
- Brennstoffzellen für die Elektromobilität
- Fazit

# Batterien: Energiespeicher

- Batterien (Akkumulatoren) speichern elektrischen Strom mit hohem Wirkungsgrad (Laden – Entladen)
- Li-Ionen-Batterien haben die höchste Energiedichte der kommerziellen Akkumulatoren
- Große Vielfalt an möglichen Aktivmaterialien zur Optimierung

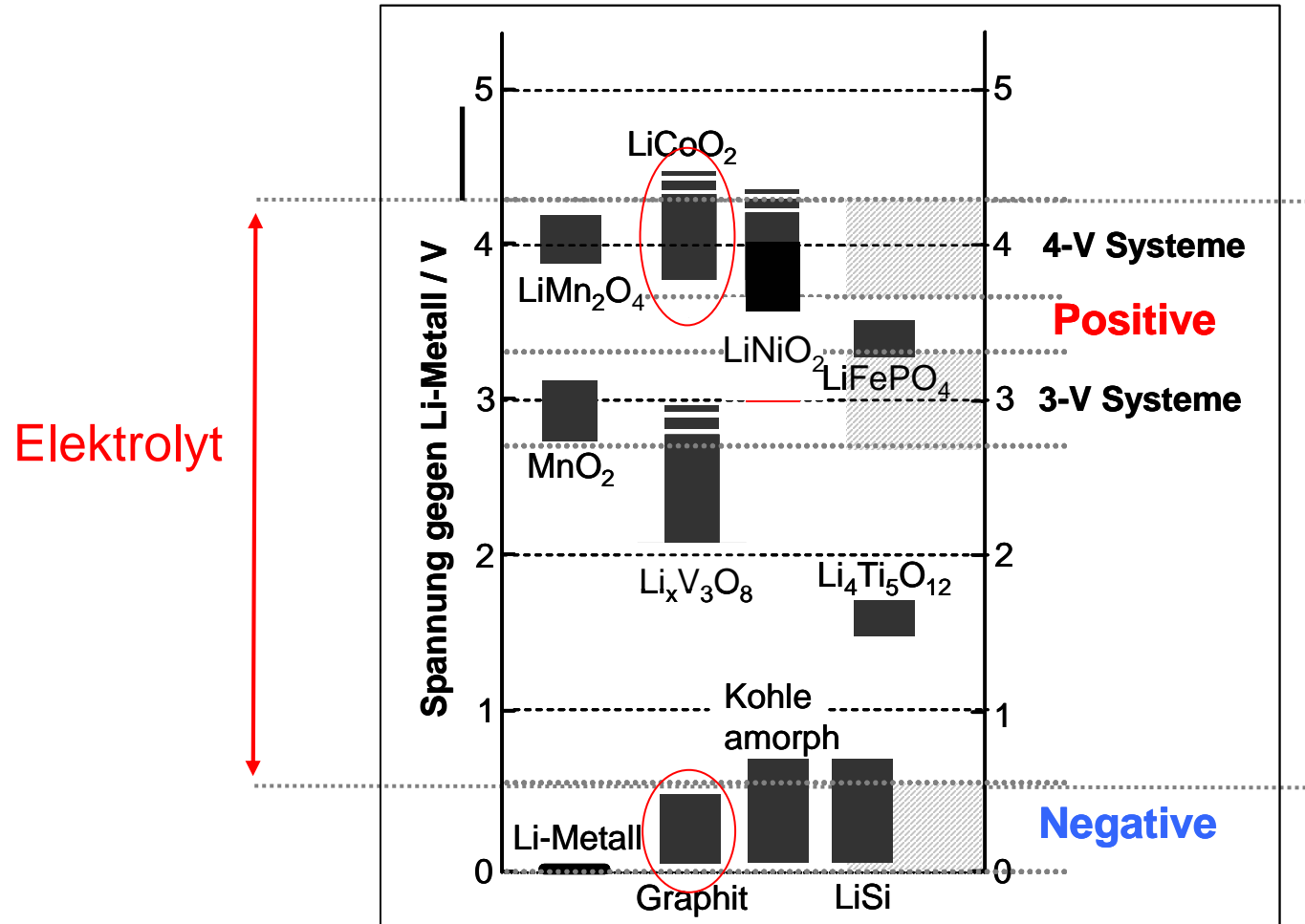


Bildquelle: Daimler  
Aufbau eines Batteriemoduls für einen Mild-Hybrid-Antrieb



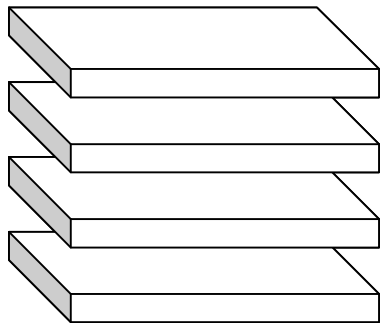
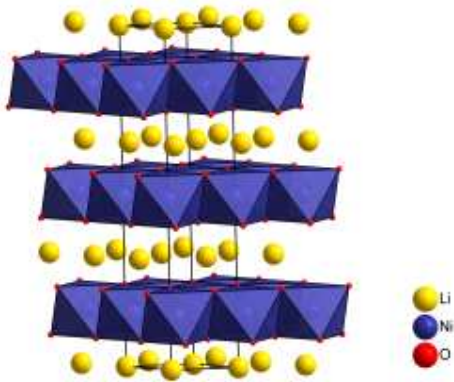
Funktionsprinzip einer  
Lithium-Ionen-Batterie

# Vielzahl neuer Materialkombinationen für Lithium-Ionen-Batterien

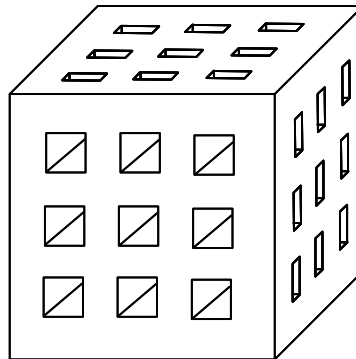
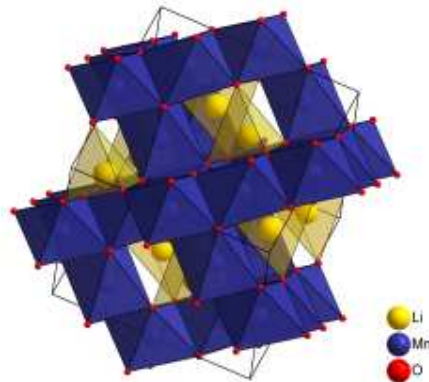


# Kathodenmaterialien: Strukturen

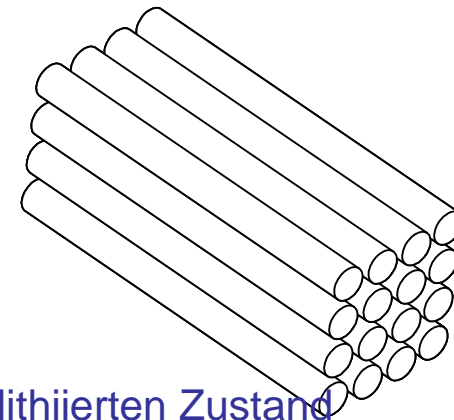
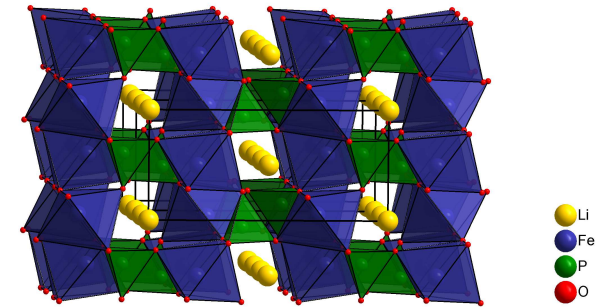
Schichtstrukturen  
 $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{Li}(\text{Ni},\text{Co})\text{O}_2$ ,  
 $\text{LiCo}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$



Spinellstruktur  
 $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiMn}_{1.5}\text{Me}_{0.5}\text{O}_4$



Olivinstruktur  
 $\text{LiFePO}_4$ ,  $\text{LiMePO}_4$



Unterschiede in der Ionenleitung und Stabilität des Gitters im delithiierten Zustand

# Li-Ionen-Batterien: Neue Anwendungen >> Große Herausforderungen



Energiedichte ?  
> 200 Wh/kg

Kosten ?  
< 500 €/kWh

Betriebsbedingungen ?  
- 30°C bis +50°C, Schnellladung  
Vibration, Schock, Crash

Ressourcen ?  
Qualifiziertes Personal,  
Budget, Rohstoffe

Lebensdauer ?  
kalendarisch >10Jahre  
> 300 000 Zyklen

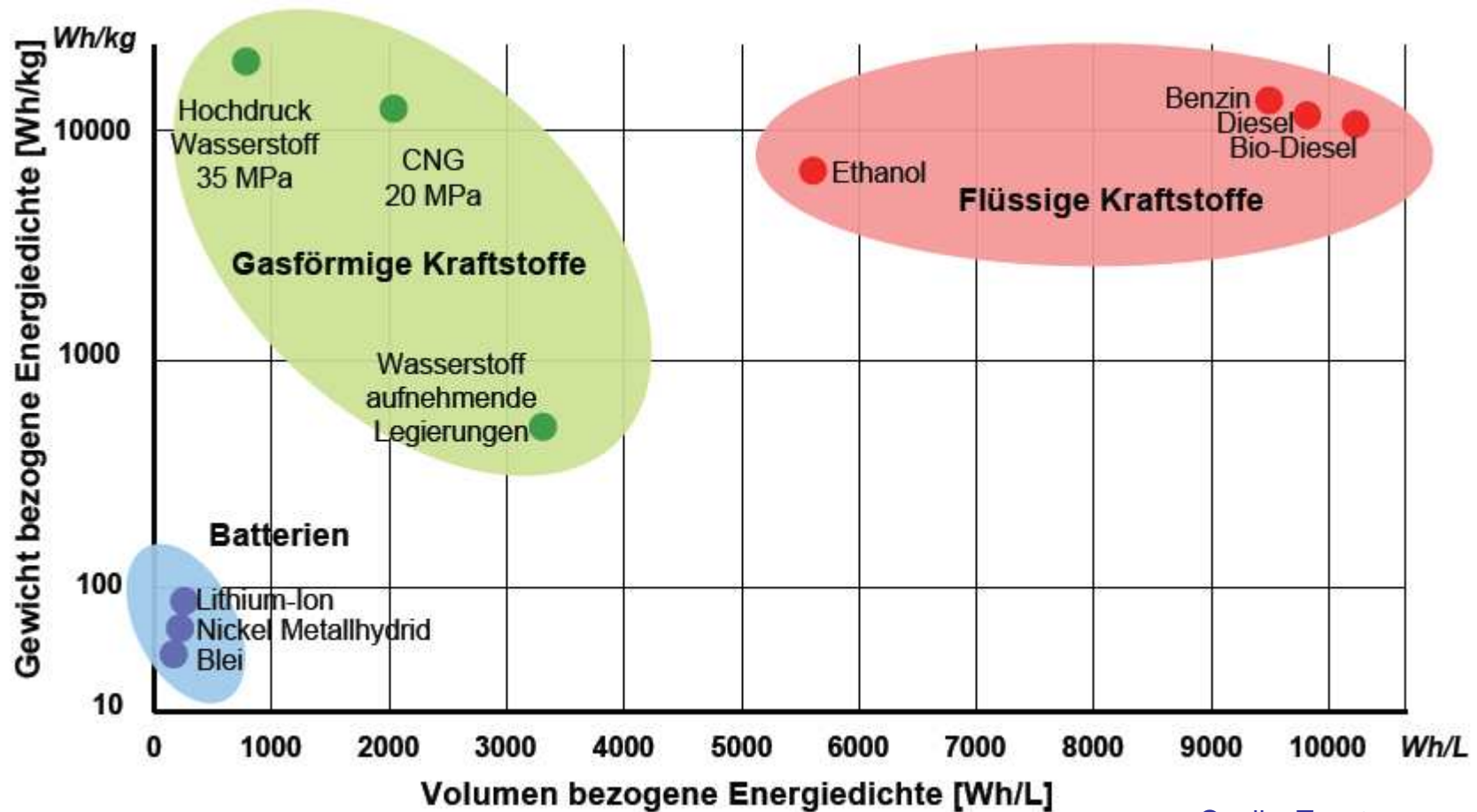
Sicherheit ?

Konsumerbatterie: < 90 Wh  
Hybridfahrzeuge: 1-2 kWh  
Plug-In HEV: 6 – 10 kWh  
Batteriefahrzeug: > 20 kWh

**neue  
Materialien  
&  
Konzepte  
notwendig**



# Energiedichte



Quelle: Toyota

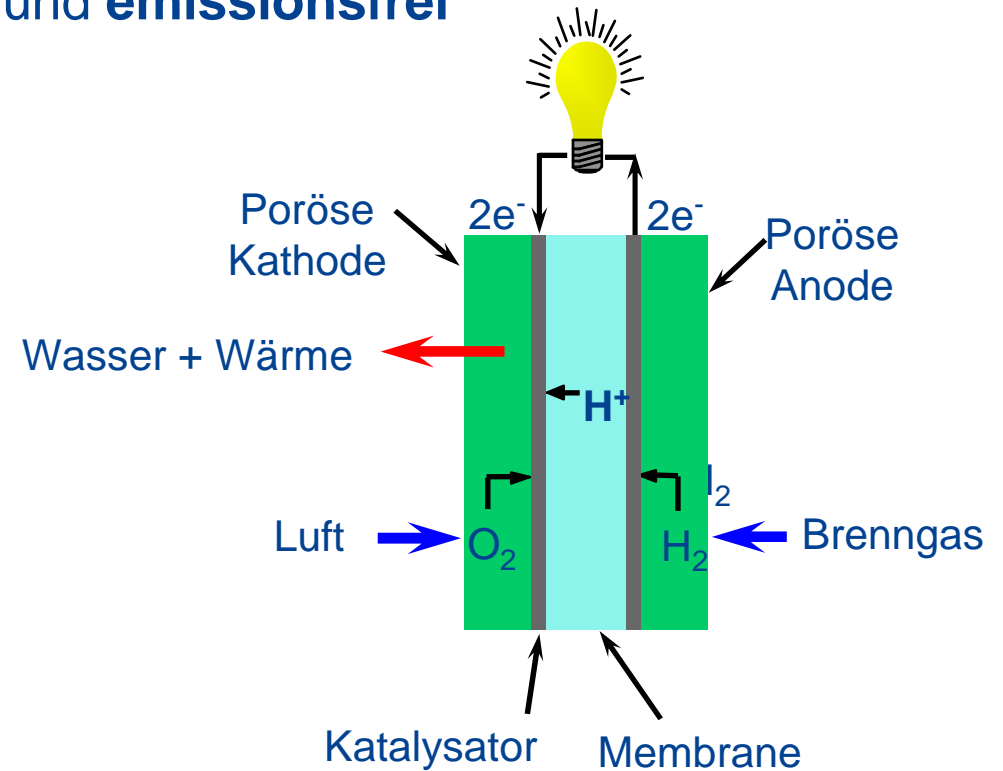
# Was erwartet Sie?

- Kurzporträt ZSW
- Herausforderungen
- Erneuerbare Energien und Mobilität
- Batterien für die Elektromobilität
- Brennstoffzellen für die Elektromobilität
- Fazit



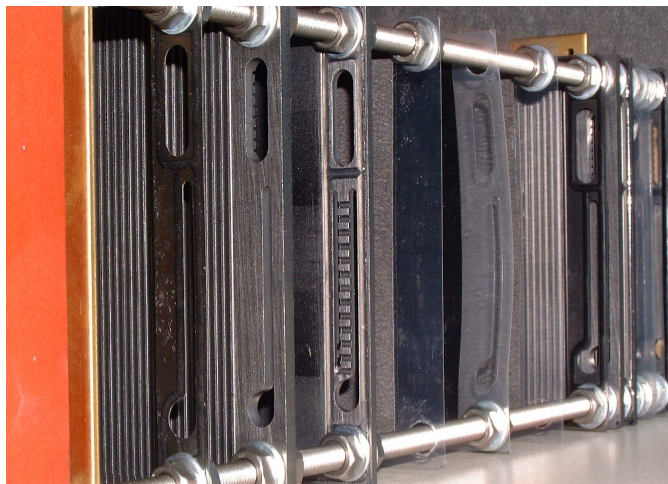
# Brennstoffzellen: Energiewandler

Brennstoffzellen wandeln Brenngase (Wasserstoff) und Luft-Sauerstoff **hoch effizient** und **emissionsfrei** in Strom, Wärme und Wasser um



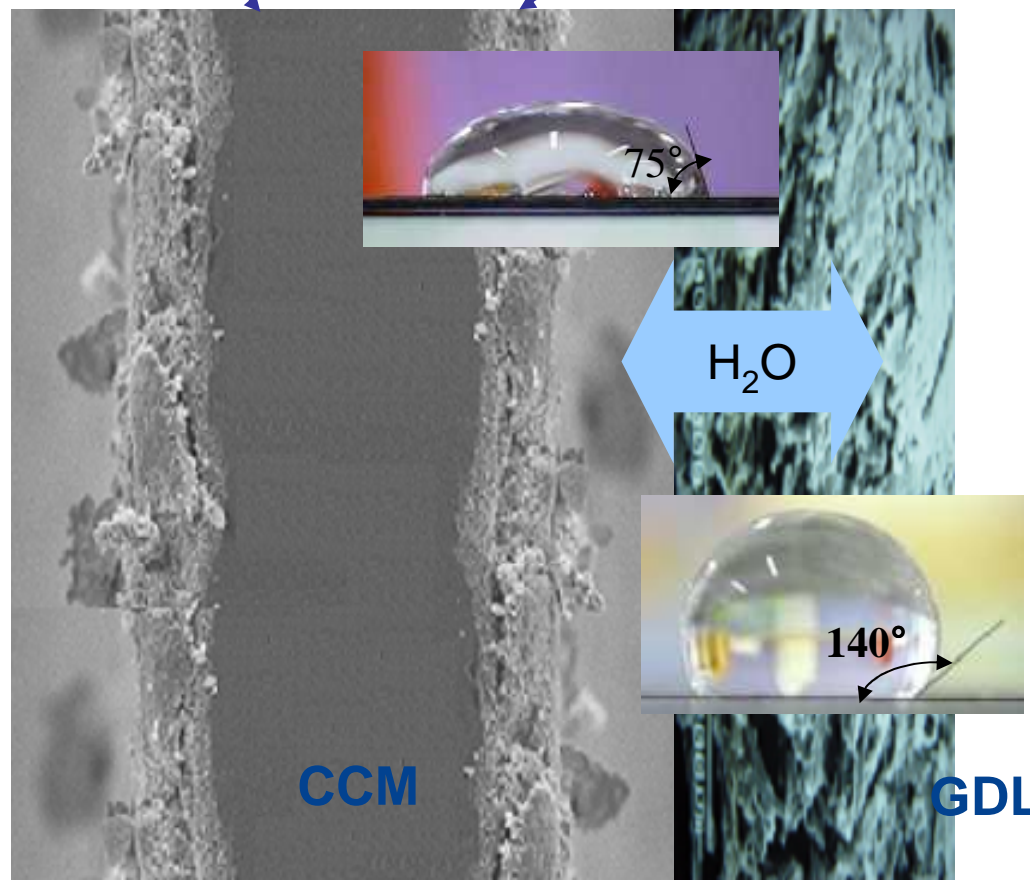
# Brennstoffzellen – Technologie

Charakterisierung,  
Modellierung  
und Optimierung  
von Komponenten



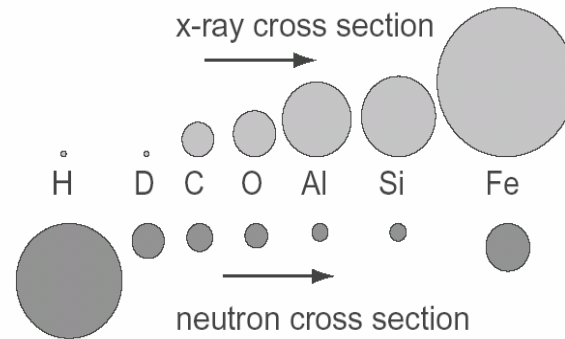
Membran

Katalysator

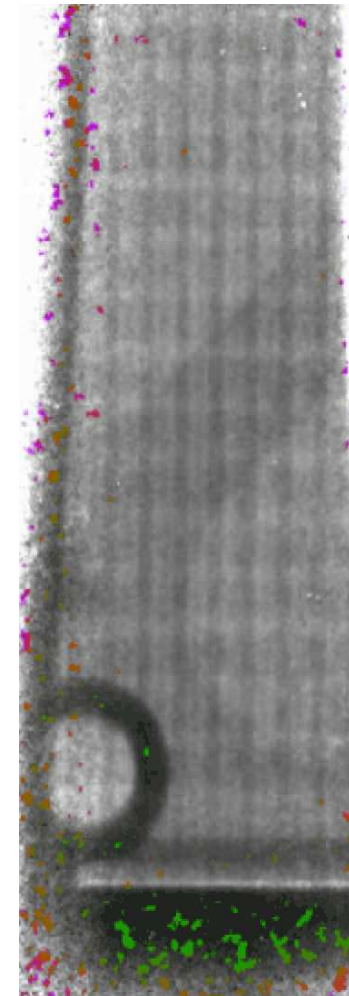


# Wasserhaushalt in Brennstoffzellen

## Visualisierung über Neutronen-Adsorption



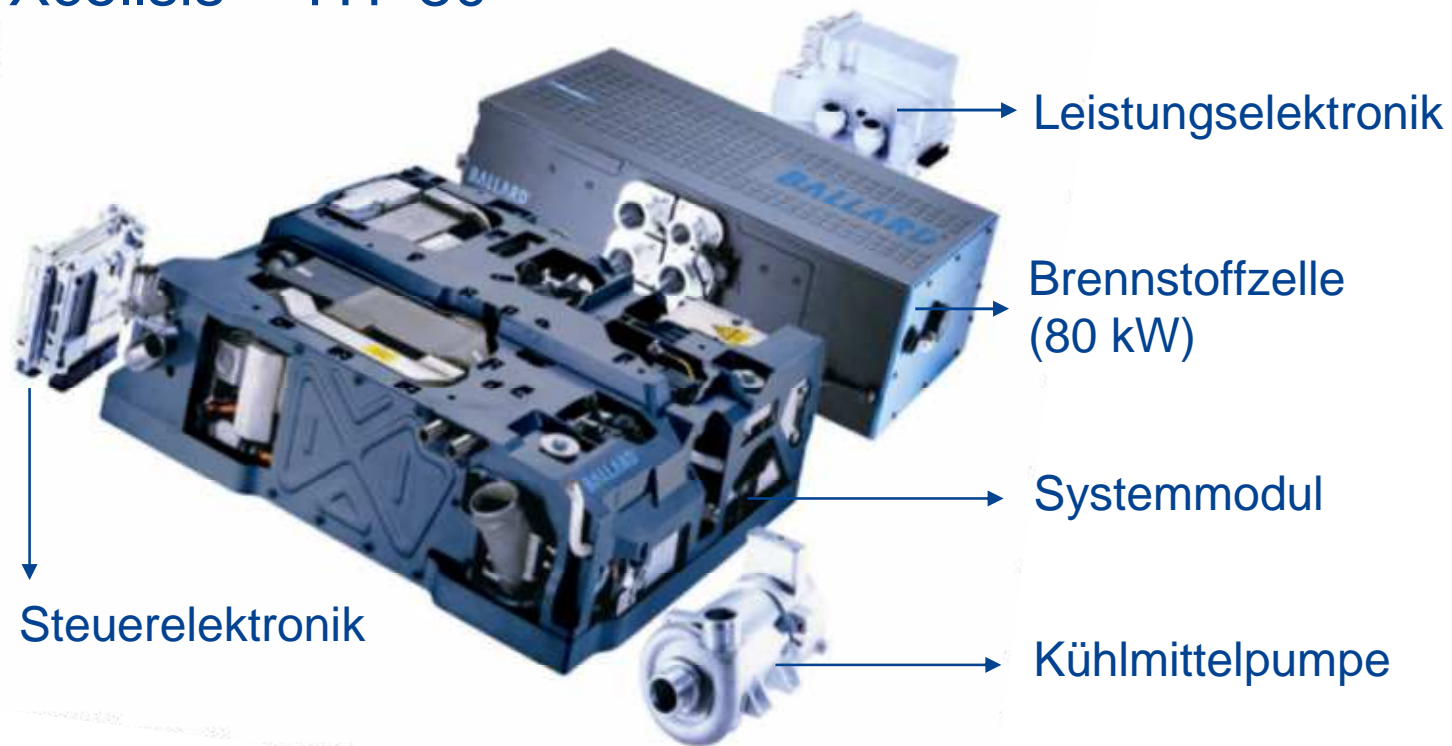
Comparison of the relative cross-sections of various elements for X-rays and for neutrons. (Bellows et. al., JES 146 (1999) 1099)



# Brennstoffzellen-Fahrzeug



## Xcellsis™ HY-80



Bildquelle: Xcellsis GmbH

# Pkw mit Brennstoffzellen-Antrieb

## Ressourcenschonende, emissionsfreie Mobilität

- Viele hundert Fahrzeuge im Alltagsbetrieb
- Konsequenter Ausbau der heutigen Flotten in Schlüsselregionen zu wettbewerbsfähigen Produkten
- Zielorientierte F&E zur Reduzierung der Kosten und Erhöhung der Zuverlässigkeit
- Aufbau einer wettbewerbsfähigen Zulieferindustrie



# Busse und Transporter

## Emissionsfreier Nahverkehr

- Emissionsfreie Innenstädte
- Mehr als 50 Fahrzeuge in Flottenerprobung im Alltagsbetrieb
- Ausbau der heutigen Flotten und Aufbau der Infrastruktur inkl. Service, Ausbildung...
- Begleitende F&E um Lebensdauer- und Kostenziele zu erreichen



## Was erwartet Sie?

- Kurzporträt ZSW
- Herausforderungen
- Erneuerbare Energien und Mobilität
- Batterien für die Elektromobilität
- Brennstoffzellen für die Elektromobilität
- Fazit

# Schlüsseltechnologien künftiger Mobilität

- Fossiles Zeitalter neigt sich dem Ende zu
- Elektromobilität: Schlüssel für eine nachhaltige Mobilität
- Erneuerbare Energien können den Energiebedarf künftiger Mobilität decken
- Elektroantriebe haben einen hohen Wirkungsgrad und sind emissionsfrei
- Der Strom für den Elektromotor kommt aus modernen Batterien oder der Brennstoffzelle



Bildquelle: Daimler



Fazit: Konsequentes und ganzheitliches Handeln aller Akteure ist Schlüssel zum Erfolg