

## Batterie- und Brennstoffzellensysteme

# Einführung

André Weber

Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffe der Elektrotechnik IAM-WET

Adenauerring 20b, Geb. 50.40 (FZU), Raum 314

phone: 0721/608-7572, fax: 0721/608-7492

[andre.weber@kit.edu](mailto:andre.weber@kit.edu)

[www.iam.kit.edu/wet](http://www.iam.kit.edu/wet)



## Termine 2017:

Termin	Datum	Thema
1	26.04.2017	Einführung
2	03.05.2017	BSZ-Systeme 1
3	10.05.2017	BSZ-Systeme 2
4	17.05.2017	Zellen und Stacks
5	24.05.2017	Nebenaggregate
	31.05.2017	keine Vorlesung
6	07.06.2017	BSZ-Systementwurf
7	14.06.2017	Langzeitstabilität
8	21.06.2017	Batteriesysteme
9	28.06.2017	Lithium-Ionen Batterien 1
	05.07.2017	keine Vorlesung
10	12.07.2017	Lithium-Ionen Batterien 2
11	19.07.2017	alternative elektrochemische Energiespeicher

**Vorlesungsmaterialien:** zum Download unter [http://www.iwe.kit.edu/3587\\_bbs.php](http://www.iwe.kit.edu/3587_bbs.php)

## Prüfung:

Typ: mündliche Prüfung

Ort: IWE

Termine: ganzjährig, nach Absprache

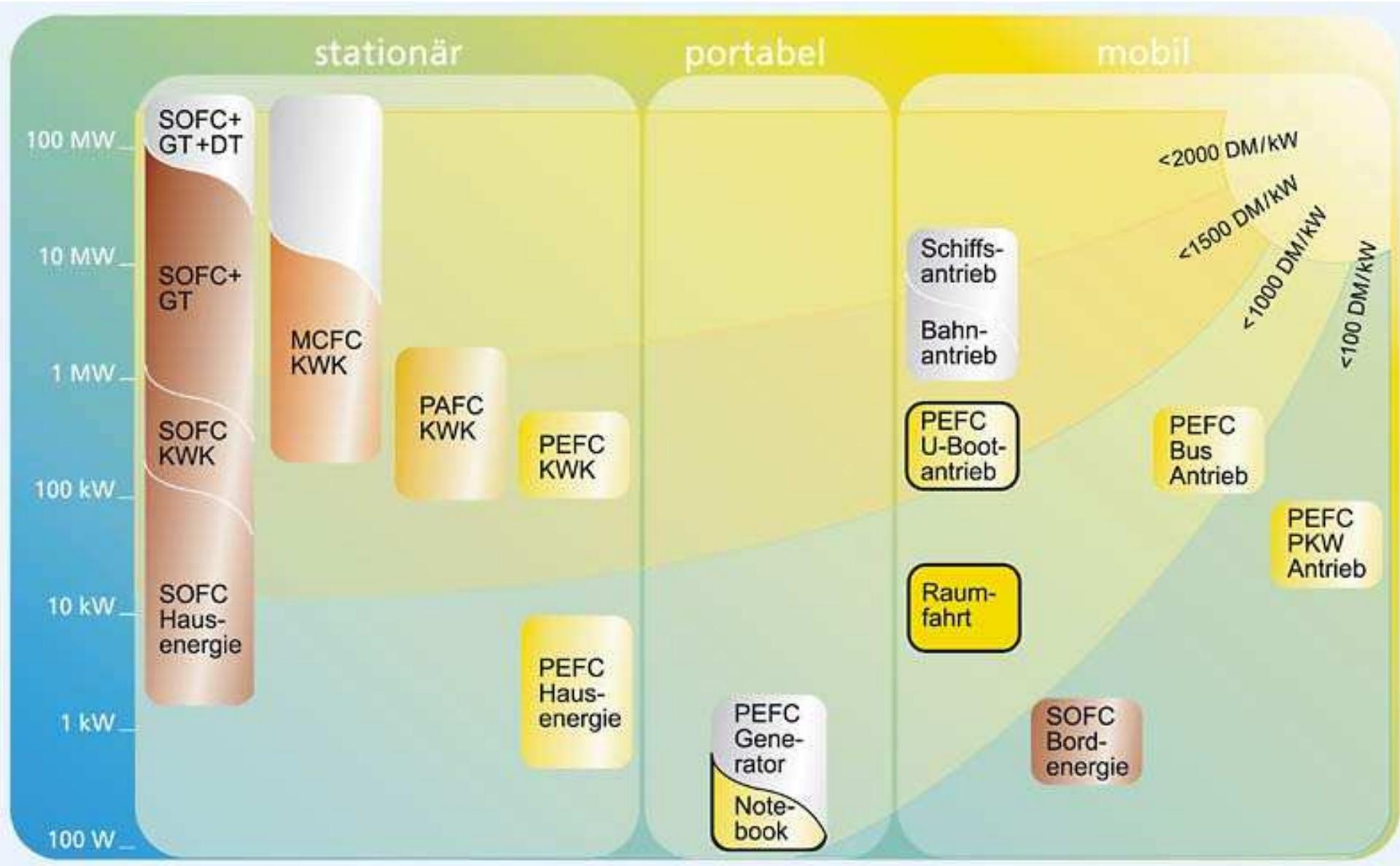
Terminanfrage / Anmeldung bitte mind. 4 Wochen vor gewünschtem Termin ausschließlich per Email!

Hinweis: Bitte verwenden Sie für die Prüfungsanmeldung und andere Anfragen ausschließlich Ihre KIT.EDU Emailadresse.



# Brennstoffzellen

## Einsatzgebiete, Leistungsklassen und Kostenziele



# Future Markets for Fuel Cells

	Portable FC-Units	Small CHP-Units	Mobile (Traction and APU)	Decentralized Power Units
				
Power Range	< 1 kW	1 ... 20 kW	5 ... 200 kW	0.1 ... 10 MW
Cost Targets	1.000 €/kW	500 €/kW	150 €/kW	1.000 €/kW
Expected Lifetime	> 1.000 h	> 40.000 h (5 years)	4.000 h (100.000 miles)	> 40.000 h (5 years)
FC-Type	PEMFC, DMFC SOFC	<u>PEMFC</u> , <u>SOFC</u>	<u>PEMFC</u> <u>SOFC-APU</u>	<u>SOFC</u> , <u>MCFC</u> PEMFC

# Fuel Cell Development at KIT

## Core Technologies

Engler-Bunte-Institut  
Bereich Gas, Erdöl, Kohle

Institut für  
Technische Chemie  
und Polymerchemie

**IAM-WET**

**IRS**

**IAM-WET**



**IRS**

**IAM-WET**

**TVT**

**IAM-WET**

**Inst. für Werkstoffe der Elektrotechnik**  
Prof. Dr.-Ing. E. Ivers-Tiffée

**Institut für Regelungs-  
und Steuerungssysteme**  
Prof. Dr.-Ing. V. Krebs

**Elektrotechnisches Institut**  
Prof. Dr.-Ing. M. Braun

**Engler Bunte Institut**  
**Bereich Gas, Erdöl und Kohle**  
Prof. Dr.-Ing. Rainer Reimert

**Inst. für Thermische Verfahrenstechnik**  
Prof. Dr.-Ing. Matthias Kind

**Institut für Technische Chemie  
und Polymerchemie**  
Prof. Dr. rer. nat. habil. O. Deutschmann

**IAM-WET**



# Brennstoffzellen-Systeme

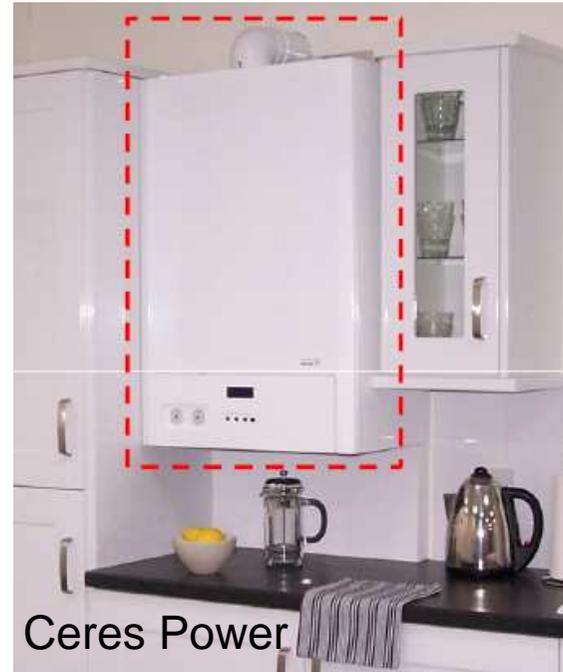
Kyocera



Bloom Energy



Ceramic Fuel Cells Limited

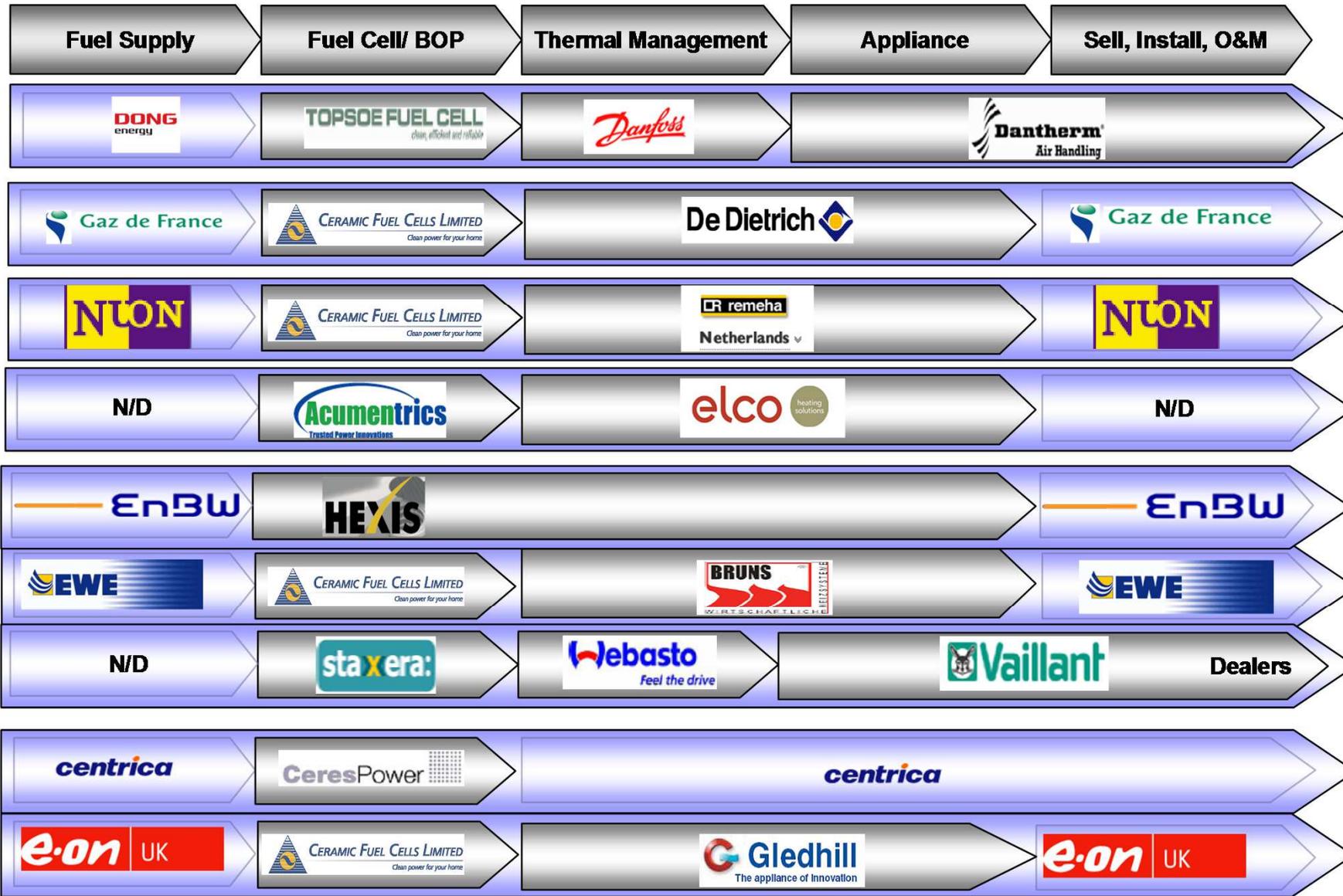


Ceres Power

Vaillant



# SOFC $\mu$ CHP Partnerships

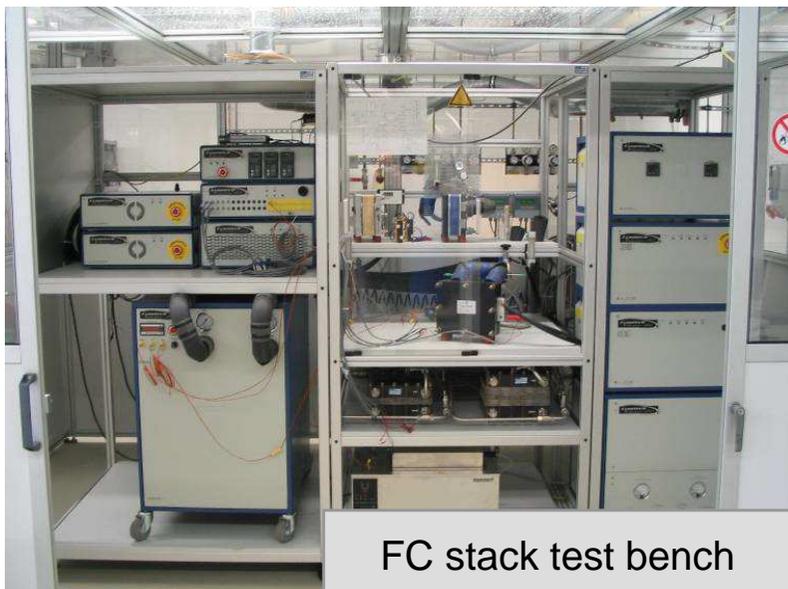


# Fuel Cell TestLab at IAM-WET

## Cooperation with European Institute for Energy Research (EIfER)



3 independent test cabinets



FC stack test bench

- testing of different fuel cell systems and components (Vaillant, Idatech, ...)
- testing of single cells and stacks (**PEM** stack test bench: up to  $1\text{kW}_{\text{el}}$ , high temperature PEMFC:  $150^{\circ}\text{C}$ )
- media supply: **natural gas**,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , air, DI-water, cooling water supply circuit
- direct grid connection
- electric loads: max.  $10\text{kW}_{\text{el}}$
- thermal loads: max.  $30\text{kW}_{\text{thermal}}$
- **EDF** (*Electricité de France*) industrial safety standard



## PEMFC – Systeme

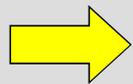
- vorhandene oder vor der Markteinführung stehende Systeme (Vaillant, Buderus,...)
- Prototyp Systeme (EDISon Projekt – ZSW, ISE, Stadtwerke KA)



## SOFC – Systeme

- vor der Markteinführung stehende Systeme (Sulzer,...)
- Prototyp Systeme (falls verfügbar)

- **begrenzte Information über Systemkomponenten und Systemsteuerung**
- **begrenzte Anzahl von erfassbaren Daten und Parametern**
- **begrenzte Information über Verlust- und Fehlerursachen**



**Beurteilung und Vergleich unterschiedlicher Systeme schwer**



Leitprojekt EDISon: Intelligente Energieverteilungsnetze durch Anwendung innovativer, dezentraler Erzeuger-, Speicher-, Informations- und Kommunikationssysteme  
- Stadtwerke Karlsruhe, ZSW Ulm, Fraunhofer ISE -



## EDISon-System

PEMFC mit Dampfreformer

Energieträger: Erdgas

Leistung: ~ 2 kW elektrisch  
~ 4 kW thermisch

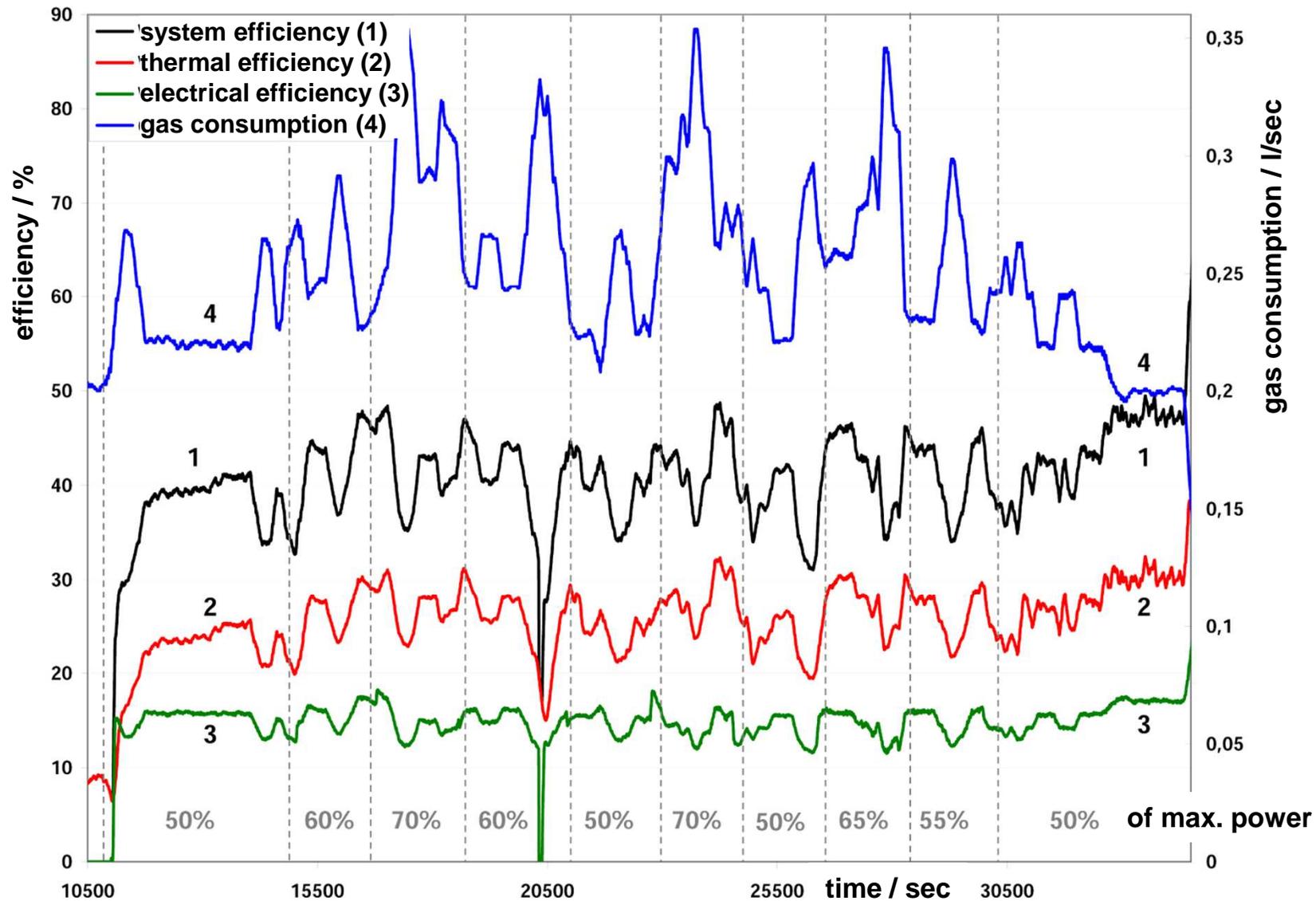
Wirkungsgrad: bis zu 75% (gesamt)

Brennstoffzelle: PEM  
2 kW, 80 Zellen

⇒ Messungen am System

⇒ Ermittlung von Leistung und Wirkungsgrad

# Electrical and Thermal Characterisation System Efficiencies (without offgas recuperation)

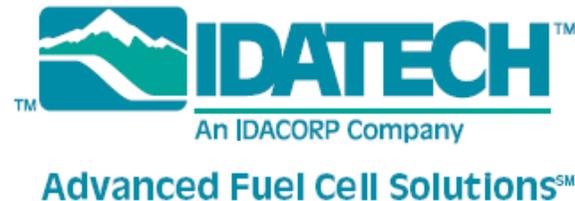


# Testing of Fuel Cell Systems

## Idatech FCS 1200

### FCS 1200 fuel cell system

- FC-system with methanol/water steam reforming unit
- grid independent power supply
- el. power: 0 - 1000 W (dc power)
- voltage 44 - 56V
- optional: 850 W ac power

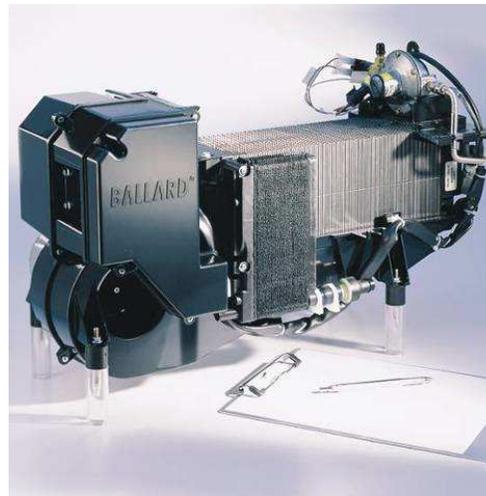


### Ballard FC-Stack

- Nexa Power Module (PEMFC)
- el. power: 1200 W
- voltage: 26,5 - 50V

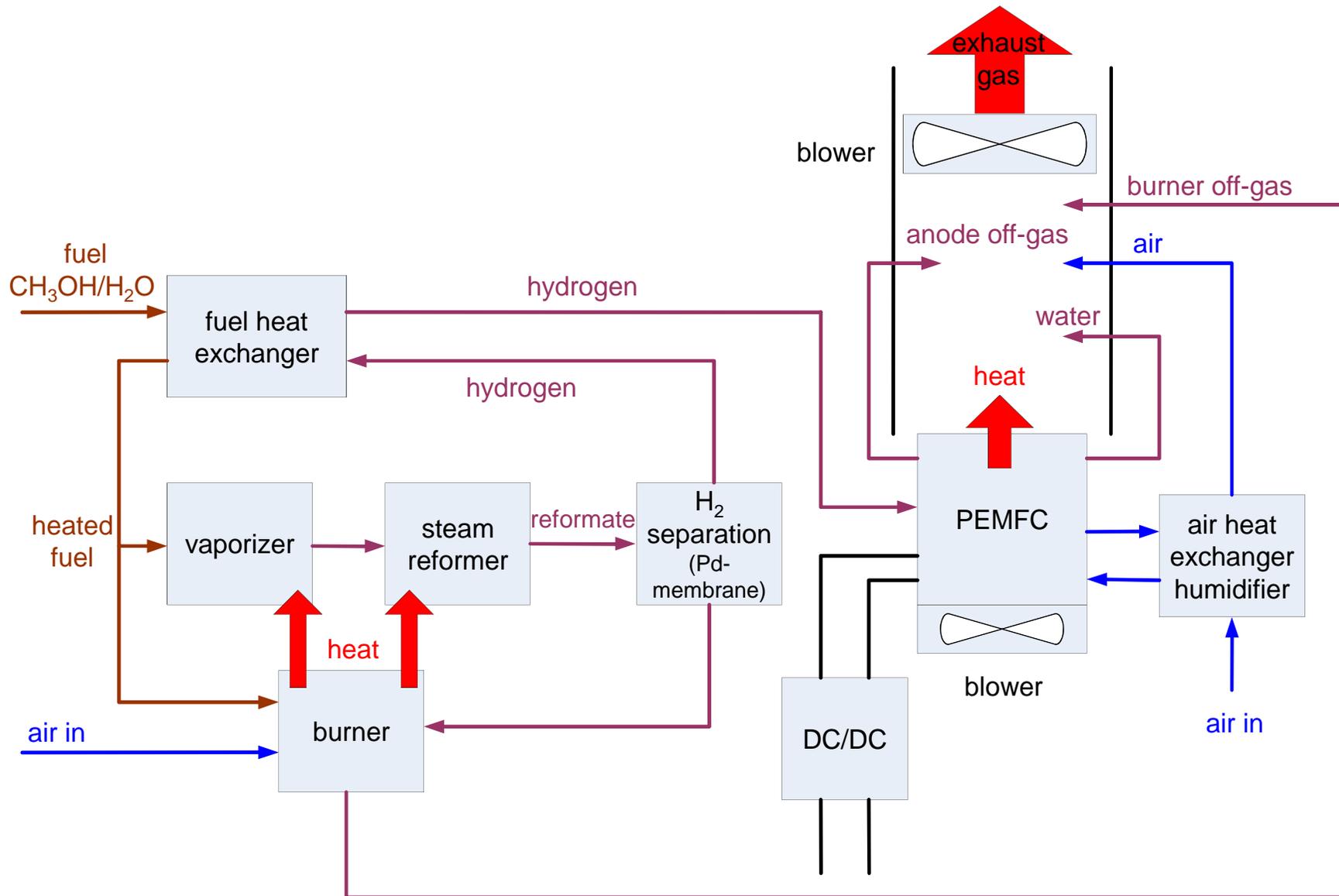


**BALLARD**



# Testing of Fuel Cell Systems

## Idatech FCS 1200

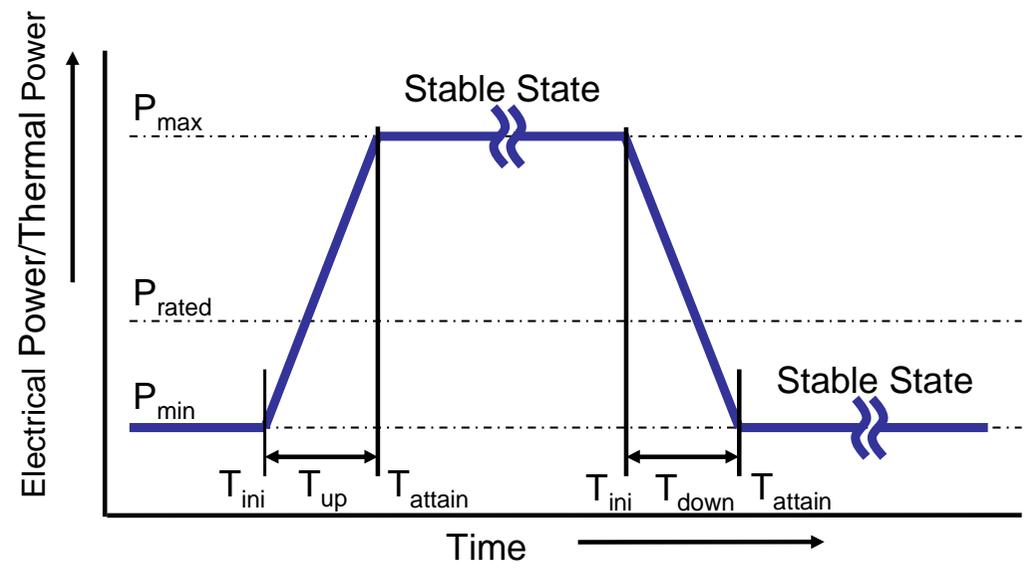


# Standardized System Testing

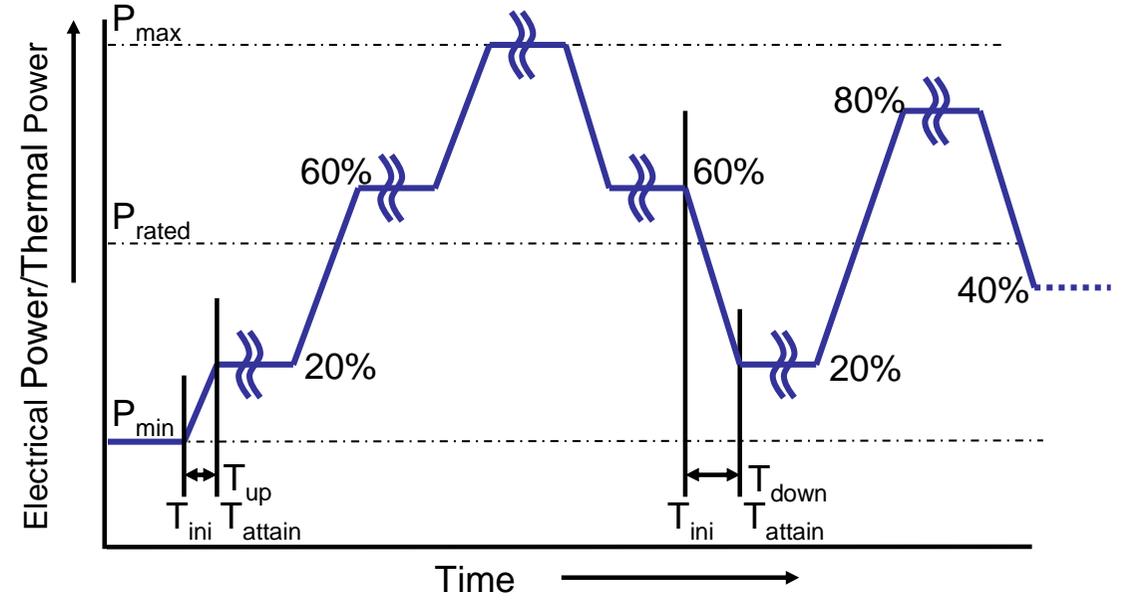
## Definition of Standardized System Test Routines

- every system tested the same way ➔ necessary for comparable system test results
- comparable measurement values ➔ determine system parameters necessary for modeling
- complete system test module catalogue based on: IAM-WET testing, IEC TC105 standards, FCTESTNET Test Modules

### Steady State Test Modules



### Dynamic Test Modules



# Testing of Fuel Cell Systems

## FCTESTNET Electrical Load Following Test Module

### c) “Transient” load cycle test:

Starting at the rated electrical power output operating point equal load changes according to Fig. 9-3 shall be applied to the system and hold in each operating point for equal time periods, starting with the maximum time period ( $T_{up}$ ,  $T_{down}$ ) determined in a) and b). The load cycle ends with the rated electrical power output. The load cycle shall be iteratively applied to the system changing the time periods for the single load steps down to 5 min (if in the range of manufacturer’s specifications).

In this case the system will not reach thermal equilibrium conditions and has to react with different electrical power output values than measured in a) and b).

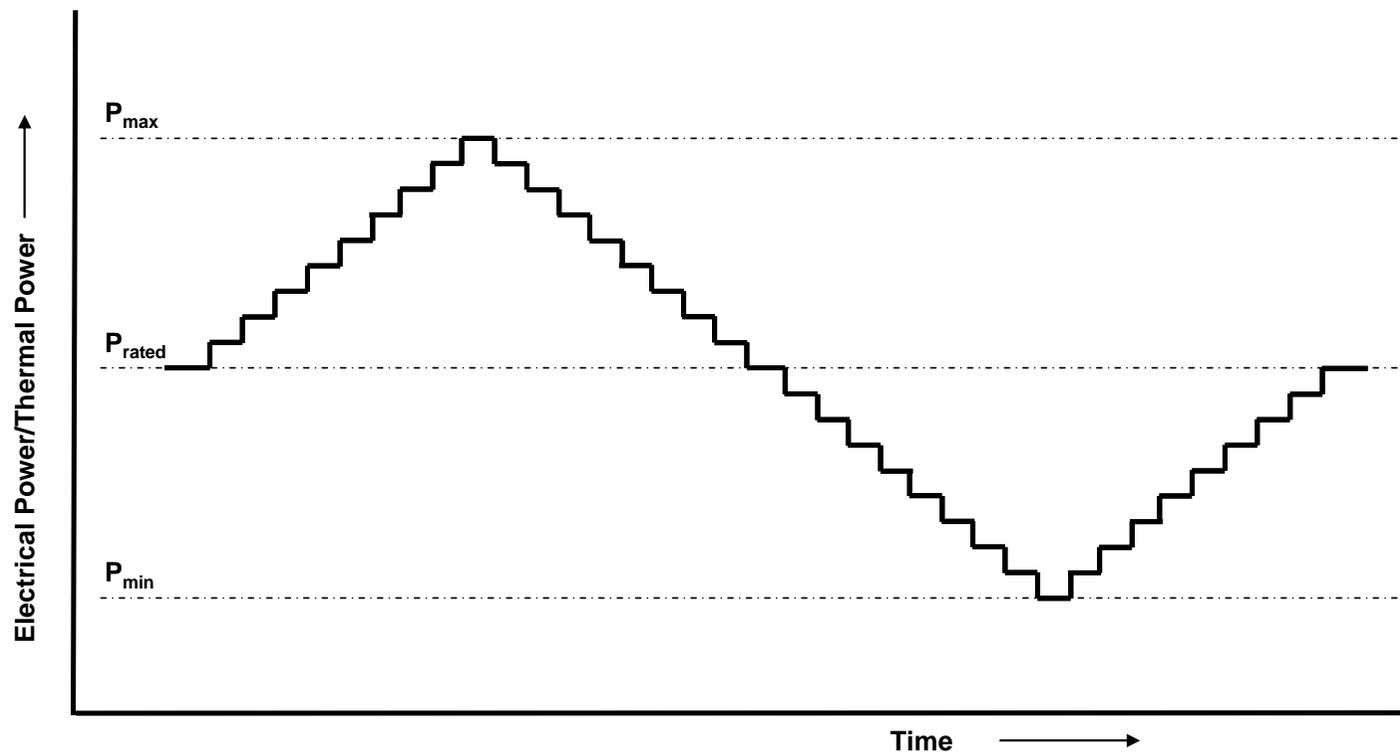
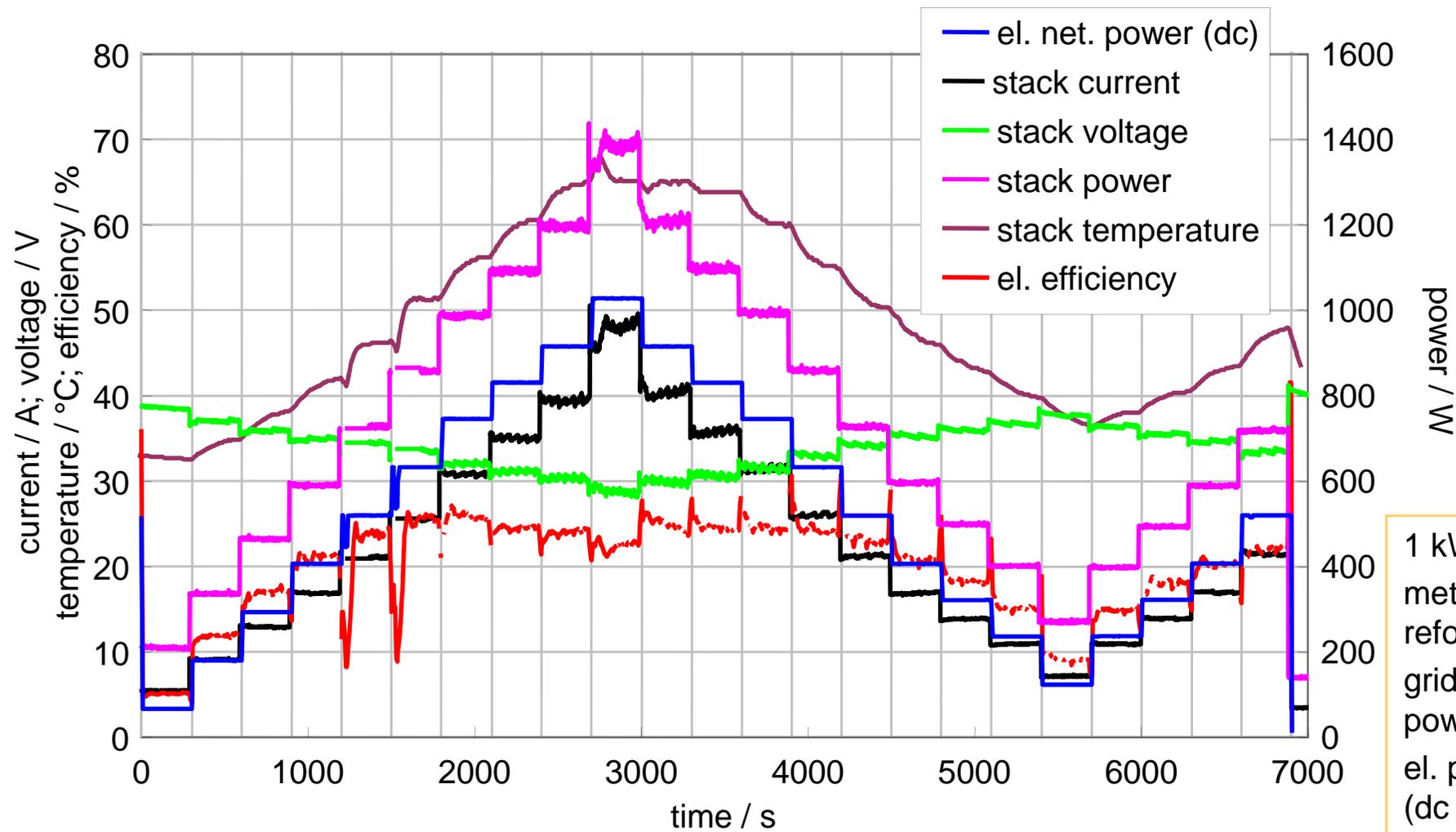


Figure 9-3: transient load cycle test.

# Testing of Fuel Cell Systems

## Transient Load Cycle Test



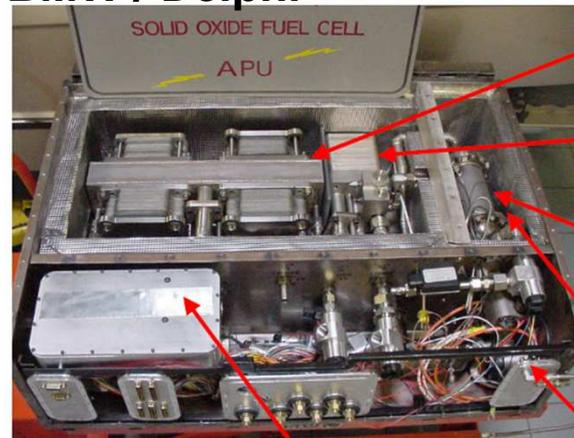
1 kW PEMFC-system  
methanol/water steam  
reforming unit  
grid independent  
power supply  
el. power: 0 - 1000 W  
(dc power)  
voltage 44 - 56V

# Zell- und Stackkonzepte



**Sulzer Hexis**

**BMW / Delphi**



BMW Group

Luft-Gebläse  
Reaktionsluft und  
Kühlluft

Brennstoffzellen-Stack  
Erzeugung elektrischer Energie  
aus Reformat ( $H_2$  und  $CO$ )

Waste Energy Recovery  
Restgasverbrennung,  
Aufheizung Reaktionsluft

Hauptreformer  
Aufheizung Stack,  
Erzeugung von Reformat  
(20% $H_2$ , 20% $CO$ , 3% $CH_4$ , Rest  $N_2$ )

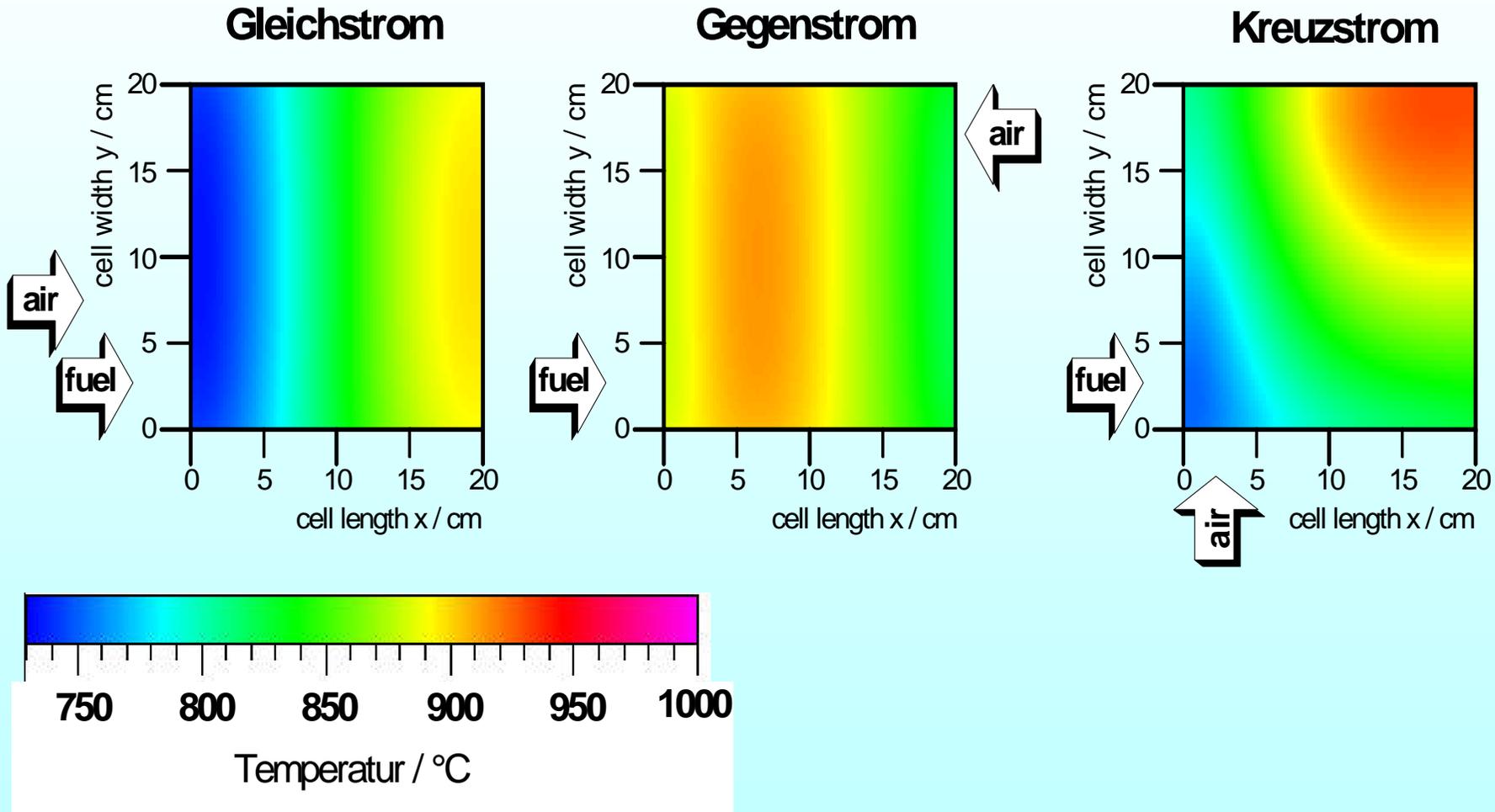
Mikroreformer  
Start Hauptreformer

Kraftstoff-  
versorgung



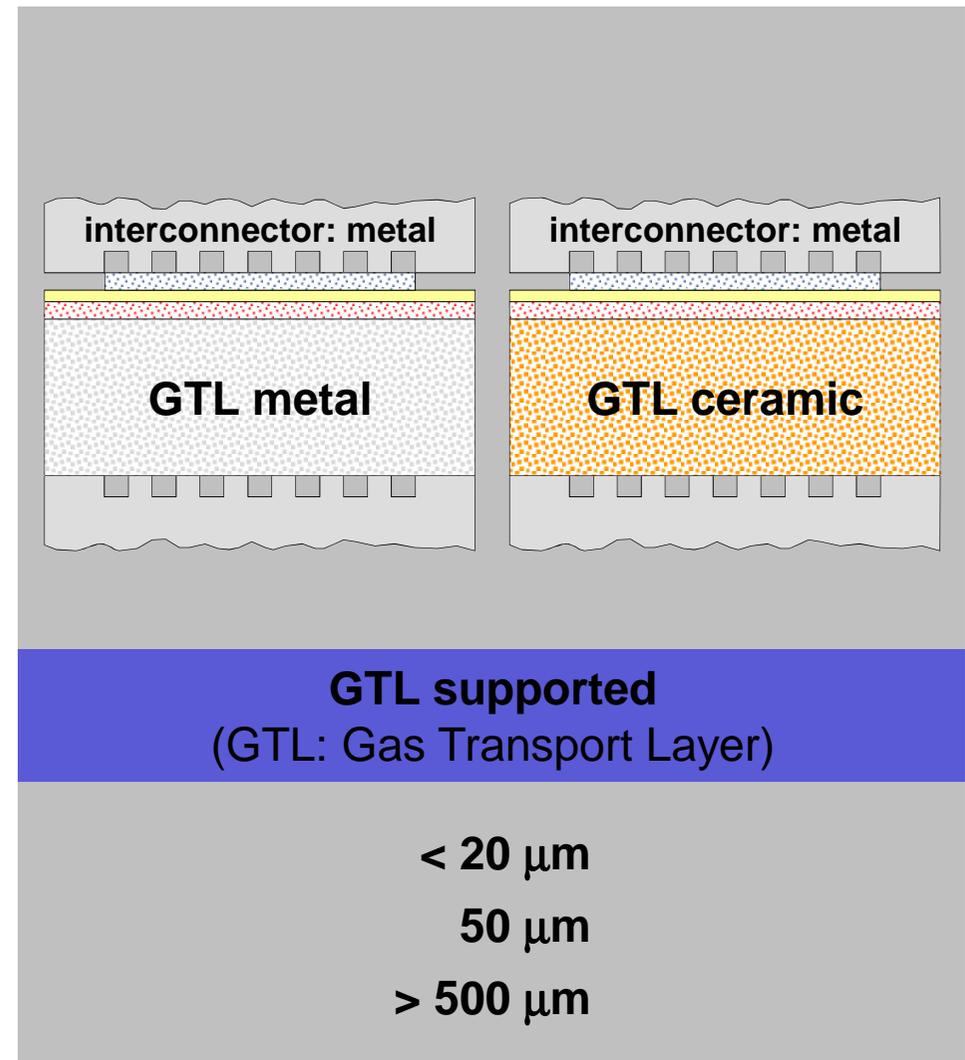
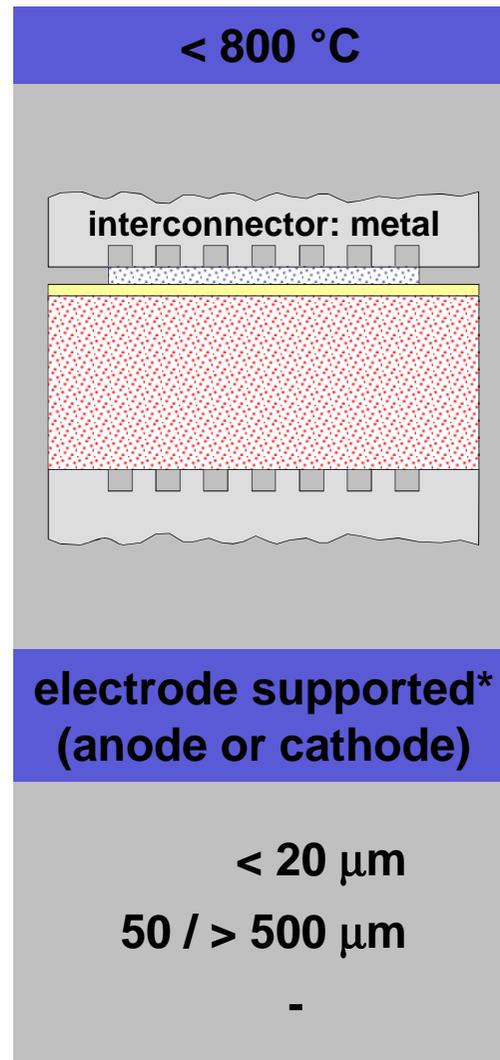
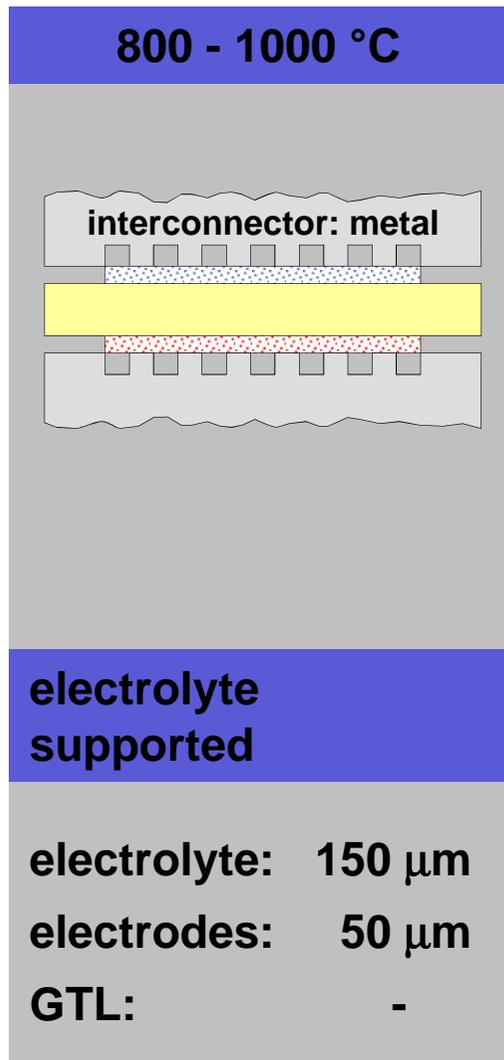
**Siemens-Westinghouse**

# Modellierung: Temperaturverteilung bei interner Reformierung



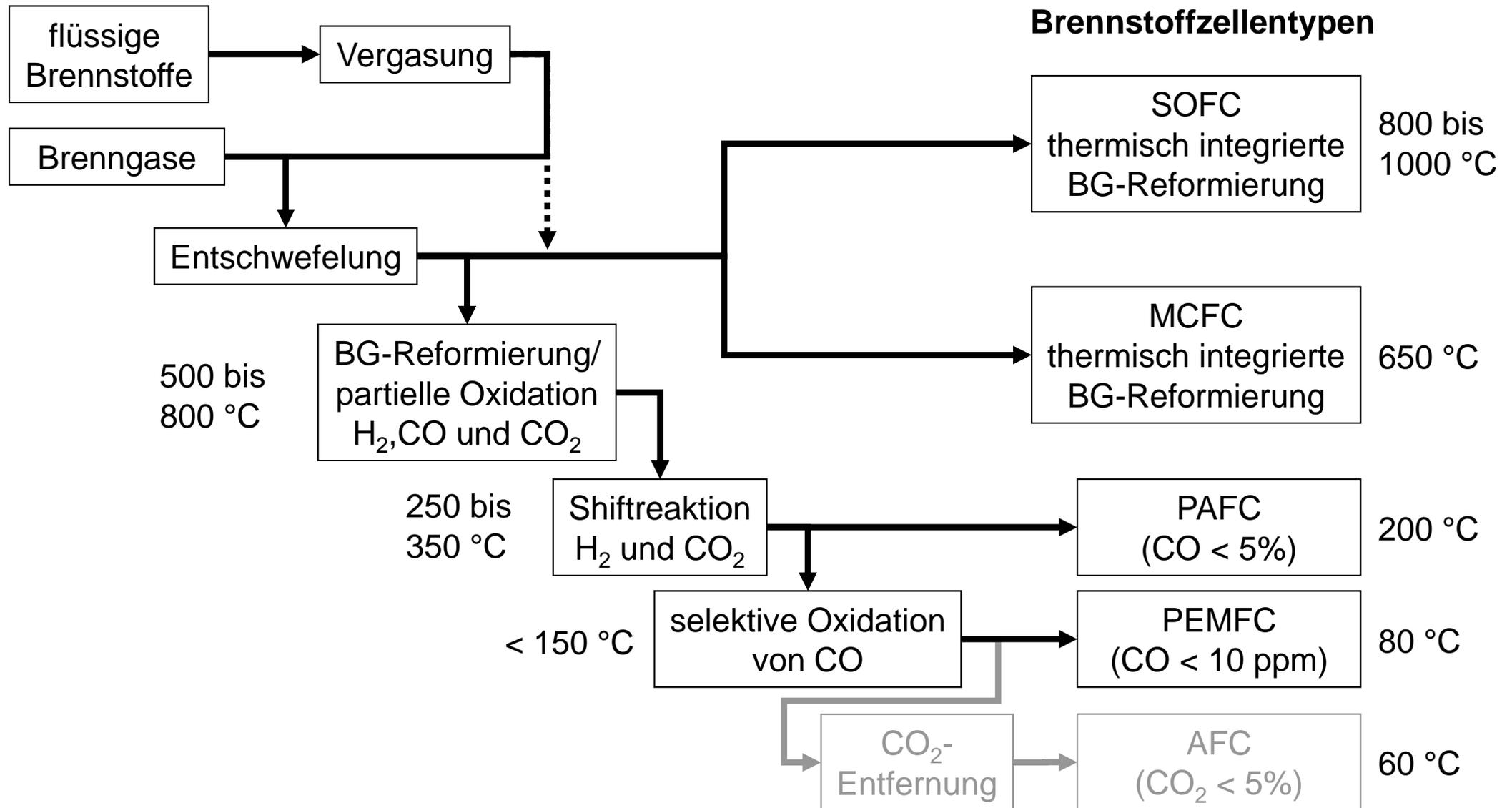
# Solid Oxide Fuel Cell

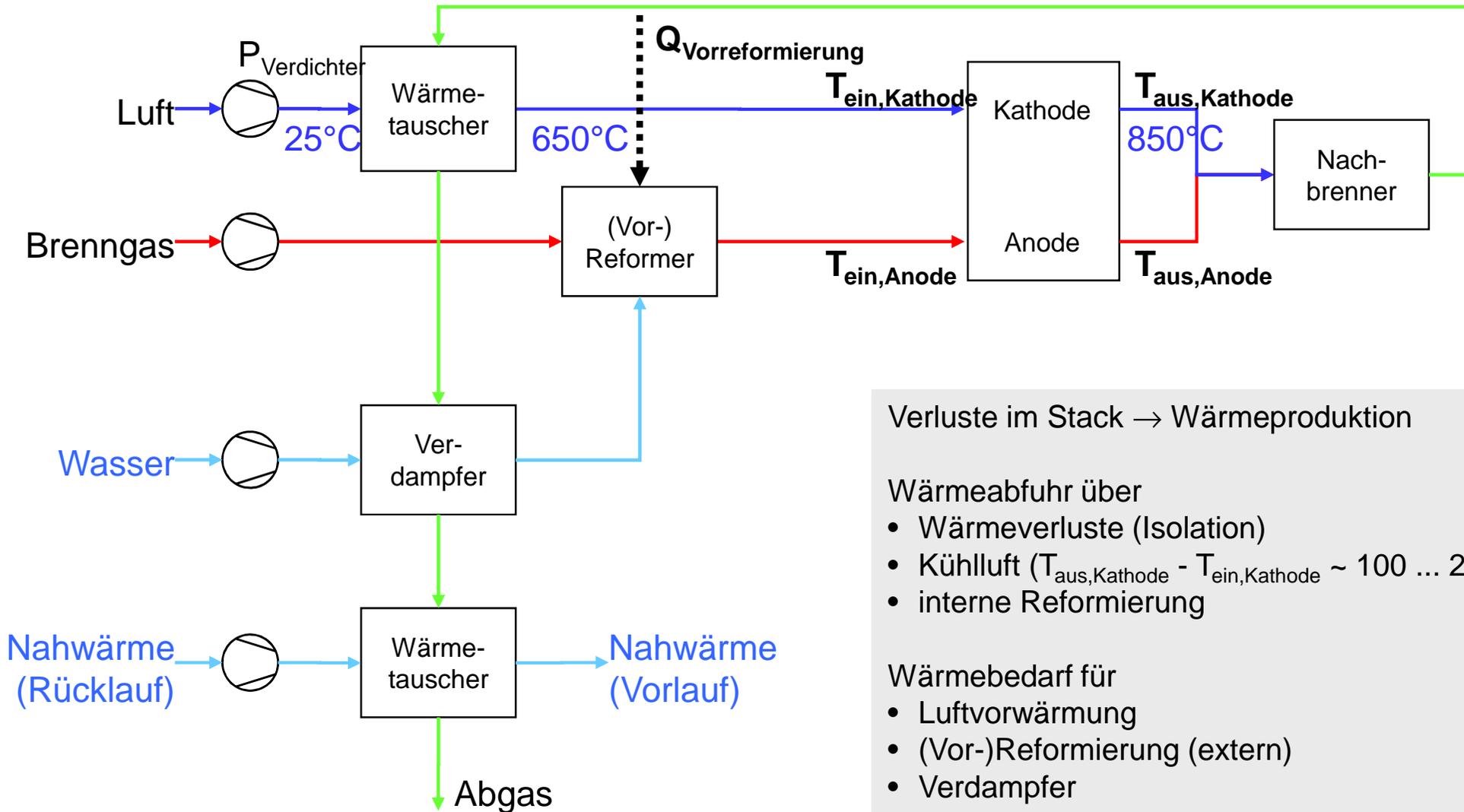
## Planar Cell Concepts for decreased operating Temperature



\*Thickness of Electrodes and Electrolyte similar for tubular SWPC concept

# Brennstoffaufbereitung für verschiedene BSZ-Typen





Verluste im Stack → Wärmeproduktion

Wärmeabfuhr über

- Wärmeverluste (Isolation)
- Kühlluft ( $T_{\text{aus,Kathode}} - T_{\text{ein,Kathode}} \sim 100 \dots 200 \text{ K}$ )
- interne Reformierung

Wärmebedarf für

- Luftvorwärmung
- (Vor-)Reformierung (extern)
- Verdampfer



## Systemtechnik

### Auswirkung der internen Reformierung: Beispiel 100 kW SOFC

Int. Ref. grad	Luftzahl	Verdichterleistung	$\eta_{\text{Sys}}$	$P_{\text{Luftvorwärmer}}$
0 %	10	15 kW <sub>e</sub>	38 %	410 kW <sub>th</sub>
50 %	7	10 kW <sub>e</sub>	43 %	208 kW <sub>th</sub>
100 %	3	4 kW <sub>e</sub>	49 %	90 kW <sub>th</sub>

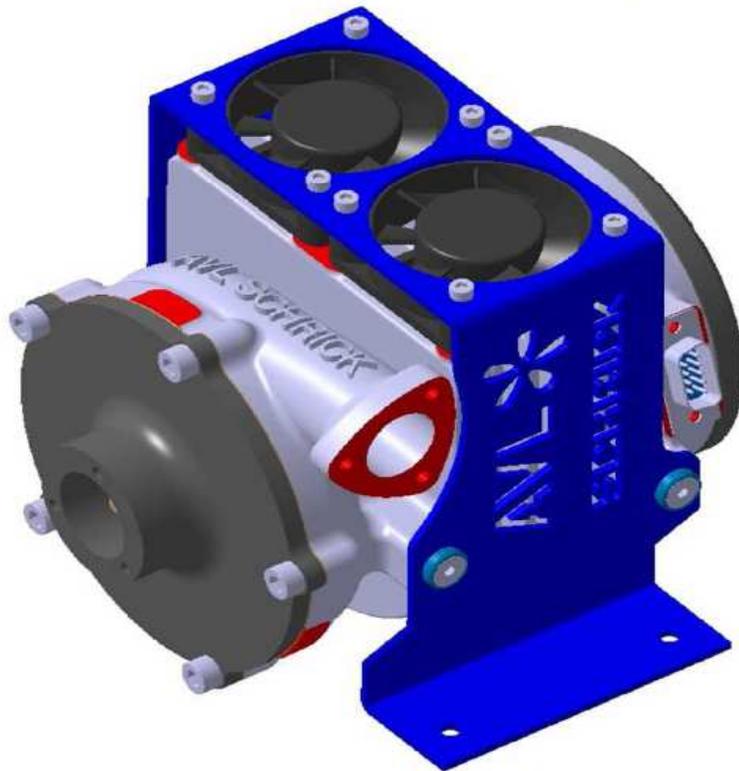
#### Inputdaten für die Anlagensimulation

Brennstoff:	Erdgas 100 kW (H <sub>u</sub> )
Spannung:	0,75 V
Luft-Aufheizspanne im Stack:	100 K
Brennstoffnutzungsgrad:	80 %
Verdichter-Wirkungsgrad:	70 %
Druck	1 bar

## AVL SCHRICK Fuel Cell Blowers

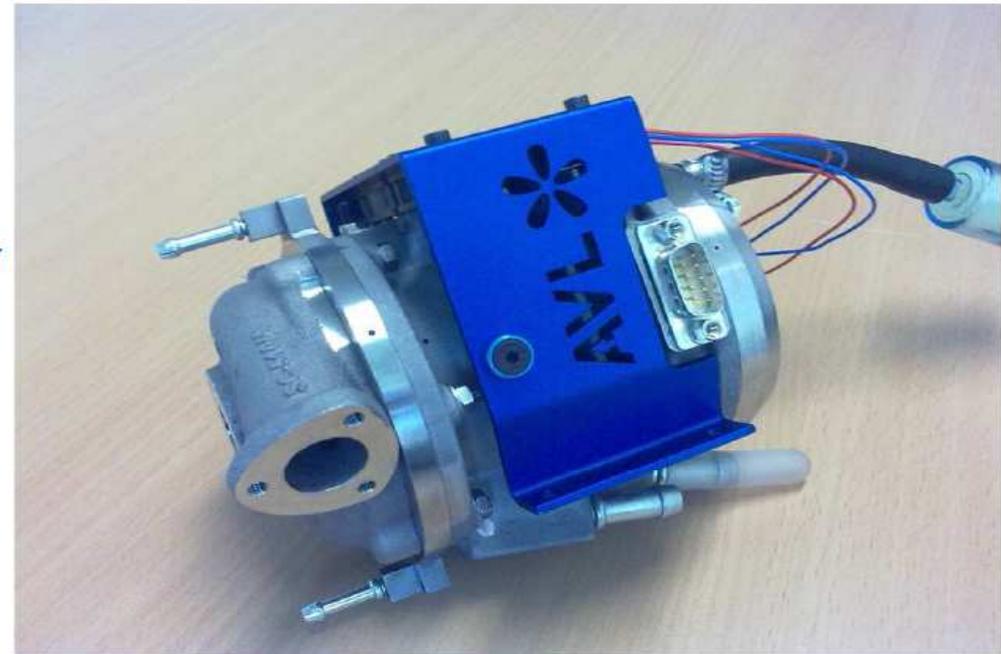
### FC Blower Properties

- Very compact Design
- Functional integrated Housing & E-Motor



Air Blower (available in ~8 weeks)

DACH II Workshop, 23.02.2011, Juergen Rechberger, AVL List GmbH

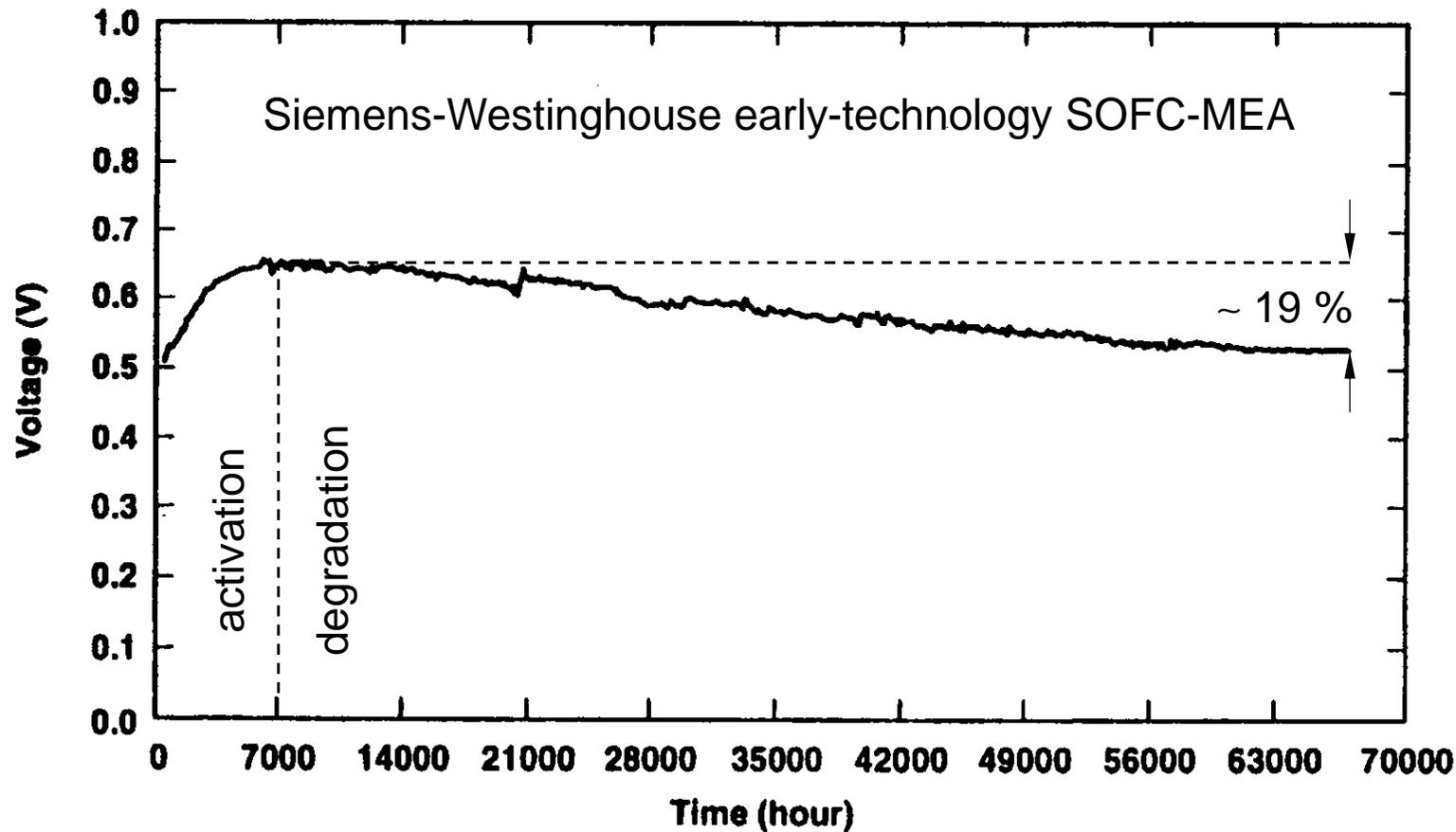


Anode Blower

- Low Heat Radiating Area
- Efficient Cooling and Lubrication
- Suitable for Hydrogen containing Media
- Up to 500°C Medium Temperature

# Long-Term Stability of Fuel Cells

## Time and Cost Issues



[S.C. Singhal, SOFC V, PV97-40, 1997]

### duration

69,000 h  
8 years  
1989 – 1997

### assume

\$ 100 per day

### cost

\$ 300,000 total

### degradation

19 % total  
0.3 % / 1,000 h

### results

available after  
5...10 years

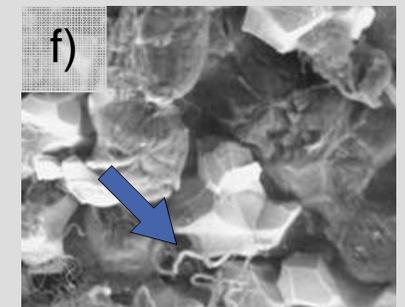
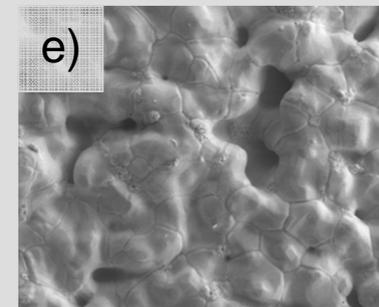
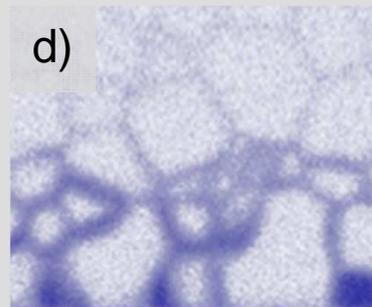
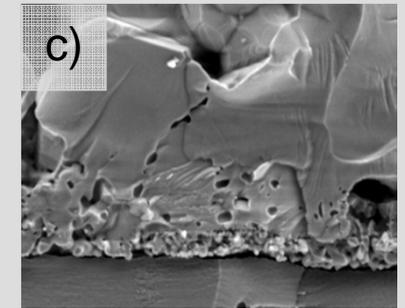
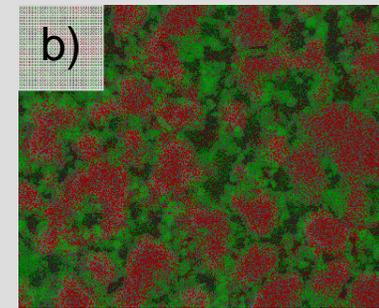
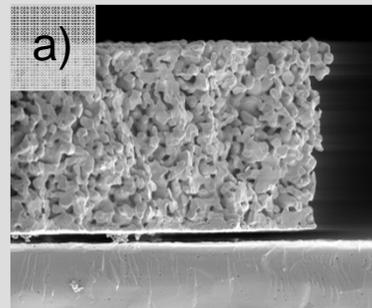
MEA: membrane-electrode assembly



## in SOFC

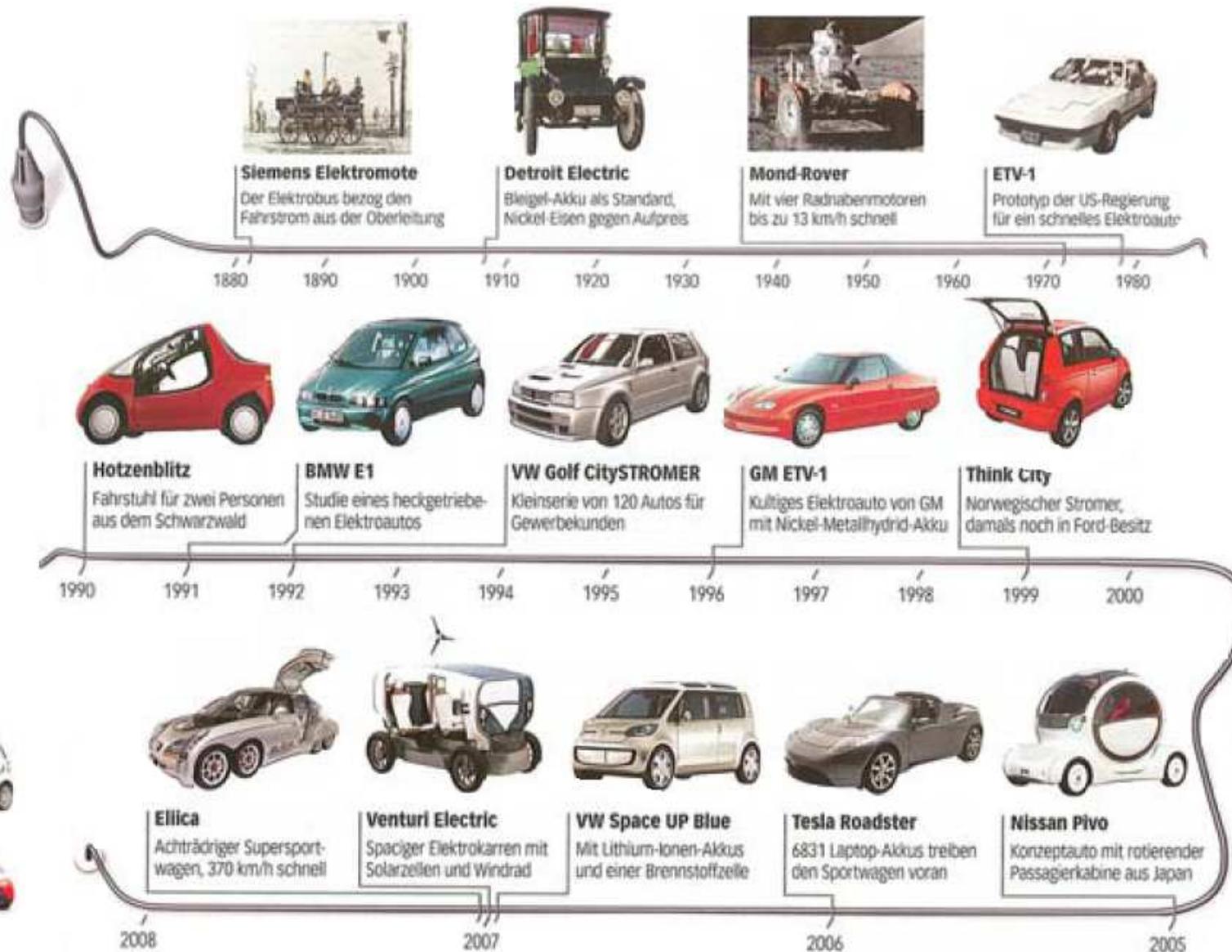
many potentially competing degradation mechanisms are known:

- a) delamination of layers
- b) agglomeration of catalyst particles
- c) formation of secondary phases
- d) interdiffusion and demixing
- e) densification of porous electrodes
- f) carbon deposition in anode
- g) electrolyte conductivity loss
- h) corrosion of interconnects
- i) etc.



⇒ in addition, activation processes that improve the performance are known (from cathodes).

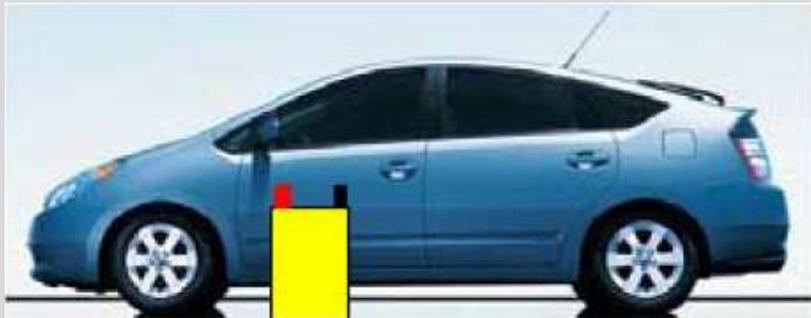
# Geschichte der Elektroautos



Die ersten Automobile waren elektrisch!

90er Jahre: verschiedene Fahrzeuge erhältlich! (Prototypen, Kleinserien)

2000 ... 2010: erste (Vor-)Serienfahrzeuge



## Hybridfahrzeug (HEV)

Speicher ca. 1 kWh, Ladung nur während Fahrt, Treibstoffeinsparung max. 20%.



## Plug-In Hybridfahrzeug (PHEV)

Speicher 5-10 kWh, Ladung aus dem Netz, 50-70 km Reichweite ohne Treibstoff, volle Reichweite, volle Leistungsfähigkeit.



## Elektrofahrzeug (EV)

Speicher 15-40 kWh, Ladung aus dem Netz, 100 - 300 km Reichweite ohne Treibstoff.

## **Start/Stopp-Funktion**

Automatisches Abschalten des Verbrennungsmotors bei Stillstand des Fahrzeuges, selbstständiger Start des Motors bei Freigabe der Bremspedals vor erneutem Anfahren.

## **„Boosting“**

Verbrennungsmotor und E-Maschine arbeiten beim Beschleunigen zusammen. Antriebsdrehmomente addieren sich, der Verbrennungsmotor kann ohne Einbußen im Beschleunigungsverhalten leistungsschwächer gewählt werden.

## **Elektrisches Fahren (Vollhybrid bzw. EV)**

Antrieb nur durch den Elektromotor, emissionslose und leise Fortbewegung.

## **Generatorbetrieb**

Der Verbrennungsmotor wird in einem hohen, betriebsgünstigen Drehmomentbereich betrieben (Lastpunktanhebung), die E-Maschine arbeitet im Generatorbetrieb. Die nicht zur Fortbewegung benötigte Motorleistung wird zum Laden der Traktionsbatterie verwendet.

## **Rekuperation**

Bremsen mittels E-Maschine im Generatorbetrieb Traktionsbatterie wird geladen.

## **Segeln**

Verbrennungsmotor und E-Maschine inaktiv.

## • Micro-Hybrid

- E-Maschine: 2-3 kW
- Betriebsspannung 12V.
- einfache Integration in bestehende Fahrzeugmodelle
- Betriebsmodi: Start/Stopp, Generatorbetrieb
- mögliche Verbrauchseinsparung: bis 10%

## • Mild-Hybrid

- E-Maschine: 10-15 kW
- Betriebsspannung: 42-150V
- mögliche Verbrauchseinsparung: bis 20%
- Betriebsmodi: Start/Stopp, Generatorbetrieb, „Boosting“, Rekuperieren

## • Voll-Hybrid (& Power-Hybrid)

- E-Maschine: >15 kW (>50kW)
- Betriebsspannung: >120V.
- Betriebsmodi: Start/Stopp, Generatorbetrieb, „Boosting“, Rekuperieren, elektr. Fahren
- Hybridanordnung: z.B. Parallelhybrid
- mögliche Verbrauchseinsparung: >20%





Toyota  
*Prius II*

Mercedes-Benz  
*S 400 HYBRID*

Mercedes-Benz  
*ML 450 HYBRID*

Motor	57 kW / 78 PS	205 kW / 279 PS	205 kW / 279 PS
max. Drehmoment	115 Nm	338 Nm	338 Nm
E-Motor	1x / k.A.	1x / 160 Nm	2x / 260+270 Nm
Traktionsbatterie	Ni-MH, prismatisch	Li-Ionen, zylindrisch	Li-Ionen, zylindrisch
Verbrauch* (komb.)	4,3 l/100 km	7,9 l/100 km	7,7 l/100 km
CO <sub>2</sub> -Emission	104 g/km	190 g/km	185 g/km
Markteinführung (D)	2003*	2009	2009

\* Werksangaben nach NEFZ-Zyklus    \*\* Prius I 1997 (J) 2000 (D), Prius II (2003), Prius III (2009)

## NiMH-Batterie im Prius II

28 Module mit 6 Zellen  
(168 Zellen @ 1,2V = 201,6 V)

Zelltyp: prismatisch

Nennkapazität: 6,5 Ah

Gewicht: 39 kg

Energie: 1,3 kWh

Energiedichte: 41 Wh/kg

Spitzenleistung: 40 kW

Leistungsdichte: 1300 W/kg

Elektrische Reichweite: 3 km

Hersteller: Panasonic

Preis Batterie: ~2500€ (7/2008)



## Mild-Hybrid (Start Stopp-Funktion)

E-Motor: 15 kW

V-Motor: V6, 205 kW

Beschleunigung: 7,2 s (0-100 km/h)

Mehrgewicht (Hybrid): 75 kg

Verbrauch: 7,9 l (Einsparung 2,2 l  
gegenüber Vorgängermodell)

CO<sub>2</sub>-Emission: 190 g/km

## Traktionsbatterie:

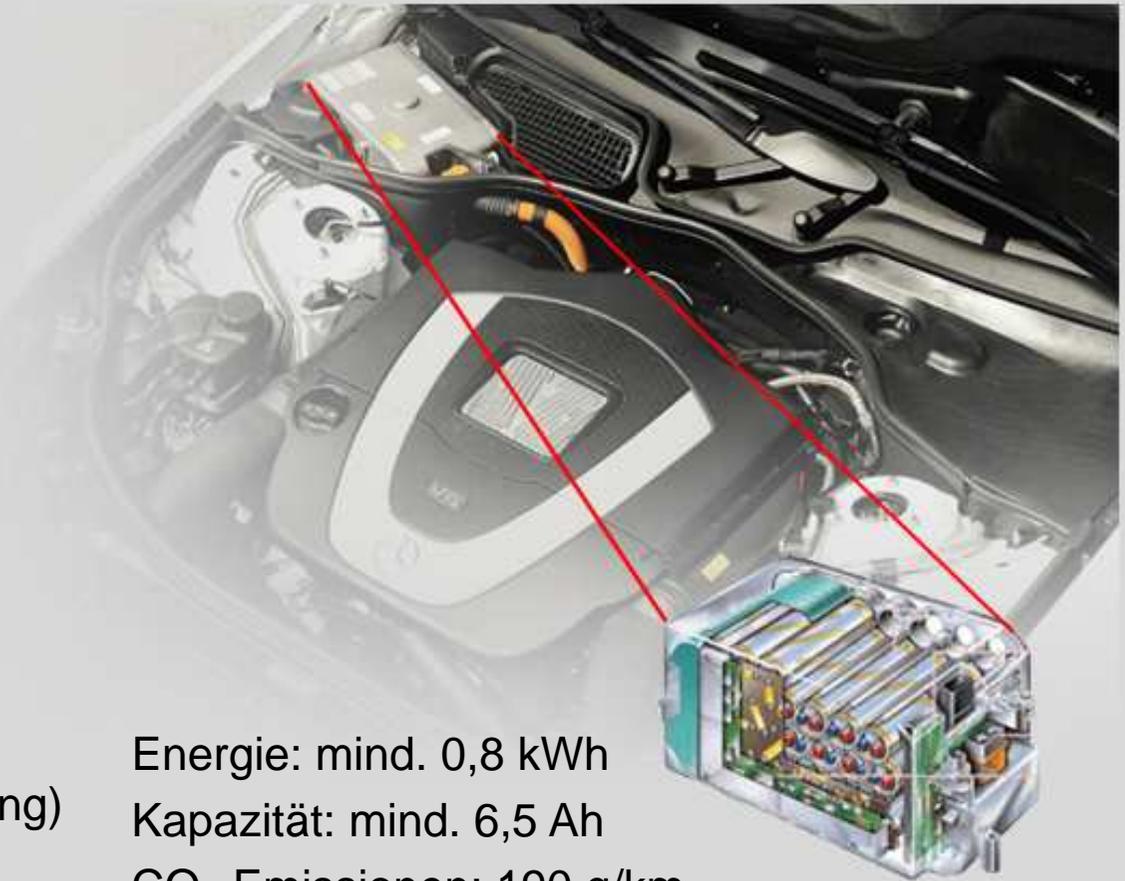
Li-Ionen, zylindrisch

35 Zellen, 1 Zellblock (Zellen + Kühlung)

Kühlung über Fahrzeugklimaanlage

Nennspannung: 126 V (87,5 V bis 144 V)

Leistung 19 kW/10 s (EoL 50% SOC)



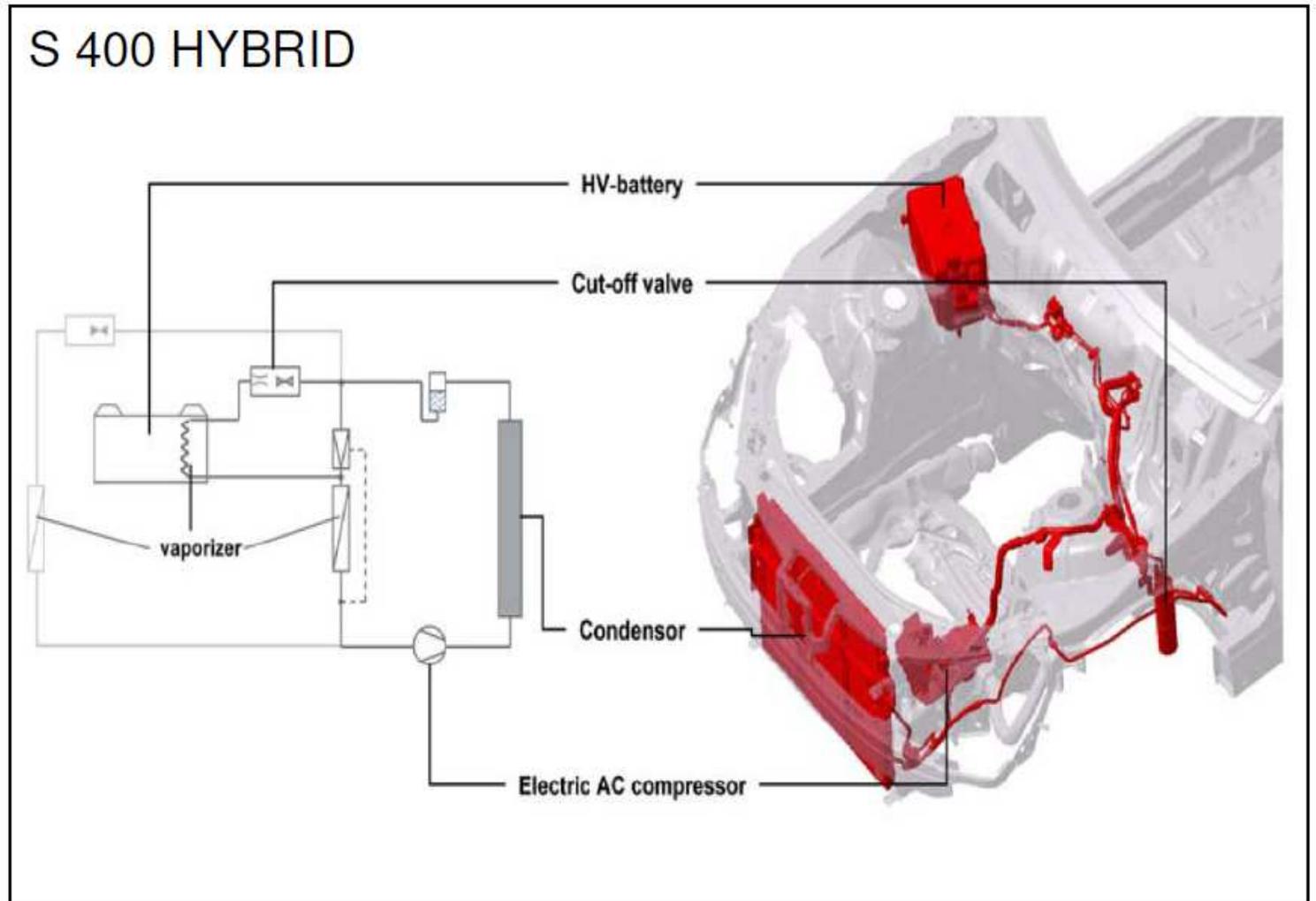
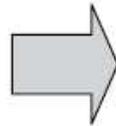
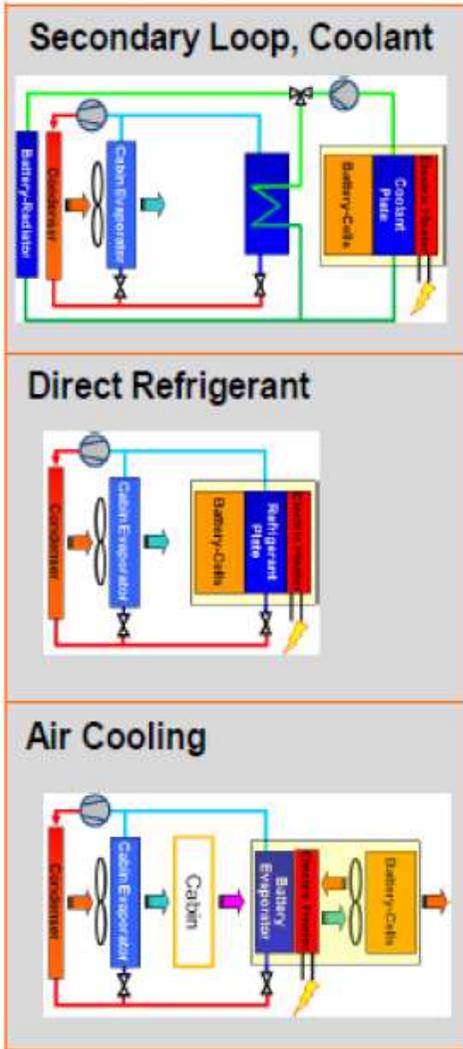
Energie: mind. 0,8 kWh

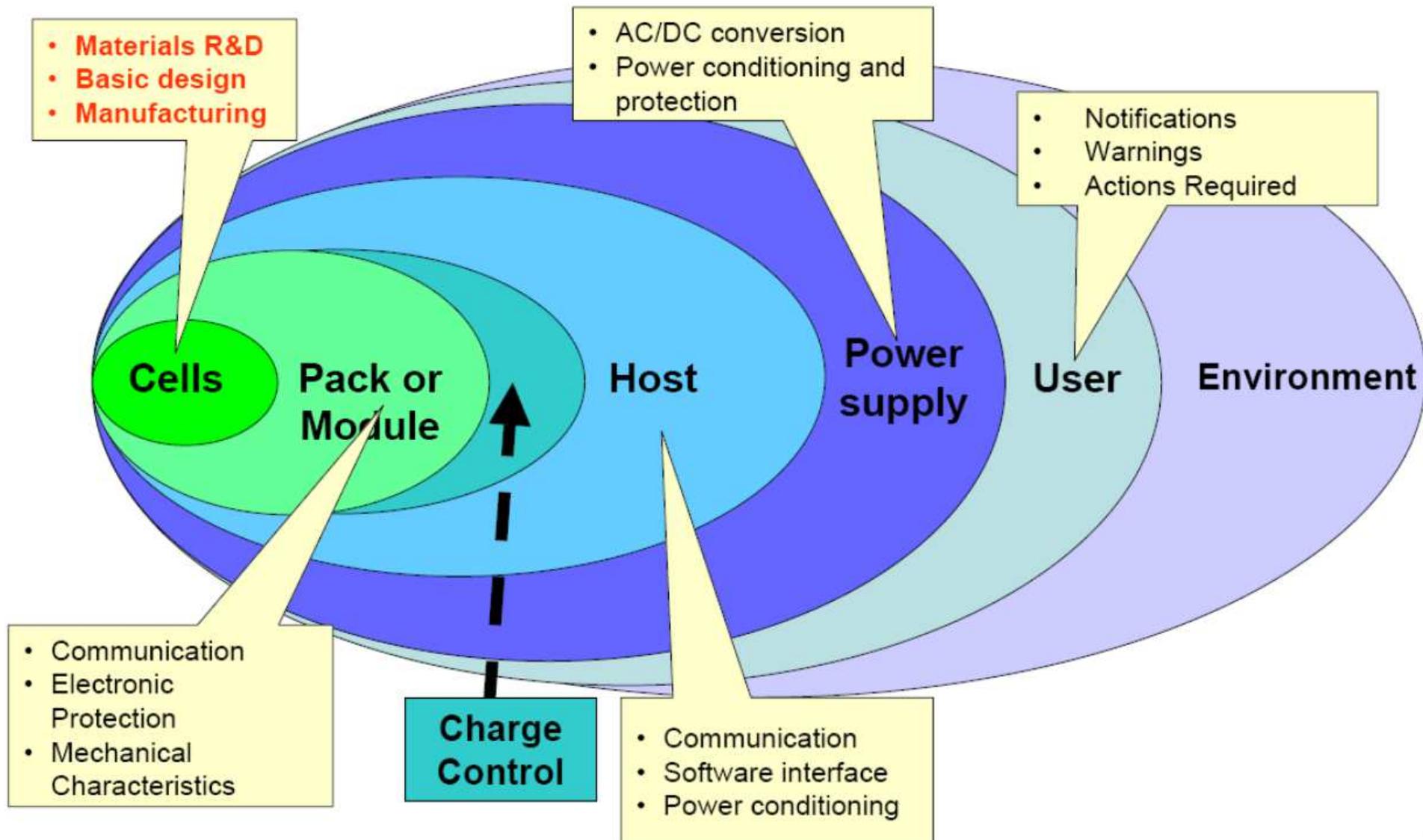
Kapazität: mind. 6,5 Ah

CO<sub>2</sub>-Emissionen: 190 g/km

Lebensdauer: 10 Jahre (Ø Temp: 40°C)

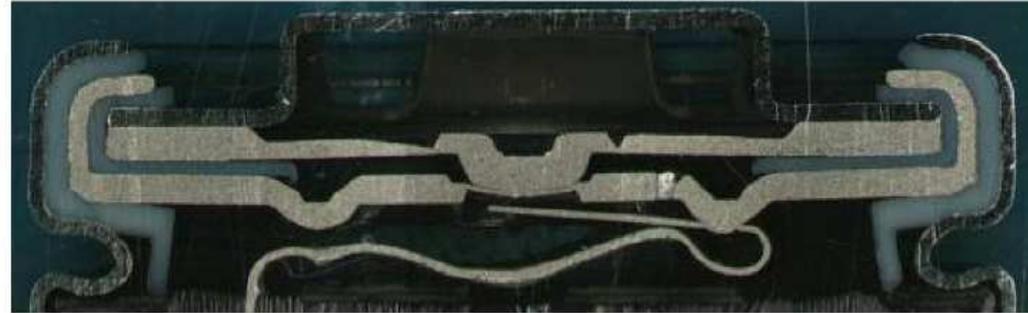
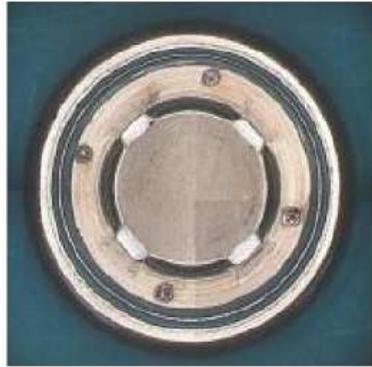
Betriebstemperatur -25°C – +45°C





# LiB Safety Safety Valve Principles

MAXELL  
PB



SANYO



SDI  
13Q



# Anwendungen für Festelektrolyte

## Lithium-Luft Batterie

### Funktionsweise

#### Allgemein

- hohe Kapazität der Anode wird ausgenutzt
- theoretische Kapazität 11,14 Wh/g
- Kathode wirkt nicht begrenzend
- Zellspannung 3,45V

#### Reaktionsgleichung



#### In Untersuchung:

- Leitfähigkeit der Festelektrolyte
- chemische Stabilität der Festelektrolyte
- Nebenreaktionen am Katalysator

