



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik Professur für Fahrzeugmodellierung und -simulation

**DMG Fachsymposium
„Lokomotiven und Grüne Technologien“**

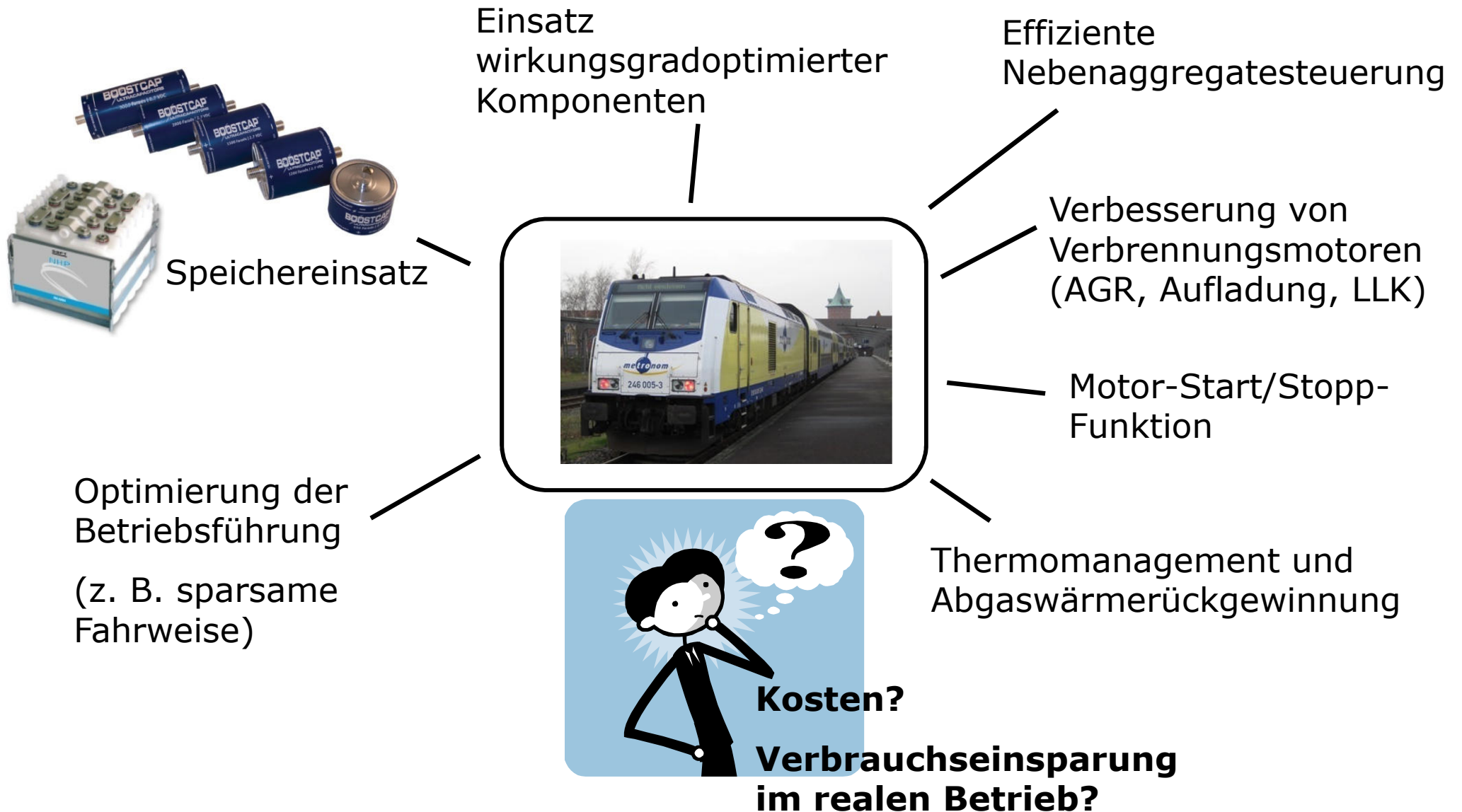
**Speicherpotentiale für
dieselelektrische Lokomotiven**

*Prof. Dr.-Ing. M. Beitelschmidt
Dipl.-Ing. Robert Schimke*

Chemnitz, 23.08.2011



**DRESDEN
concept**
Exzellenz aus
Wissenschaft
und Kultur



Inhalt

1. Motivation und Einführung
2. Speichertypen
3. Grundlagen Modellierung
4. Weitere Aspekte
5. Berechnung
6. Zusammenfassung

Ziele beim Einsatz von Energiespeichern:

- 1. Rekuperation:** Wiedernutzbarmachung von Bremsarbeit in Verzögerungsphasen
- 2. Lastpunktverschiebung:** Dieselmotor kann im optimalen Arbeitspunkt betrieben werden
- 3. Downsizing:** Boostfunktion des Speichers ermöglicht Verkleinerung des Dieselmotors
- 4. Start/Stop:** Abschalten des Verbrennungsmotors in Motorleerlaufphasen
- 5. Emission Free Driving:** Abschnittsweise rein elektrisches Fahren

Langfristig speicherbetriebene Fahrzeuge

- "Letzte Meile" für elektr. Güterloks
- Rangierlok (Ladung über DM)
- Entladung >10 Minuten



Abb.: Rangierlok

Quelle: [Oostr, Alstom, 2009]

Hybridfahrzeuge

- Regionalverkehr
- Ladezyklus > 60 Sekunden
- kaum rein elektrisches Fahren

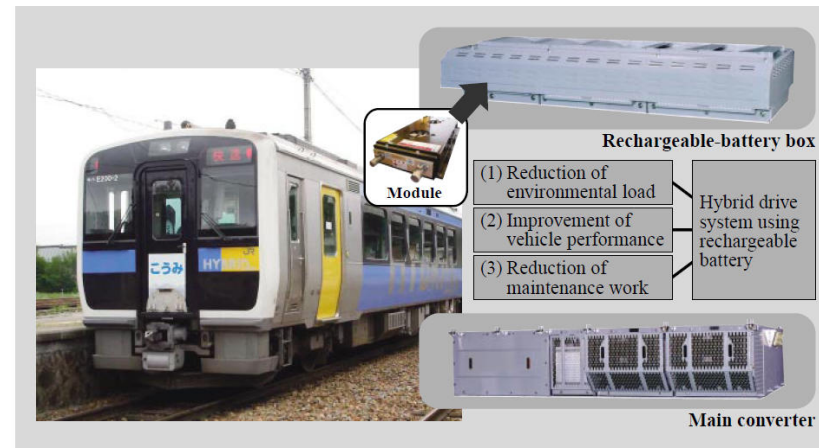


Abb.: DMU mit Li-Ion-Batterien
Quelle: [Tokuyama, Hitachi, 2008]

Fahrzeuge mit Kurzzeitspeicher

- Tram + U-Bahn
- Ladezyklus < 20 Sekunden



Abb.: tram with supercap storage
Source: [Steiner, Bombardier, 2007]

+ innovative Startsysteme

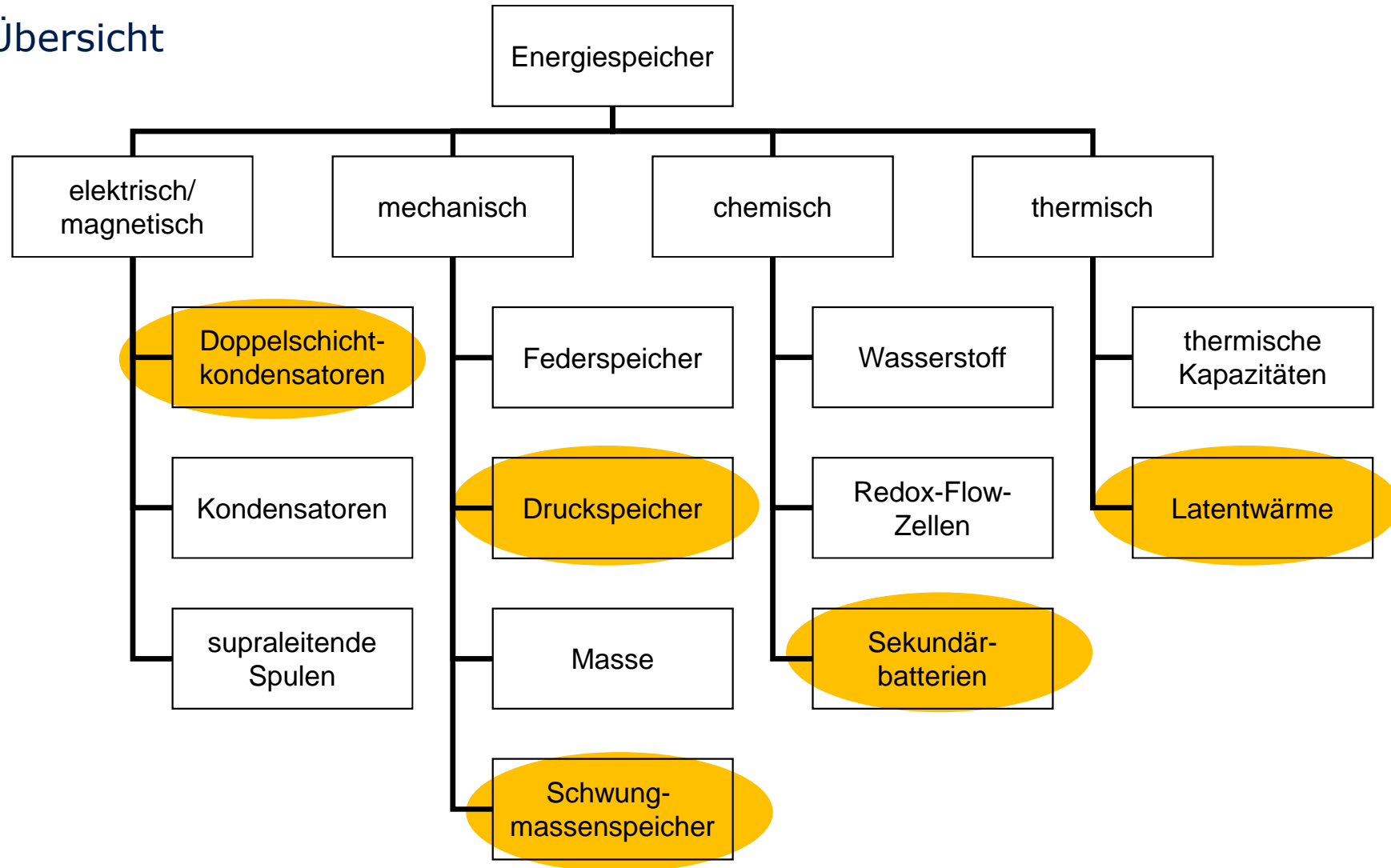


Abb.:
Kondensator für Startapplikation
Quelle: [MTU, 2010]

Inhalt

1. Motivation und Einführung
2. Speichertypen
3. Grundlagen Modellierung
4. Weitere Aspekte
5. Berechnung
6. Zusammenfassung

Übersicht





Doppelschichtkondensatoren

- + hohe Leistungsdichte (ca. Faktor 10)
- + Lebensdauer (bis zu 1 Million Zyklen)
- + geringe Speicherverluste
- Energiedichte schlecht
- hoher Preis bezogen auf die speicherbare Energie



Batterien (Ni-MH bzw. Li-Ionen)

- + Sehr hohe Energiedichte (ca. Faktor 10)
- Geringe Leistungsdichte
- Probleme bei hoher Zyklusrate
- Geringer nutzbarer Arbeitsbereich (max. 15 % für Hybridfahrzeuge)
- Höhere Speicherverluste

Inhalt

1. Motivation und Einführung
2. Speichertypen
3. Grundlagen Modellierung
4. Weitere Aspekte
5. Berechnung
6. Zusammenfassung

Grundmodell

Eigenschaften:

- Abbildung Speicherverluste
- Vernachlässigung Selbstentladung
- Keine hochfrequenten Effekte

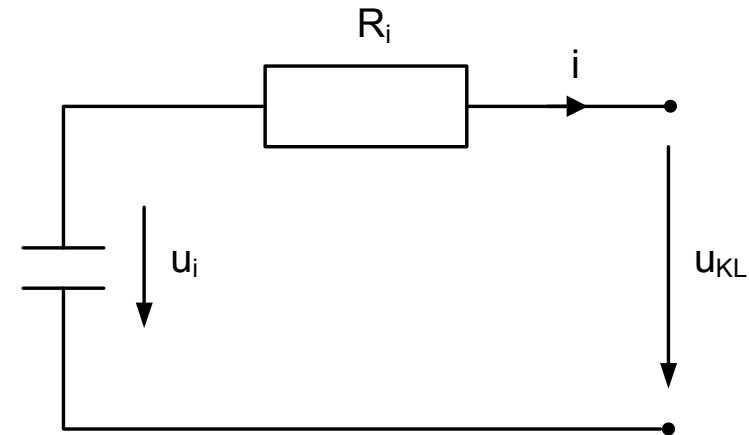


Abb.: Speichermodell Supercap

Parametrierung und Gleichungen:

- SOC-Beschränkung
- Spannungsberechnung
- Ladezustand
- Energetischer Zustand
- Verluste

$$0,25 < SOC_{SC} < 1$$

$$0,55 < SOC_{BAT} < 0.7$$

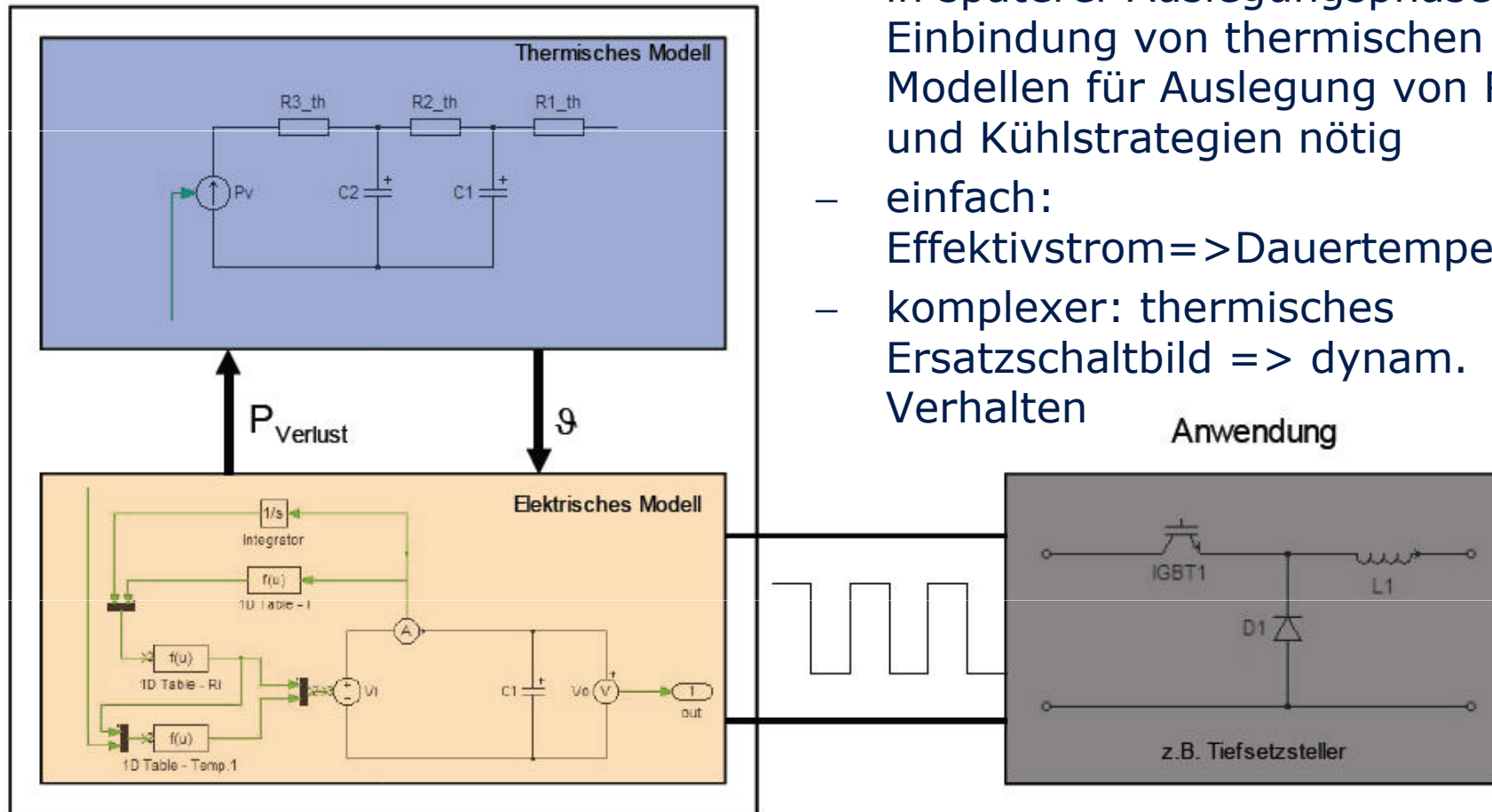
$$u_{i,SC} = u_{i,SC,max} \cdot \sqrt{SOC}$$

$$SOC(t_A) = SOC(t_0) + \int_{t_0}^{t_A} P_i(t) dt$$

$$SOC = \frac{E}{E_{max}}$$

$$\eta_l = \frac{u_{i,max}^2}{u_{i,max}^2 + P_i \cdot R_i}$$

$$\eta_{el} = \frac{u_i^2 + P_i \cdot R_i}{u_i^2}$$

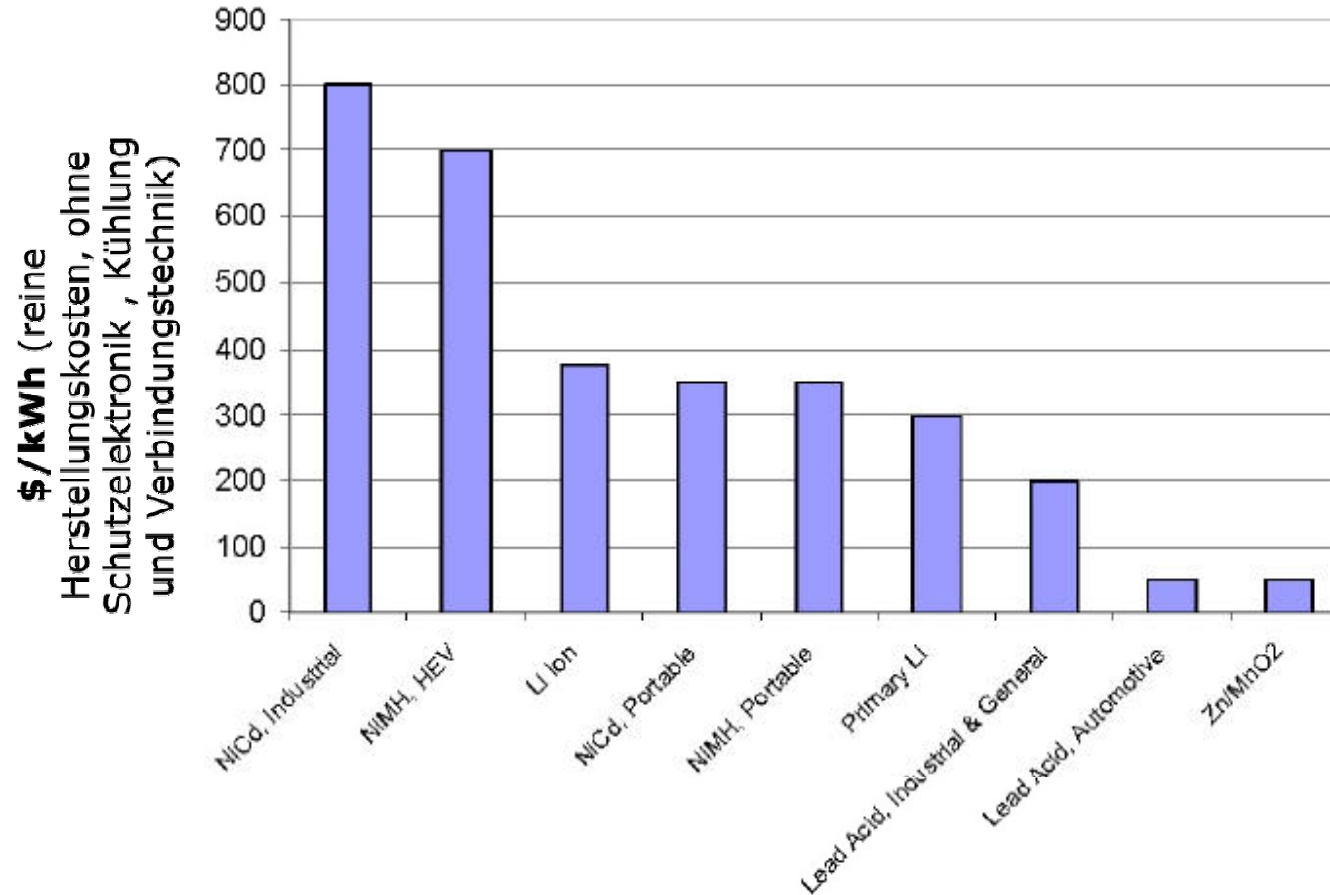


- in späterer Auslegungsphase Einbindung von thermischen Modellen für Auslegung von Regel- und Kühlstrategien nötig
- einfach: Effektivstrom => Dauertemperatur
- komplexer: thermisches Ersatzschaltbild => dynam. Verhalten

Quelle: FH Aschaffenburg
[batteryuniversity,2009]

Inhalt

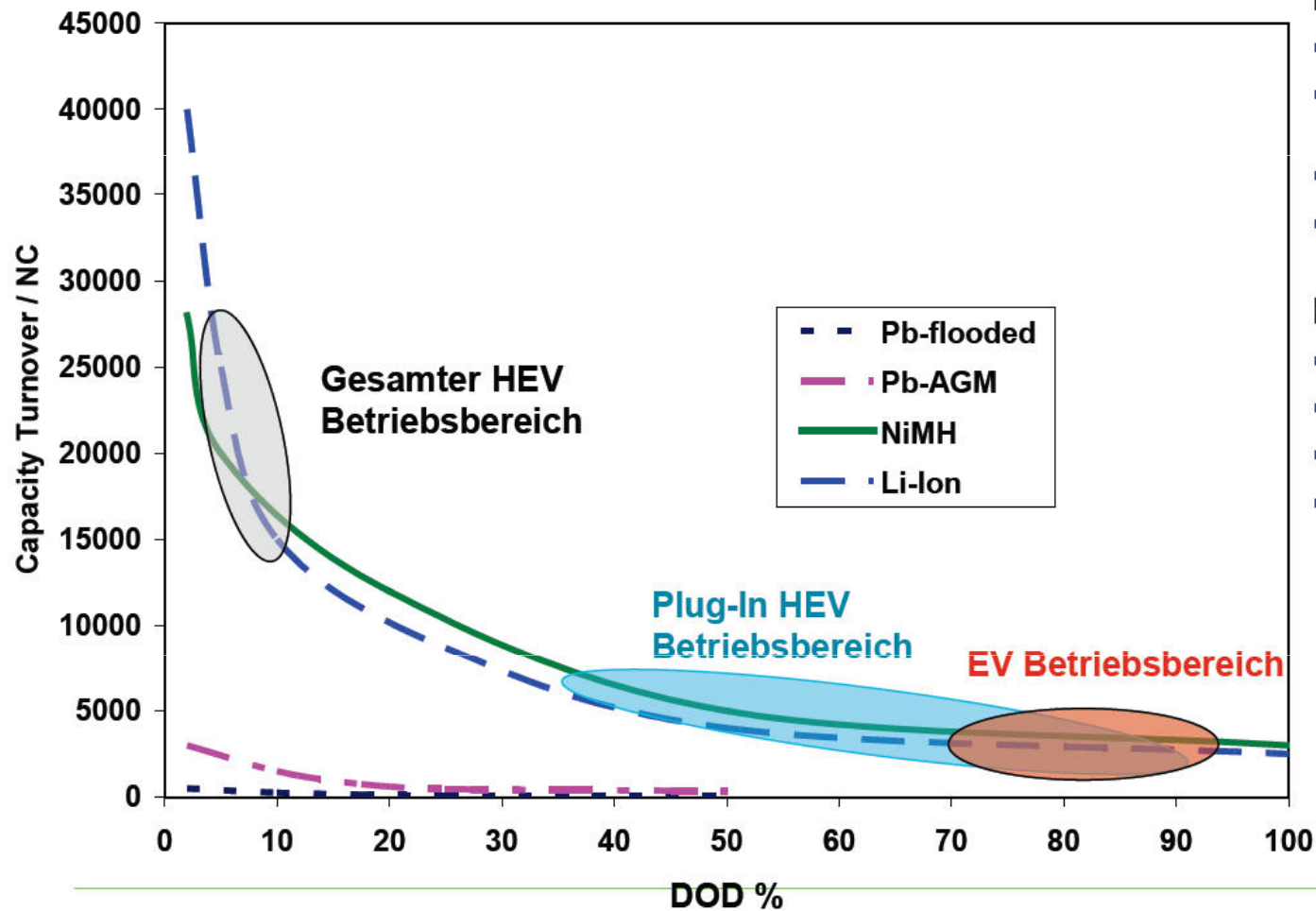
1. Motivation und Einführung
2. Speichertypen
3. Grundlagen Modellierung
4. Weitere Aspekte
5. Berechnung
6. Zusammenfassung



Kosten für typische Zellen:

Sven Bauer [batteryuniversity,2009]

- Werte für 18650 Standardzellen
- Interpretation der Werte schwierig
- die Verfügbarkeit größerer Module ist derzeit noch eingeschränkt



Berechnung Lebenszyklus:

HEV :

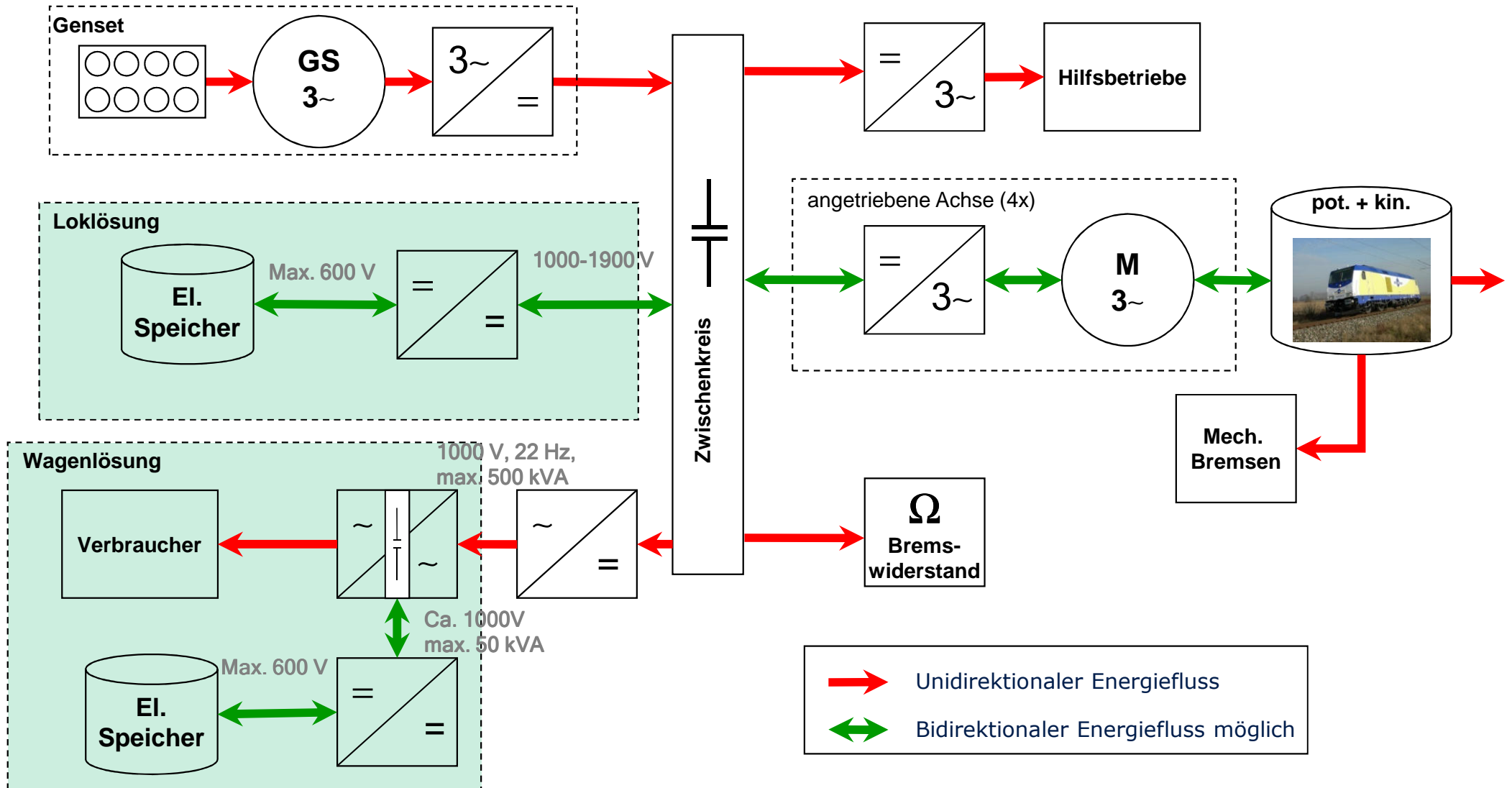
- 5-10% Entladungstiefe
- Entspricht 15k- 20k Kapazitätsumsätze
- = 300k – 400k Zyklen
- Über 10 Jahre Lebensdauer im HEV-Modus

EV :

- 90% DoD
- > 3.000 Kapazitätsumsätze
- ~ 3.500 Zyklen
- Über 5 Jahre im EV-Modus (Annahme von 2 Zyklen pro Tag)

Quelle: [Rosenkranz, 2009]

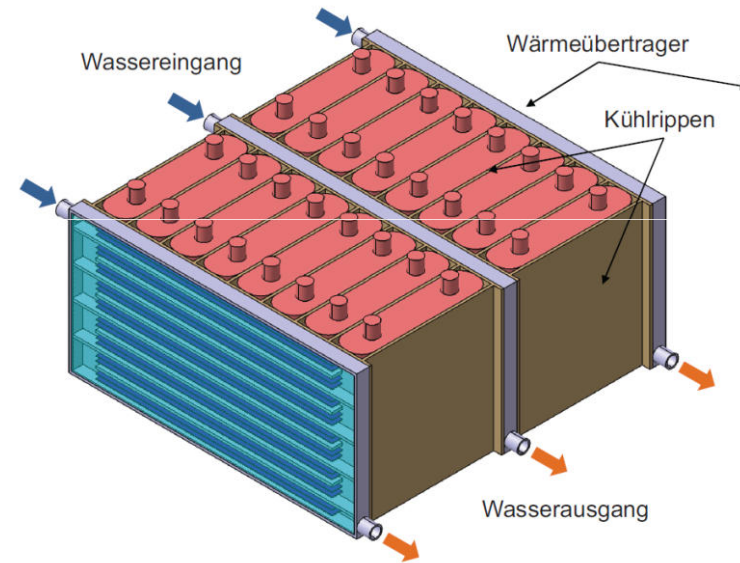
- kalendarische Lebensdauer bei guter Temperierung nicht kritisch.



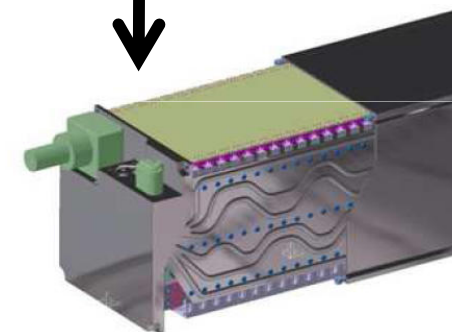
Aufbau eines High-Performance Batteriespeichers



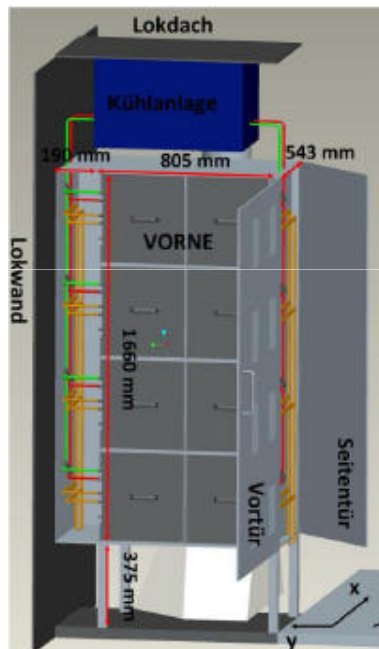
LiTEC-Zellen (links: High Energy, rechts: High Power)



Kühlungskonzept Modul [Zhou, TU Dresden, 2010]

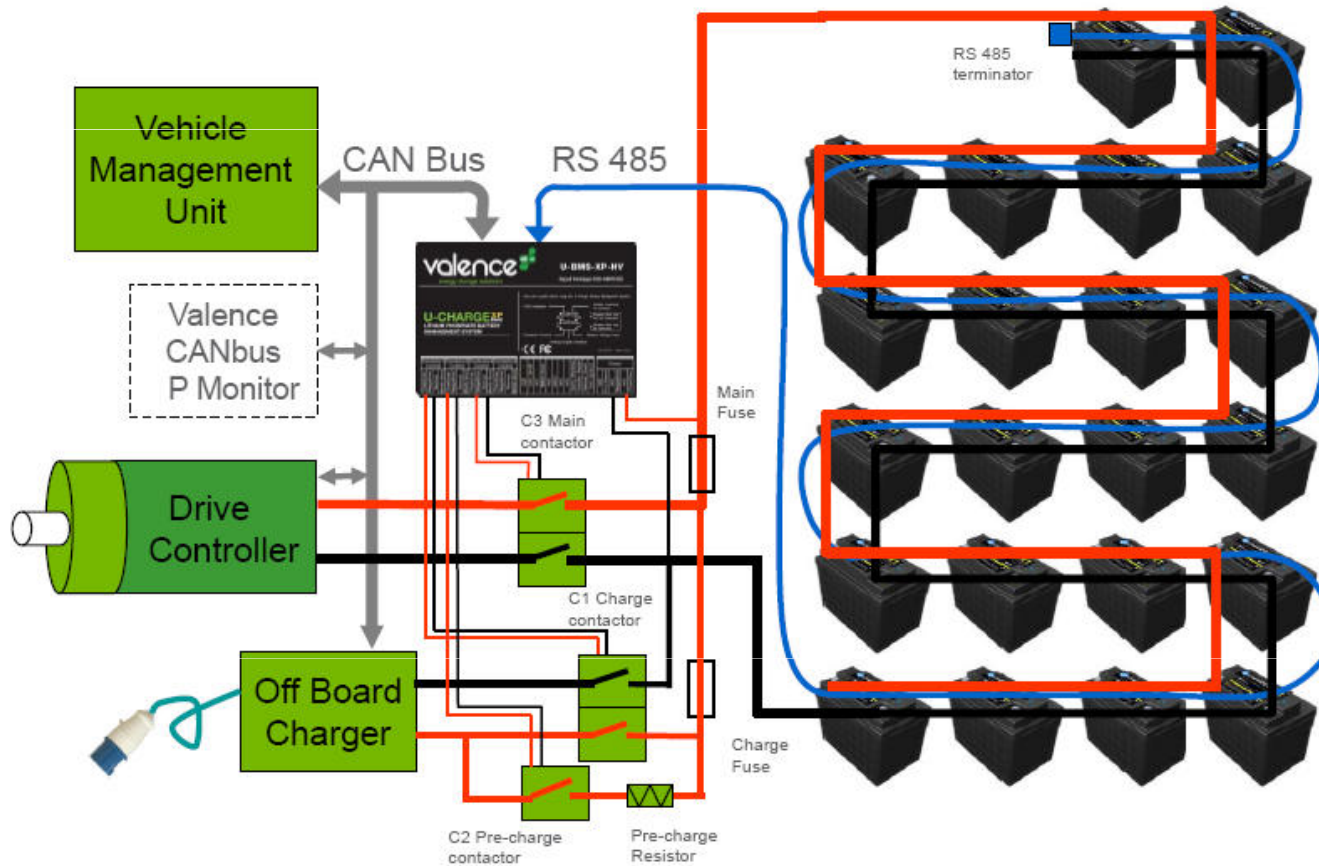


Elektrische Integration und BMS für Modul, Forschungsprojekt Behr [Zschech, 2010]



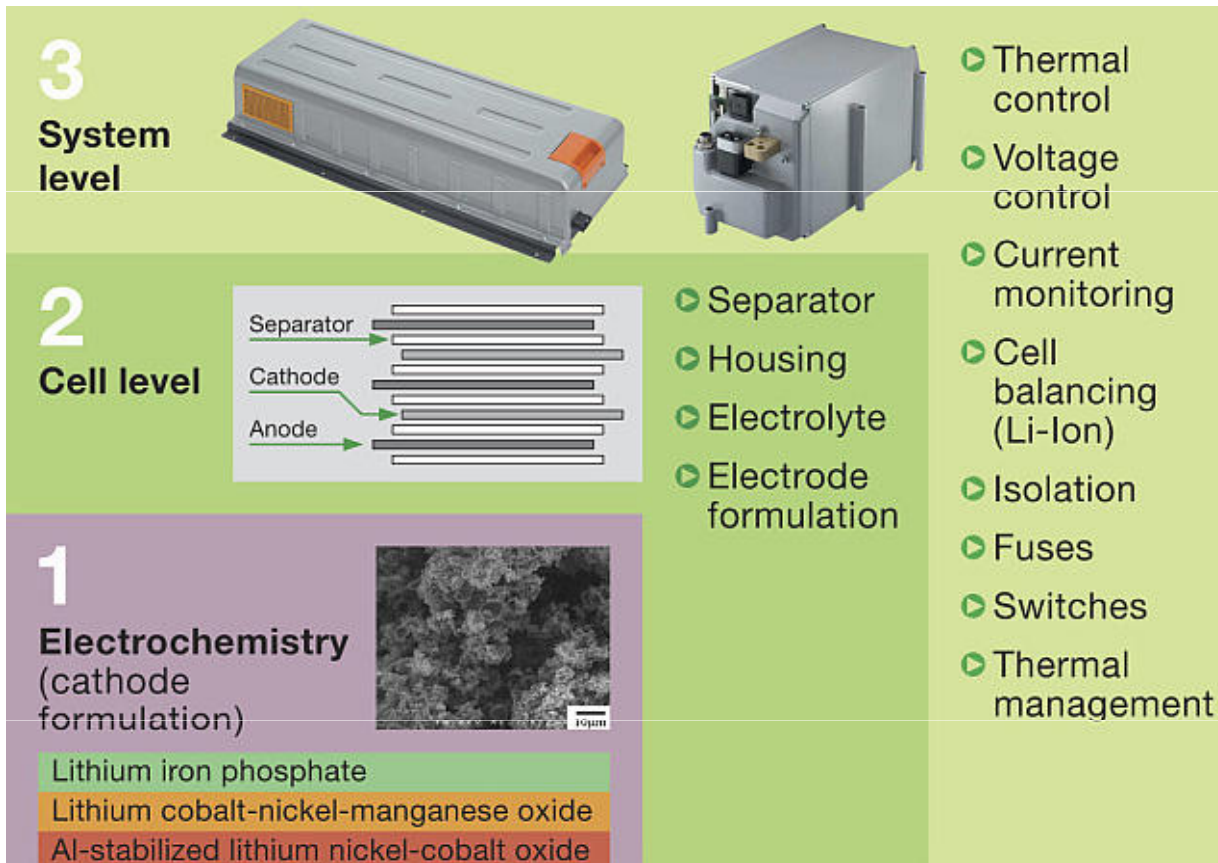
Integration in Fahrzeug [Studie, TU Dresden, 2011]





Quelle : Valence
[batteryuniversity, 2009]

- Kopplung Main Controller ↔ BMS
- Main Controller kommuniziert mit Fahrzeugbus
 - Ladezustand
 - Leistungsbegrenzung
 - Wartungsinformationen
- Batterieüberwachung
- Zellsymmetrierung



- Lithium-Ionen-Batterien sind bereits im Serieneinsatz (Smart-Flotte Berlin, Mercedes S 400, Mitsubishi i-MiEV)
- Zertifizierte Einzelzellen sind auf dem Markt
- Sicherheit muss auf verschiedenen Ebenen gewährleistet werden

Ebenenmodell für die Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien

Quelle: [Birke, 2009]

Inhalt

1. Motivation und Einführung
2. Speichertypen
3. Grundlagen Modellierung
4. Weitere Aspekte
5. Berechnung
6. Zusammenfassung

Eigenschaften:

- bei reiner Rekuperationsstrategie kann die maximale Zugkraft unabhängig vom Speicherladezustand garantiert werden
- Haltestellenfrequenz hoch und Abstand relativ gering (mehr als 0,1/Minute und < 10 Kilometer) => häufige Rekuperationsphasen
- Lokomotiven sind nicht so gewichtskritisch wie PKW
- Anders als beim PKW ist das Einsatzprofil in der Regel bekannt => Kundennutzen klar

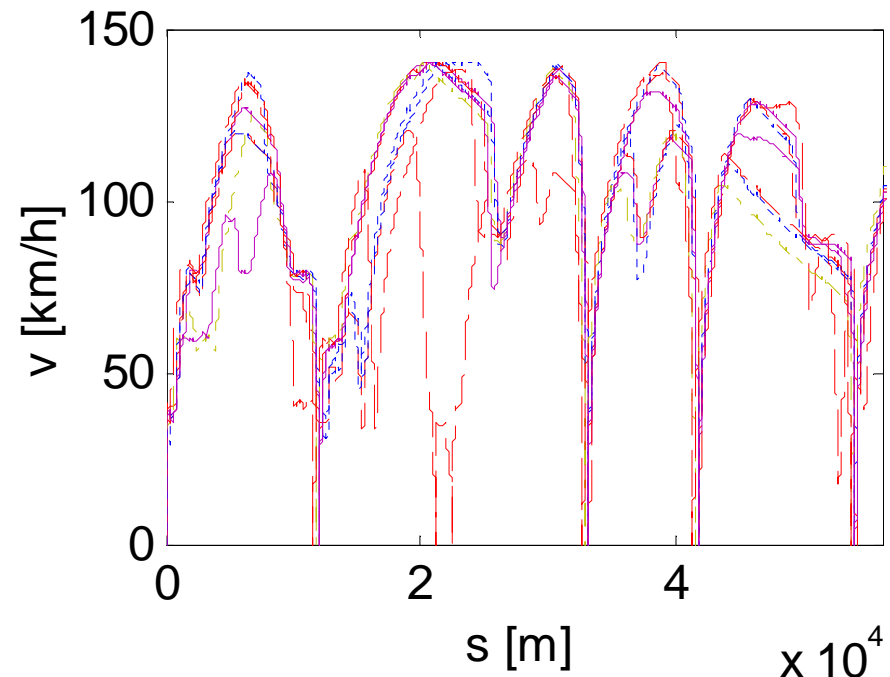
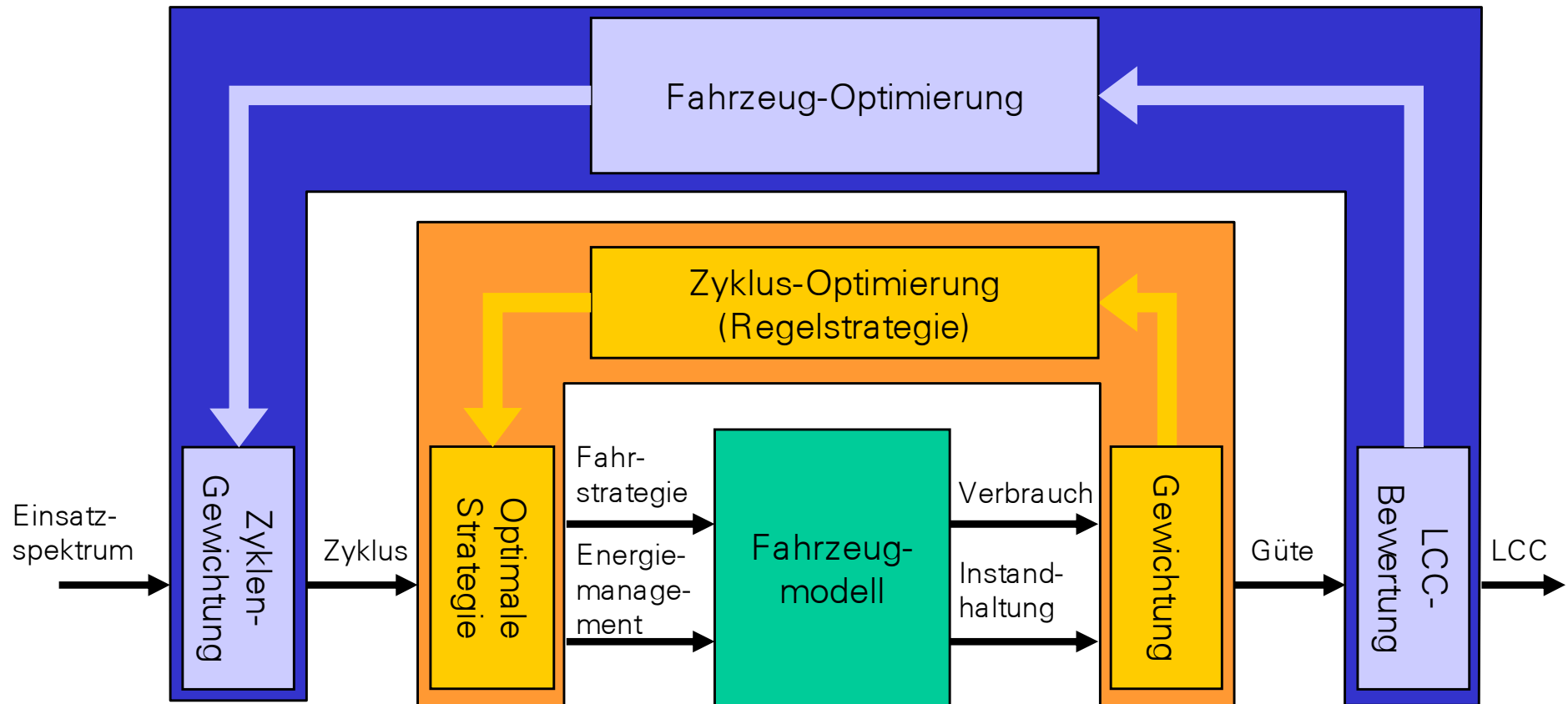
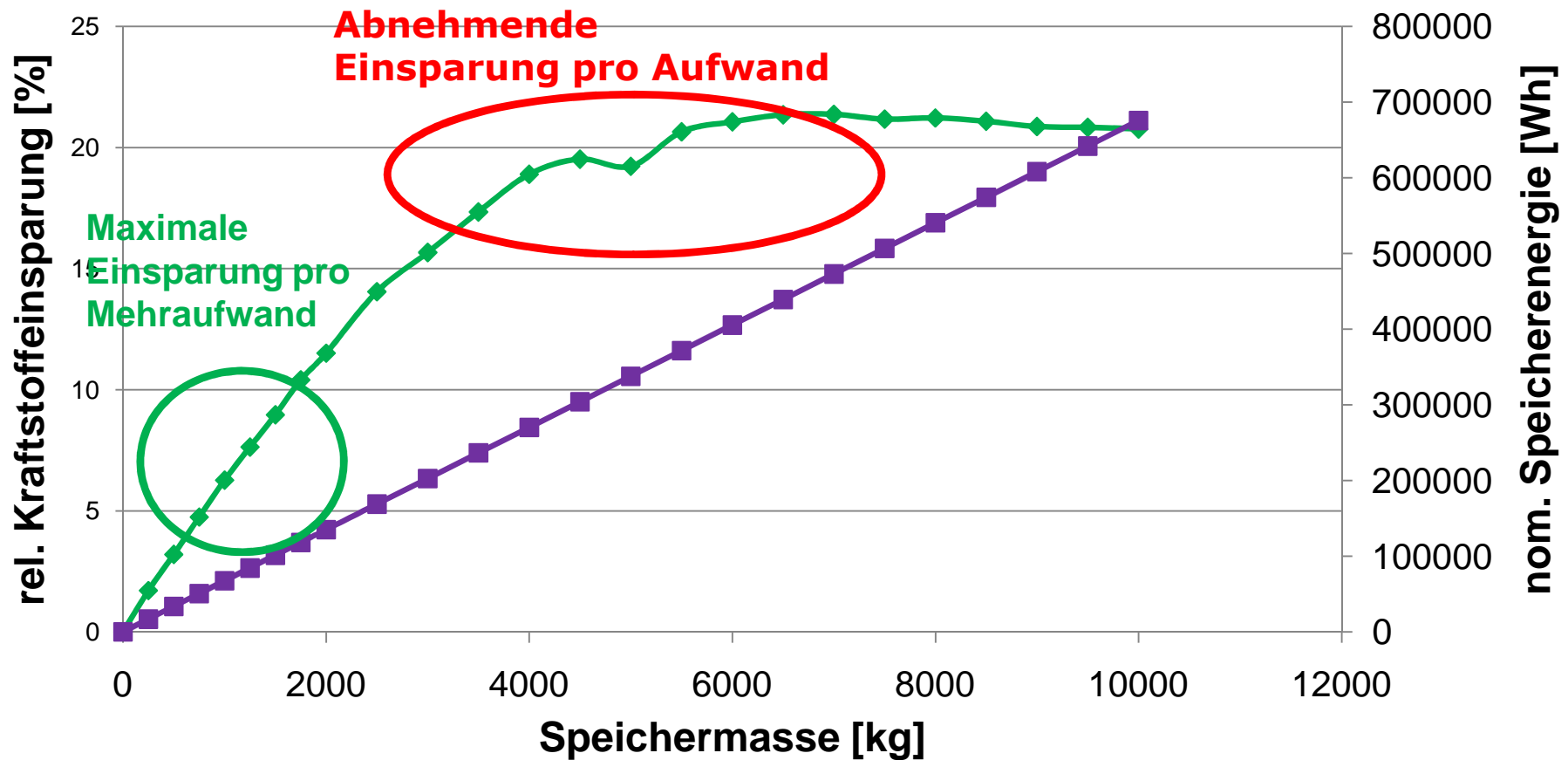


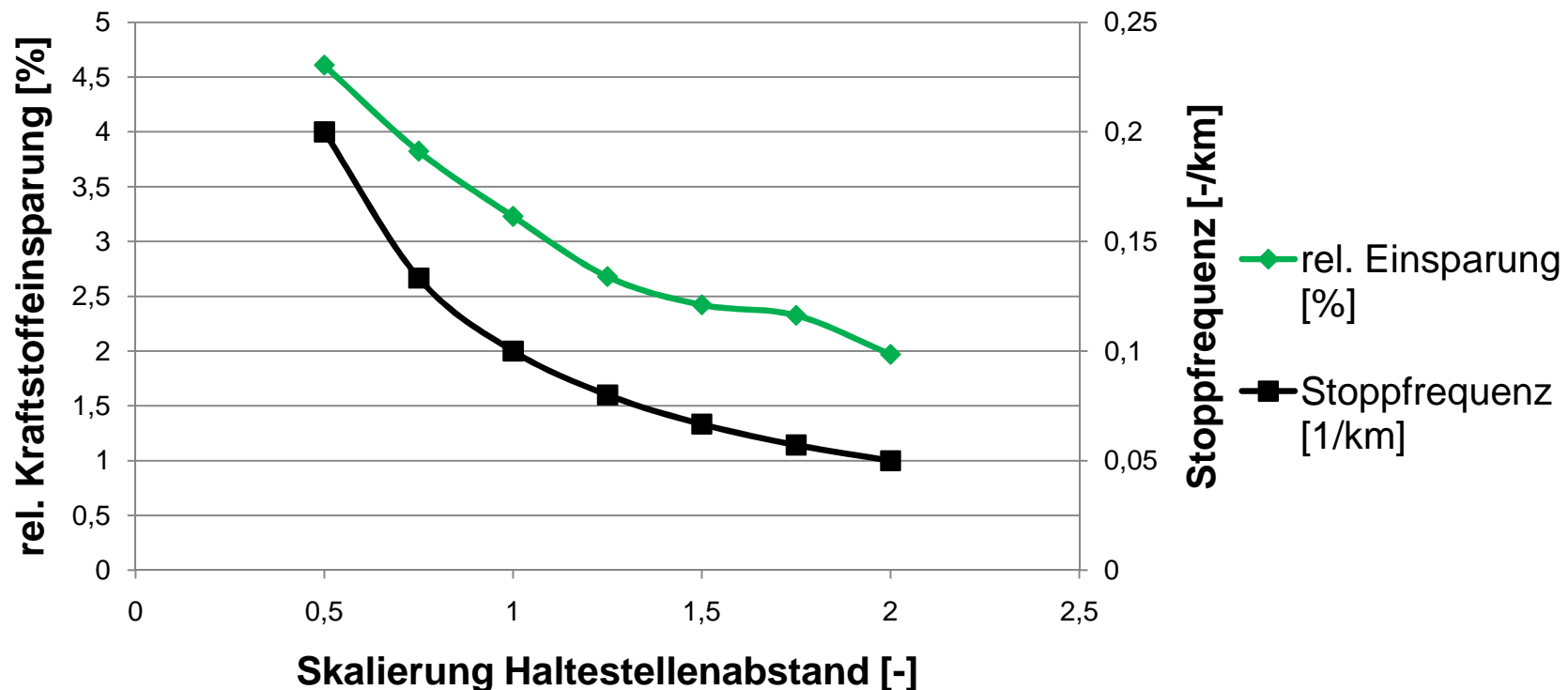
Abb.: gemessene
Geschwindigkeitsprofile



- Referenzstrecke: Hamburg-Cuxhaven (12 Halte, 17 Verzögerungen, Haltestellenabstand ca. 10 km)



- Variation des Haltestellenabstands (Basis: Hamburg-Cuxhaven, 12 Halte, 17 Verzögerungen)
- Zuggewicht: 397,5 to (mit 500 kg Speichereinheit)
- Fahrzeitreserve: 2 %
- ⇒ Das Einsparpotential (bei gleicher Speichergröße) sinkt mit zunehmendem Haltestellenabstand – in der Kostenrechnung trotzdem nicht ausschlaggebend, weil Speicherlebensdauer steigt!



- der Einsatz von elektrischen Energiespeichern ist bei dieselektrischen Fahrzeugen besonders gut möglich
 - Speicherlösungen (mit Supercaps und Batterien) werden derzeit erprobt
 - es gibt nicht eine Speicherlösung für alle Betriebsziele => Auslegung mit Hilfe der Simulation für Fahrzeug und Einsatzzweck
 - bei LCC-Betrachtungen spielt nicht nur Verbrauch eine Rolle
 - der Speicher muss nicht zwingend auf die volle Energierückgewinnung ausgelegt werden
 - kritische Punkte:
 - Integration
 - Kosten
 - Verfügbarkeit
 - Zulassung
- => Simulationsbasierte Auslegung von Speichersystemen wird an der TU Dresden durchgeführt
- => Speicherlösungen müssen erprobt werden

- [Batteryuniversity, 2009] Bauer, S.: Entwicklerforum Akkutechnologien, Tagungsband , 2. Entwicklerforum Akkutechnologien, April 2009.
- [Barrade, 2006] Barrade, P.; Destraz, B.; Rufer, A.: Hybrid vehicle in railways applications: supercapacitive energy storage for diesel-electric locomotives, 2006.
- [Birke, 2009] Birke P.; Keller, M.; Schiemann, M.: Li-Ion Battery Systems for zero emission vehicles, Continental, 2009.
- [Hebner, 2002] Hebner, R.; Beno, J.; Walls, A.: Flywheel Batteries Come Around Again, IEEE Spectrum, 2002.
- [Taketo, 2003] Taketo Fujii, T.; Teraya, N.; Mitsuyuki Osawa M. Development of an NE train, 2003.
- [Tokuyama, 2008] Tokuyama, K.; Shimada, M. & Terasawa, K. Practical Application of a Hybrid Drive System for Reducing Environmental Load, Hitachi, 2008.
- [Klausner, 2008] Klausner, S.; Lehnert, M.: Betriebsspezifische Auslegung von Energiespeichern für Strassenbahnen, Elektrische Bahnen, 2008, 5, 237-246.

- [Klohr, 2009] Klohr, M.: Moderne Antriebstechnik mit Energiespeicher, MITRAC Energy Saver, Vortrag TU Karlsruhe, 2009.
- [Meissner, 2003] Meissner, Eberhard; Richter, Gerolf: Battery Monitoring and Electrical Energy Management - Precondition for future vehicle electric power systems, 2003.
- [Oostr, 2009] Oostr, J.; Dunger, W.: Hybrid-Rangierlokomotive: Technik und Anwendungen, ZEVrail, 2009, 133, 365-360.
- [Rosenkranz, 2009] Rosenkranz, C.: Mobile Speicher elektrischer Antriebsenergie – Lebensdauer und Belastung von Batterien, Dritte Niedersächsische Energietage „Energie und Mobilität“, 2009.
- [Sauer, 2009] Sauer, D. U.: Elektrische Energiespeicher in Hybrid und Elektrofahrzeugen, Seminar für Kraftfahrzeug- und Motorentchnik, 2009.
- [Schuh, 2008] Schuh, H.: Moderne Antriebsbatteriesysteme für Schienenverkehrs-Hybridfahrzeuge, Saft, Rad-Schiene-Tagung, 2008.
- [Steiner, 2007] Steiner, M.; Klohr, M.; Pagiela, S.: Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles, European Conference on Power Electronics and Applications, 2007, 1 -10.
- [Zschech, 2010] Zschech, D.: CERIO ® Technologie für Elektro- und Hybridfahrzeuge, „DRIVE-E Akademie“, Erlangen, 09. März 2010.

Prof. Dr.-Ing. Michael Beitelschmidt

- phone: 0351 463 36571
- email : michael.beitelschmidt@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Robert Schimke

- phone: 0351 463 39061
- email : robert.schimke@tu-dresden.de



»Wissen schafft Brücken.«