

Martin Ufert

Fakultät für Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Automobiltechnik Dresden – IAD
Lehrstuhl Fahrzeugmechatronik

Systemauslegung batterie-elektrischer Stadtbuslinien unter Berücksichtigung des Alterungsverhaltens der Hochvolt-Traktionsenergiespeicher

6. Internationale E-Bus-Konferenz // 21. – 22.11.2018 // Solingen

Alterung von Lithium-Ionen-Batterien

Übersicht

Wie lange hält eine Batterie?

Definition Lebensdauerende einer Batterie:

- Verringerung der nutzbaren Kapazität auf **80 %** des initialen Wertes
- Anstieg des Innenwiderstands auf **200 %** des initialen Wertes

Kalendarische Alterung

Zyklische Alterung

Reduzierung der Kapazität (80%)

verringerte Reichweite

Anstieg des Innenwiderstands (200%)

verringerte Leistungsfähigkeit mit Auswirkungen auf Beschleunigungsvermögen, Höchstgeschwindigkeit und Ladezeit

Funktion der Zeit

Einflussfaktoren:

- Temperatur
- mittlerer SOC

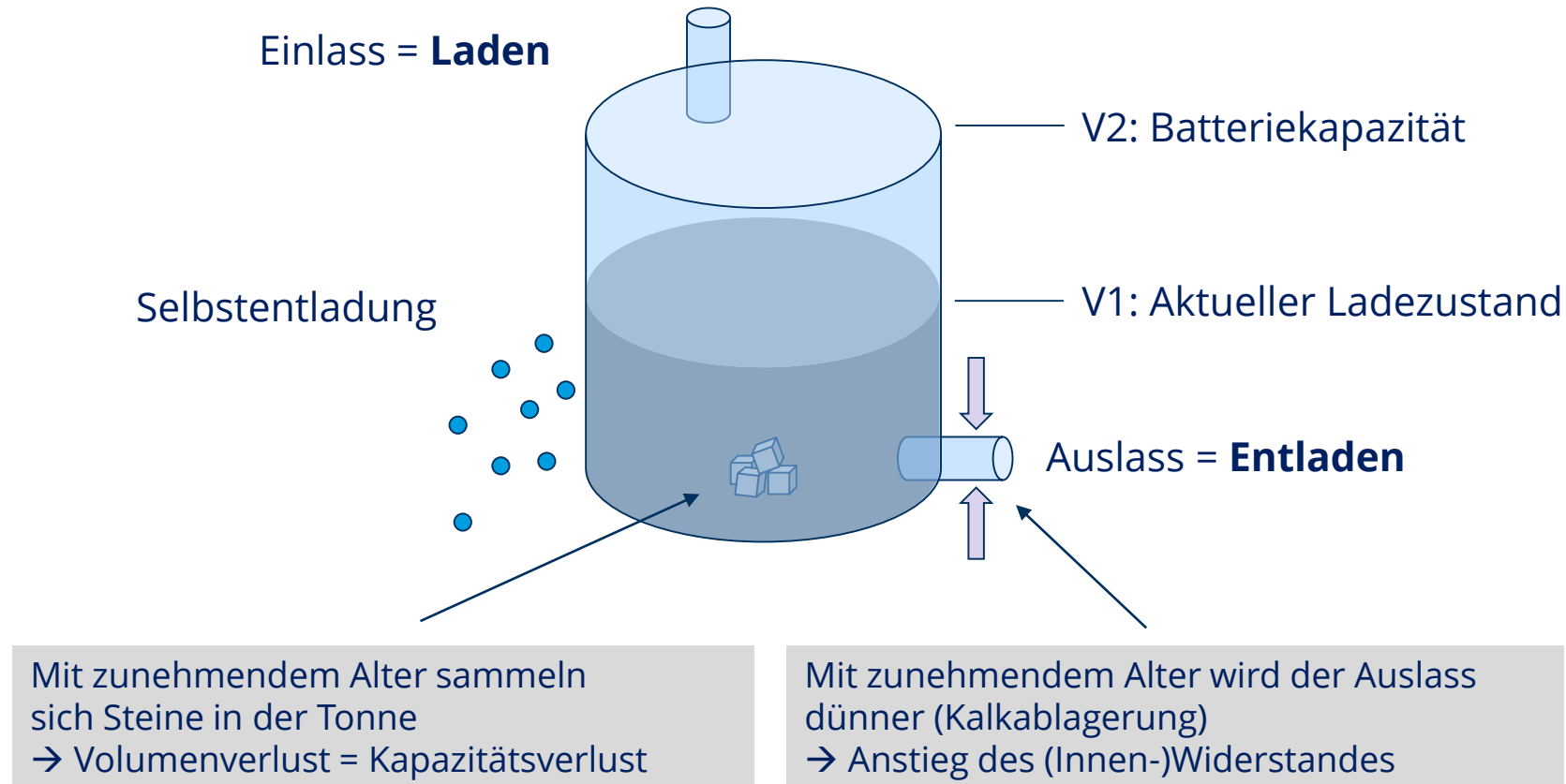
Funktion des Ladungsdurchsatzes

Einflussfaktoren:

- Temperatur
- SOC-Hub
- Laststrom (C-Rate)
- mittlerer SOC

Alterung von Lithium-Ionen-Batterien

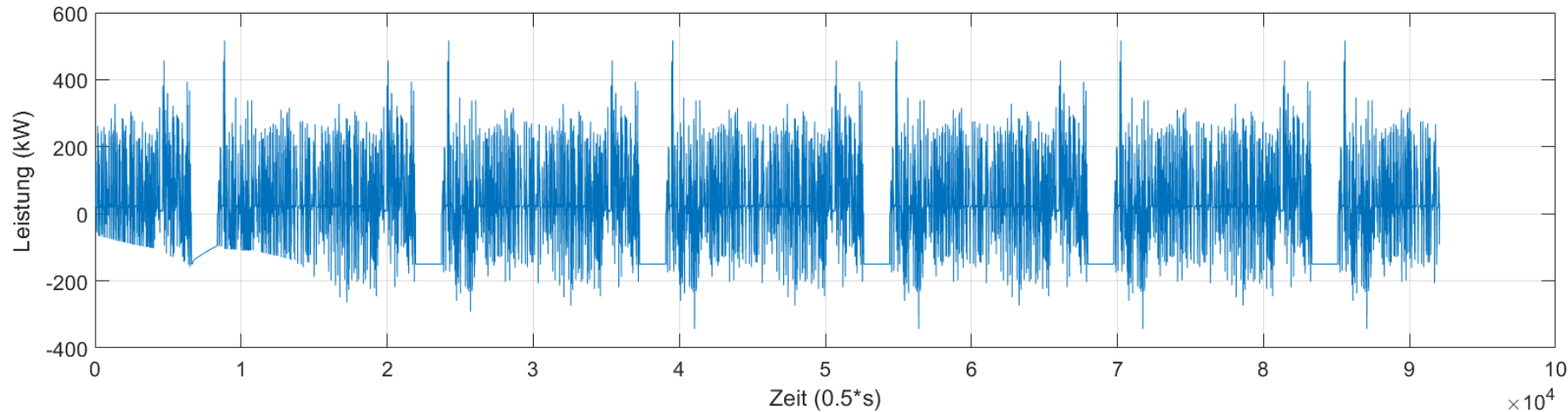
Alterung als „Tonnenmodell“



Quelle: Jossen, Andreas; Weydanz, Wolfgang: *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*
ISBN 978-3939359111

Alterung von Lithium-Ionen-Batterien

Neue vs. gealterte Batterie – Vergleich anhand des SOC-Verlaufs



Tagesfahrstrecke: 228 km

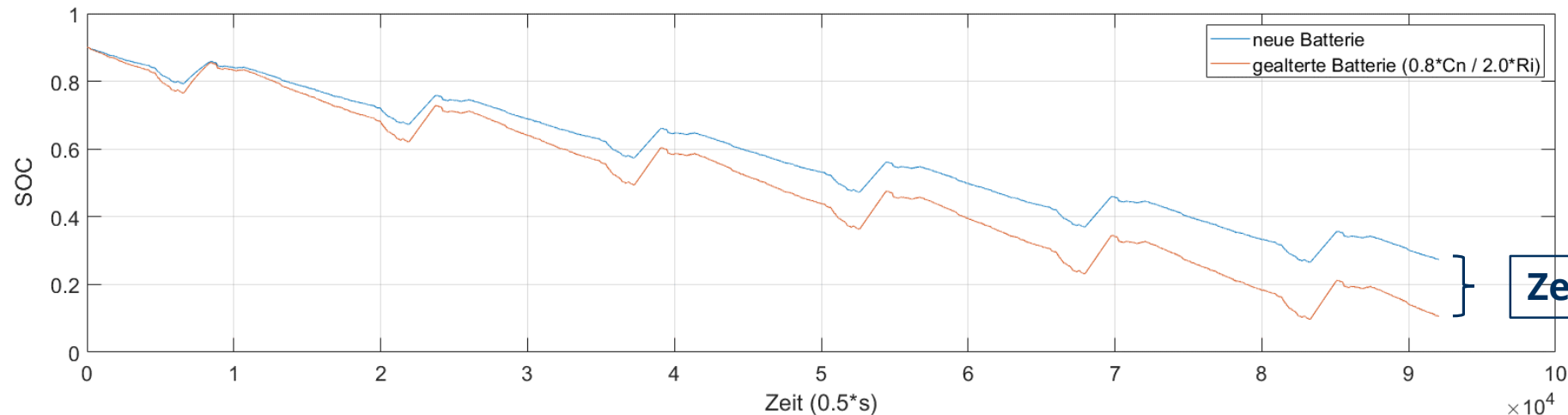
Fahrzeugtyp: Gelenkbus

Umgebungstemp.: 25°C

$E_{\text{batt}} = 412 \text{ kWh}$

$P_{\text{charge}} = 150 \text{ kW}$

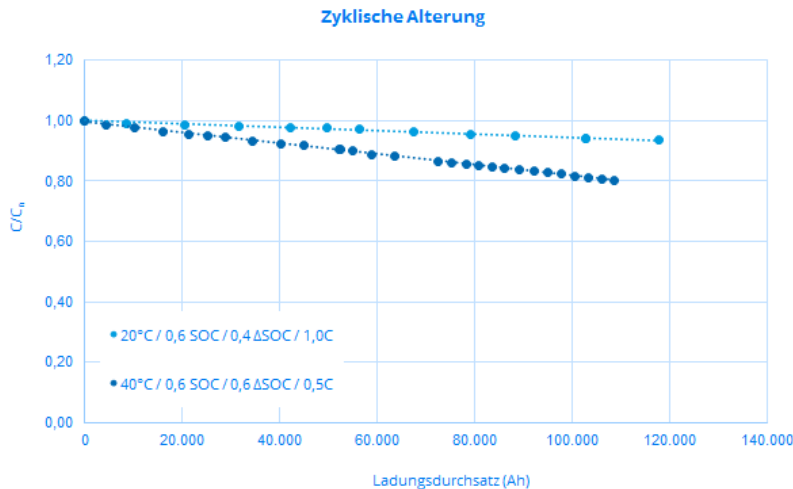
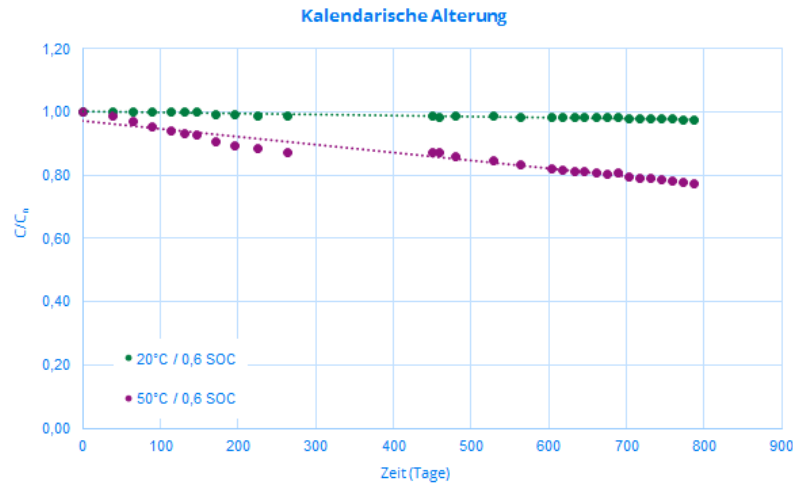
$t_{\text{charge}} = 15 \text{ min}$



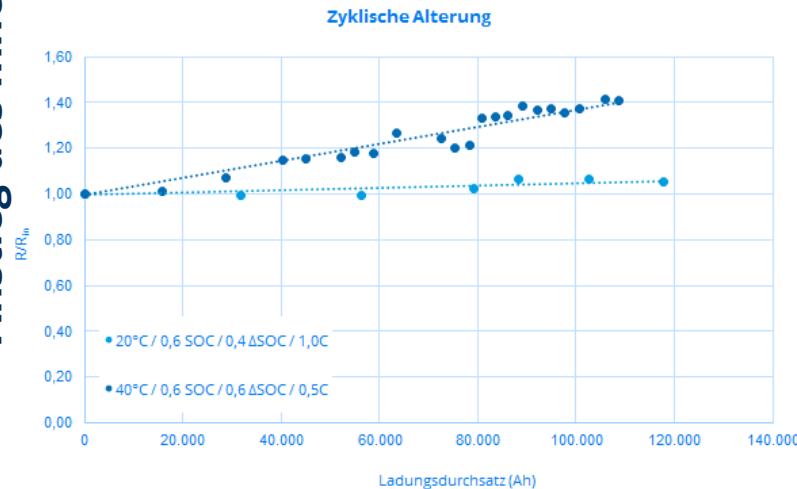
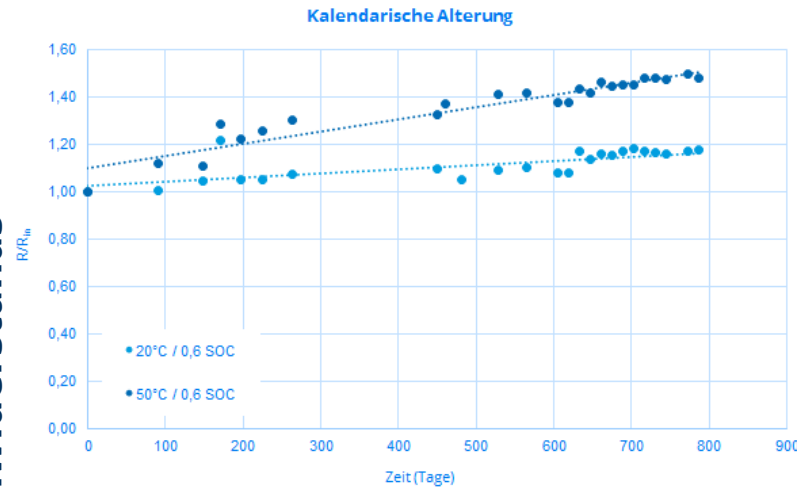
Alterung von Li-Ionen Batterien

Alterungsverhalten – Versuchsergebnisse

Abnahme der Kapazität



Anstieg des Innenwiderstands



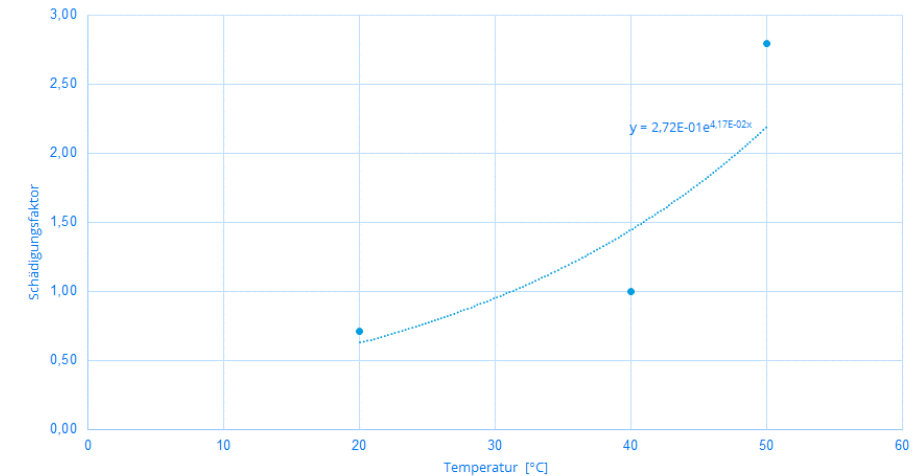
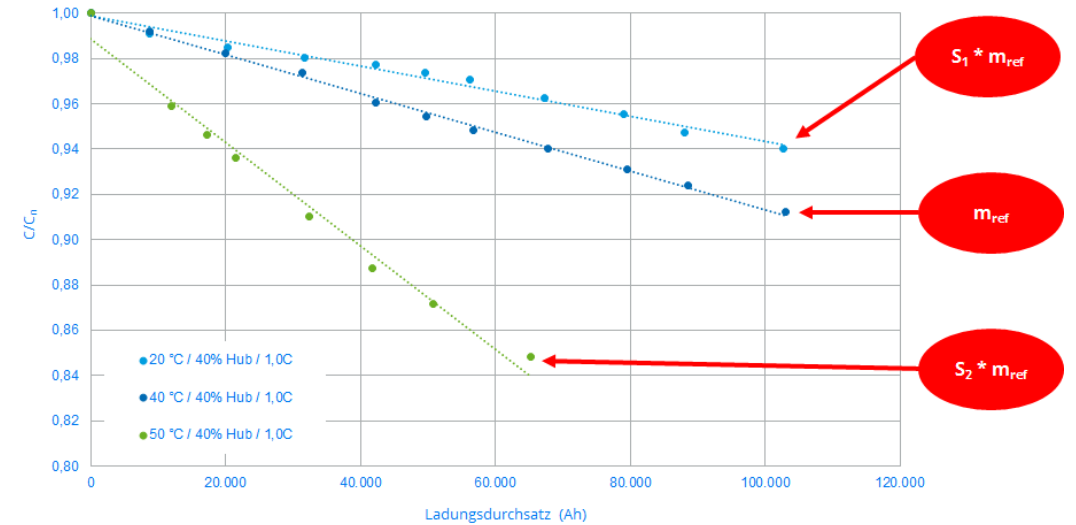
Zusammenfassung

- Messergebnisse aus beschleunigten Alterungstests
- Versuchsdauer: ca. 2 Jahre
- Umfang: 18 Zellen in 3 Klimakammern (inkl. 2 Validierungszellen)
- kalendarisch:
→ lineare Schädigung je Zeit
- zyklisch:
→ lineare Schädigung je Ladungsdurchsatz

Alterung von Li-Ionen Batterien

Ansatz eines allgemeingültigen Alterungsmodells

- Empirischer Modellansatz auf Basis beschleunigter Alterungsmessungen im Labor
- Separierung von Einflussfaktoren
 - Temperatur / SOC / Δ SOC / C-Rate
 - Variation eines Parameters bei sonst konstanten Bedingungen
→ Annahme: Unabhängigkeit der Parameter
- Ermittlung einer Schädigungsfunktion für jeden Einflussparameter
 - $S_{\text{temp}} = f(T)$ // $S_{\text{SOC}} = f(\text{SOC})$ // $S_{\Delta\text{SOC}} = f(\Delta\text{SOC})$ // $S_{\text{C-Rate}} = f(\text{C-Rate})$
 - Separate Schädigungsfunktionen für C und R_i
- **Resultierende Modellgleichungen (zyklisch)**
 - $C_1 = m_{\text{ref},C} \cdot S_{\text{Temp},C} \cdot S_{\Delta\text{SOC},C} \cdot S_{\text{SOC},C} \cdot S_{\text{C-Rate},C} \cdot Q + C_0$
 - $R_{i1} = m_{\text{ref},Ri} \cdot S_{\text{Temp},Ri} \cdot S_{\Delta\text{SOC},Ri} \cdot S_{\text{SOC},Ri} \cdot S_{\text{C-Rate},Ri} \cdot Q + R_{i0}$



Batteriemodellierung

Einbindung des Alterungsmodells

Elektrisches Modell

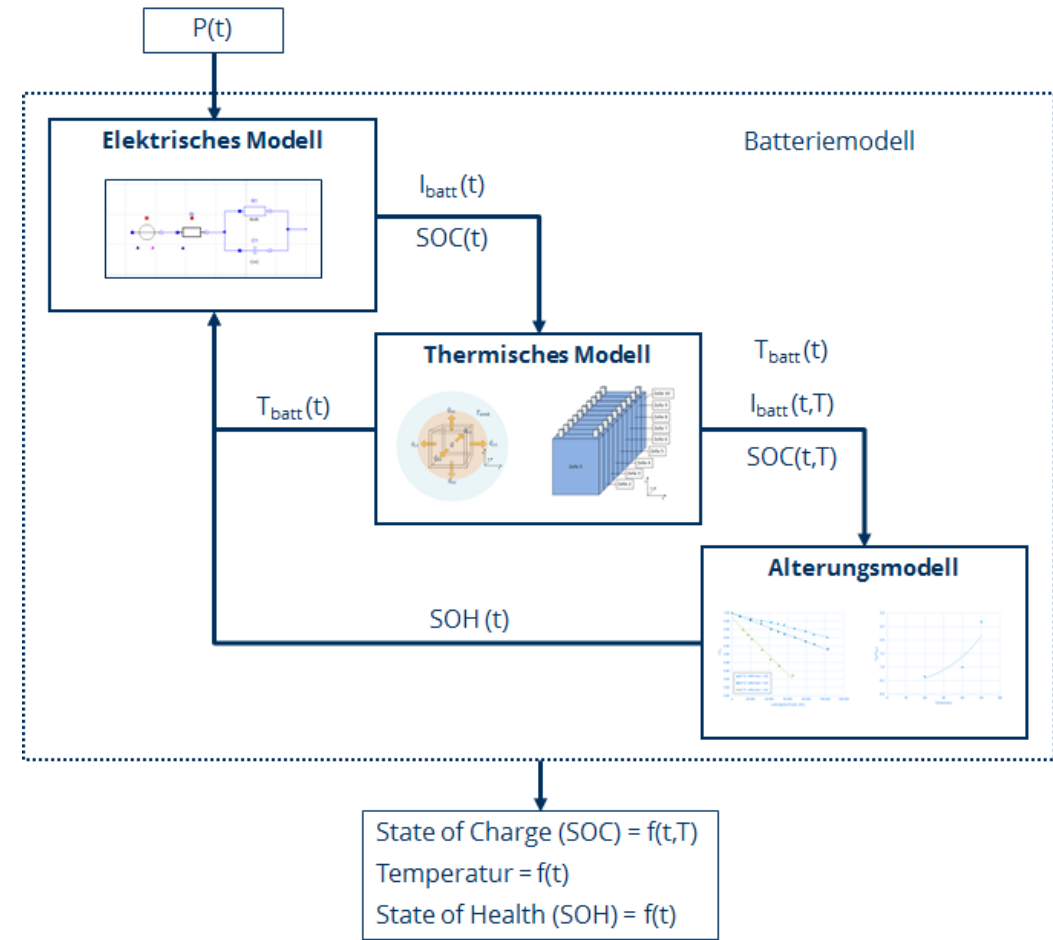
- Ruhespannungsquelle + Innenwiderstand + RC-Glied (Temperatur- und SOC-Abhängigkeit)
- Batteriemanagementfunktionen mit nichtlinearen Betriebsgrenzen

Thermisches Modell

- orts aufgelöstes Modell (Zellen // Modul)
- verschiedene Zellbauweisen
Pouchzellen // prismatische Zellen // Rundzellen
- Verschiedene Kühlungsarten
Konvektion // Lüfter // Wasser

Alterungsmodell

- Basierend auf institutseigenen Messdaten
- Abbildung verschiedener Zellchemien
LiFePO4 // NMC
- **anwendbar auf reale Fahrzyklen**

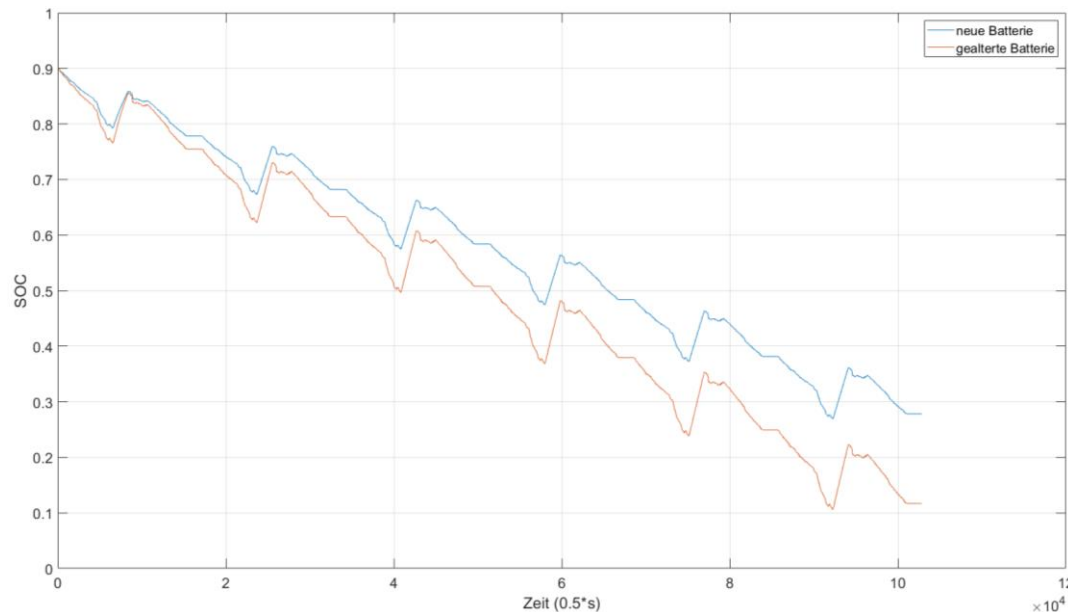


Auslegung von Elektrobuslinien mittels Systemsimulation

Vergleich unterschiedlicher Ladestrategien

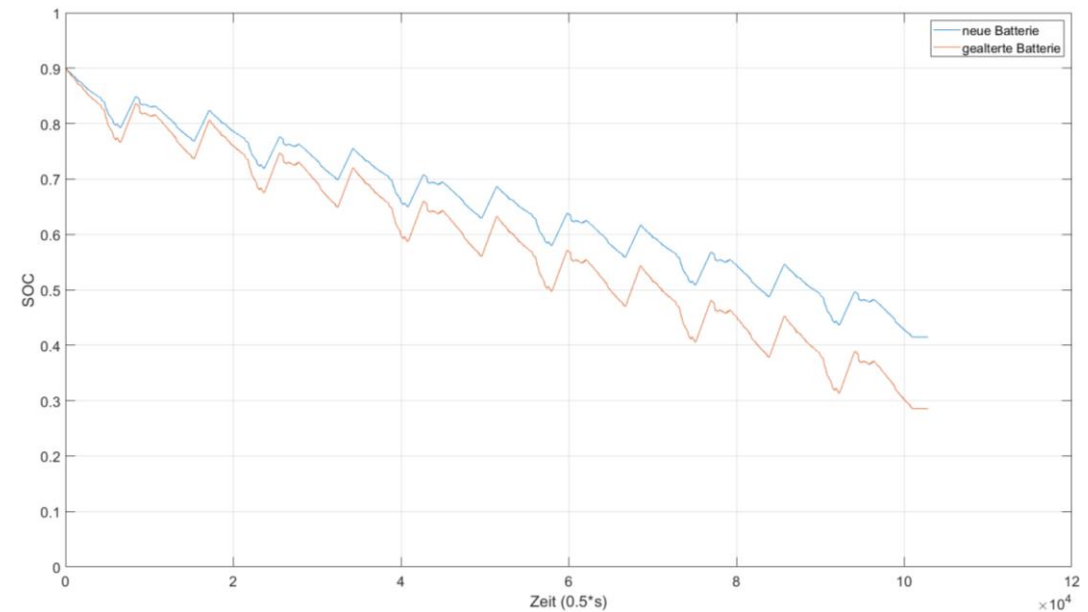
Ladestrategie 1

1 Ladepunkt // 15 min // 150 kW // 412 kWh
Lebensdauer der Batterie → **1245 Betriebstage**



Ladestrategie 2

2 Ladepunkte // je 15 min // je 100 kW // 412 kWh
Lebensdauer der Batterie → **1842 Betriebstage**



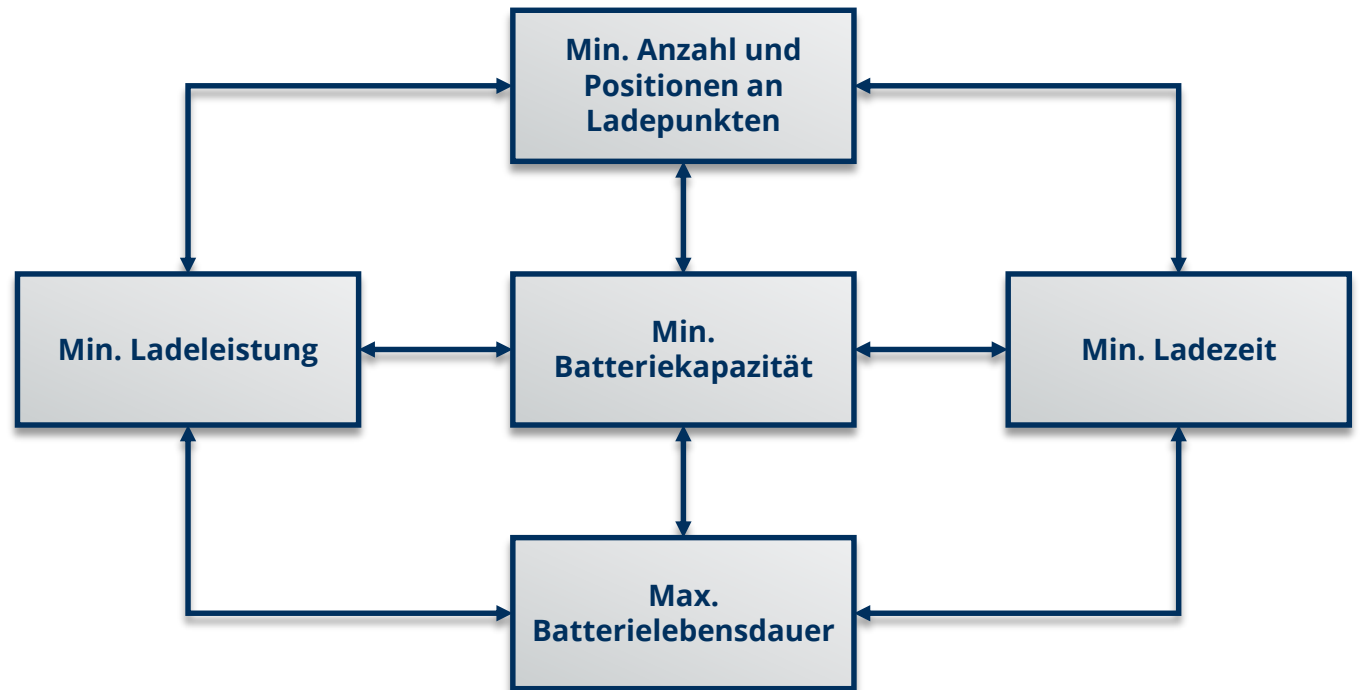
Welche Variante ist die Vorzugsvariante?

Systemauslegung einer Elektrobuslinie

Anforderungen aus Betreibersicht

Wunschliste der Betreiber

- kleine und leichte Batterie
 - wenige Ladepunkte im Netz, nach Möglichkeit nur Depot-Charging
 - niedrige Ladeleistungen
 - kurze Ladezeiten
 - maximale Batterielebensdauer
- Zielkonflikt im Auslegungsprozess
- Berechnung pareto-optimaler Lösungen
- Automatisierte Berechnung mittels Systemsimulation

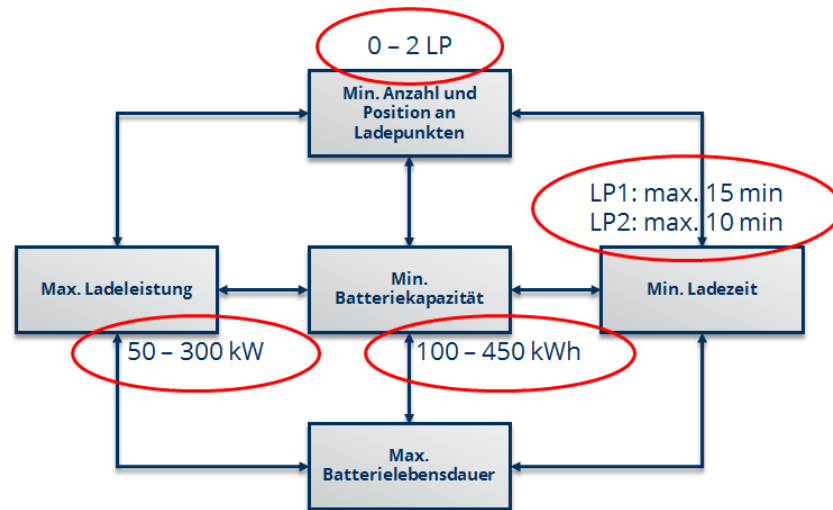


Auslegung einer Elektrobuslinie mittels Systemsimulation

automatisierte Variantenberechnung mit Optimierungsfunktion – Beispiel

Definition der Variationsparameter Systemgrenzen und Randbedingungen

- ΔSOC : 0.9 – 0.1 // Tagesfahrstrecke: 228 km
- Fahrzeugtyp: Gelenkbus // Umgebungstemp.: 25°C
- 20 min Takt // 12 Jahre Fahrzeuglebensdauer



Simulation und Bewertung

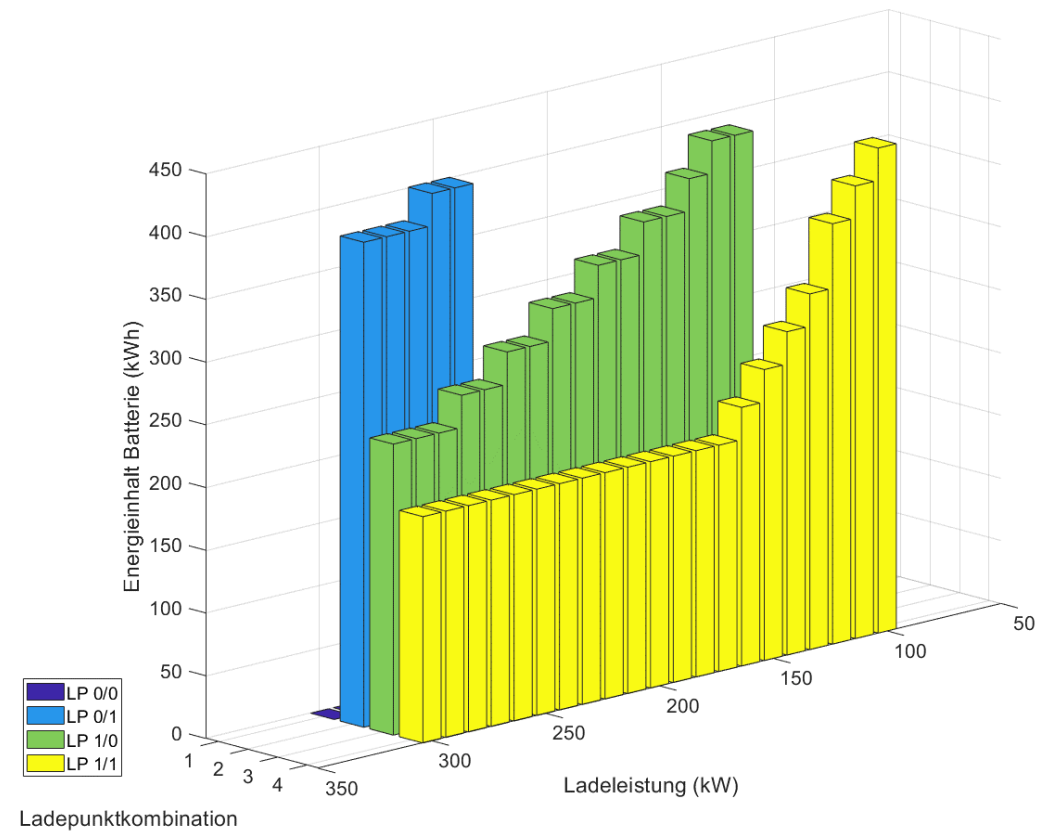
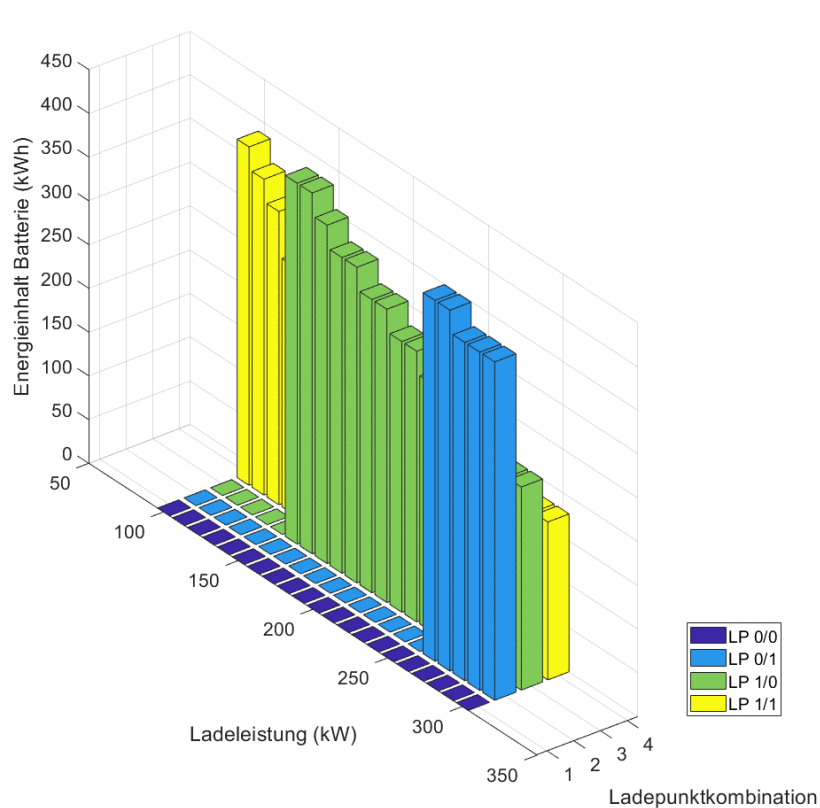
- Automatisierte Berechnung aller Varianten
- Bewertung aller technisch umsetzbaren Varianten mittels Kostenfunktion

Fahrzeuge	Batterie	Ladeinfrastruktur	Energie
Anzahl der Fahrzeuge 200 TEUR/Fzg	Invest 500 EUR/kWh	Festanteil 50 TEUR/LP	verbrauchsabhängig 0,20 EUR/kWh
	Re-Invest 500 EUR/kWh	leistungsabhängiger Anteil 600 EUR/kW/LP	

Auslegung einer Elektrobuslinie mittels Systemsimulation

Beispielrechnung – Ergebnis

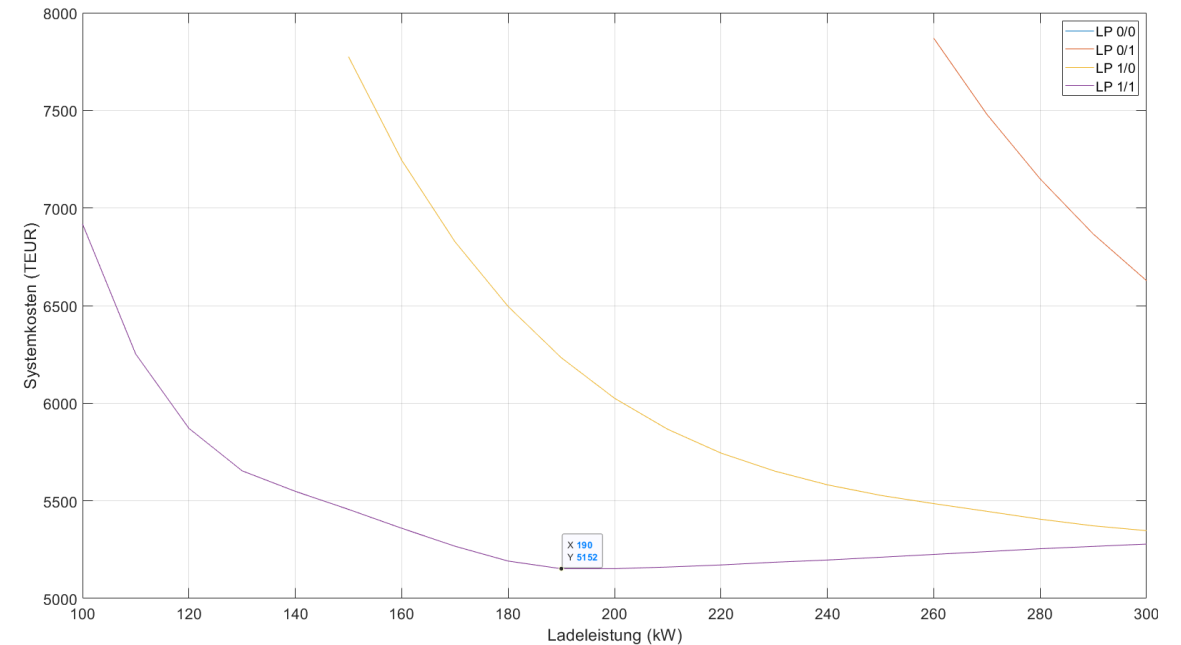
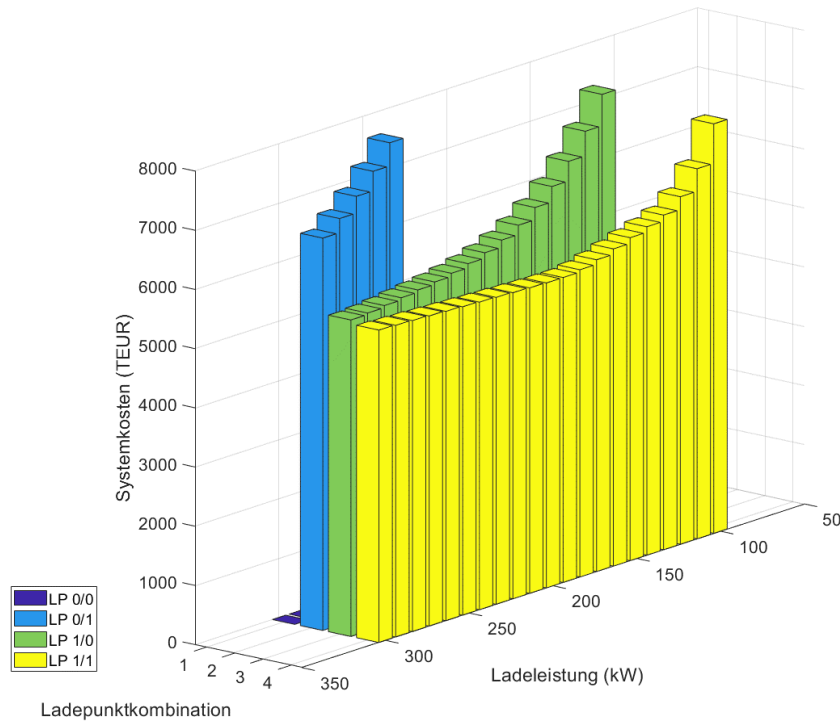
Technisch umsetzbare Konfigurationen



Auslegung einer Elektrobushlinie mittels Systemsimulation

Beispielrechnung – Ergebnis

Kostenfunktion der technisch umsetzbaren Konfigurationen

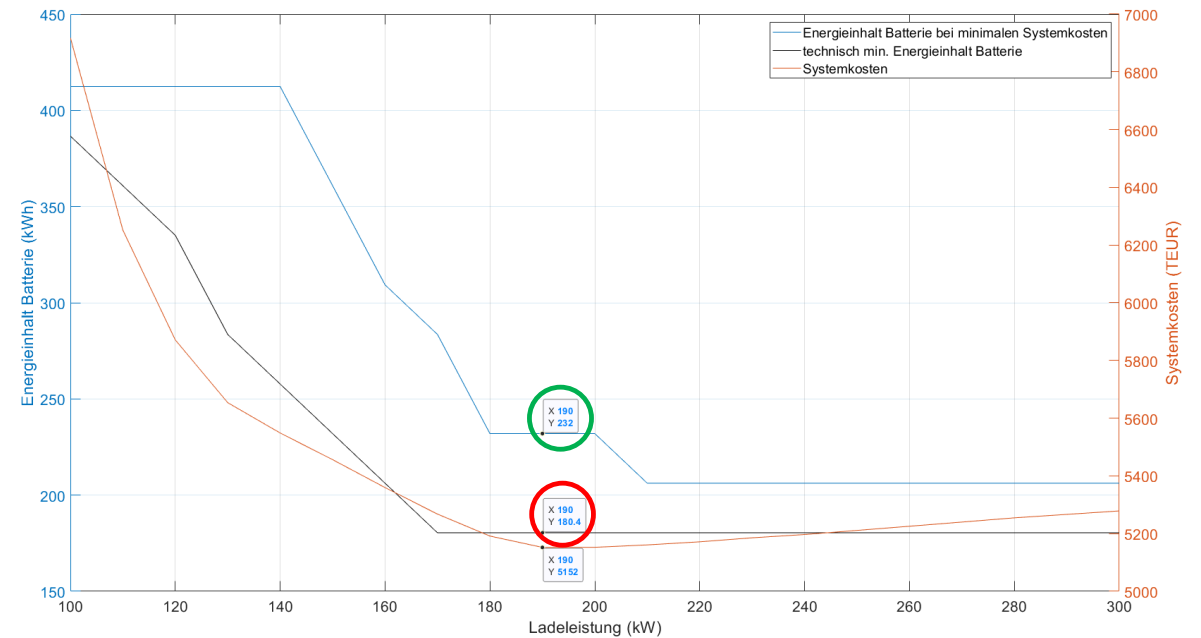
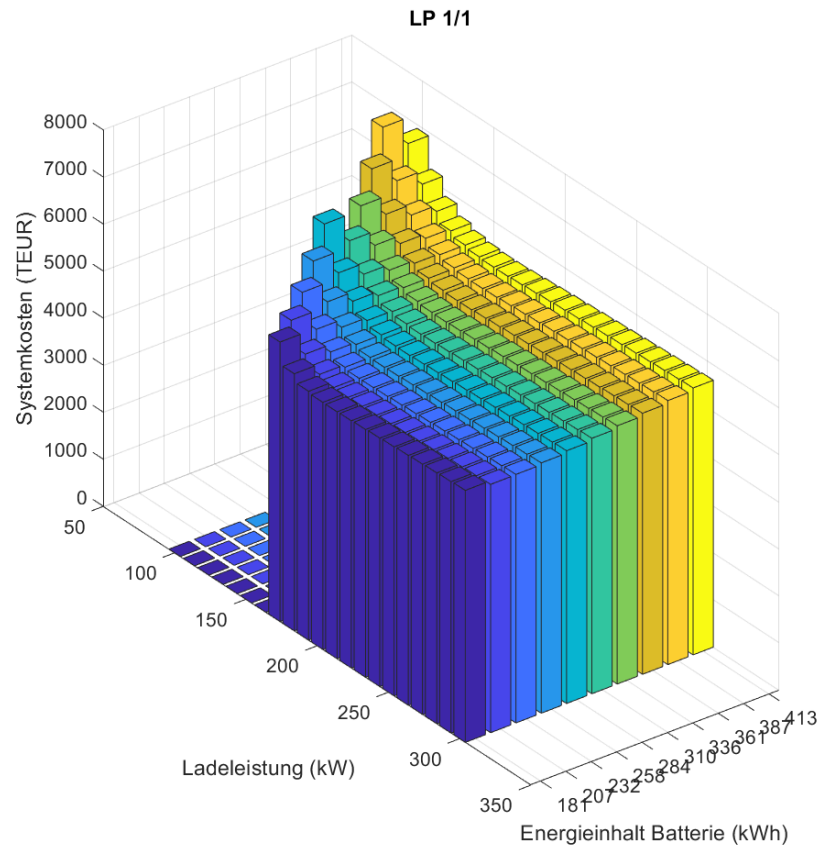


Kostenoptimale Konfiguration: **2 Ladepunkte // je 190 kW // Energieinhalt Batterie ???**

Auslegung einer Elektrobuslinie mittels Systemsimulation

Beispielrechnung – Ergebnis

Kostenfunktion der technisch umsetzbaren Konfigurationen



kostenoptimale Batteriegröße $\neq$ technisch minimale Batteriegröße

Auslegung einer Elektrobuslinie mittels Systemsimulation

Beispielrechnung – Ergebnis

Kostenoptimalen Konfiguration

Rahmenbedingungen

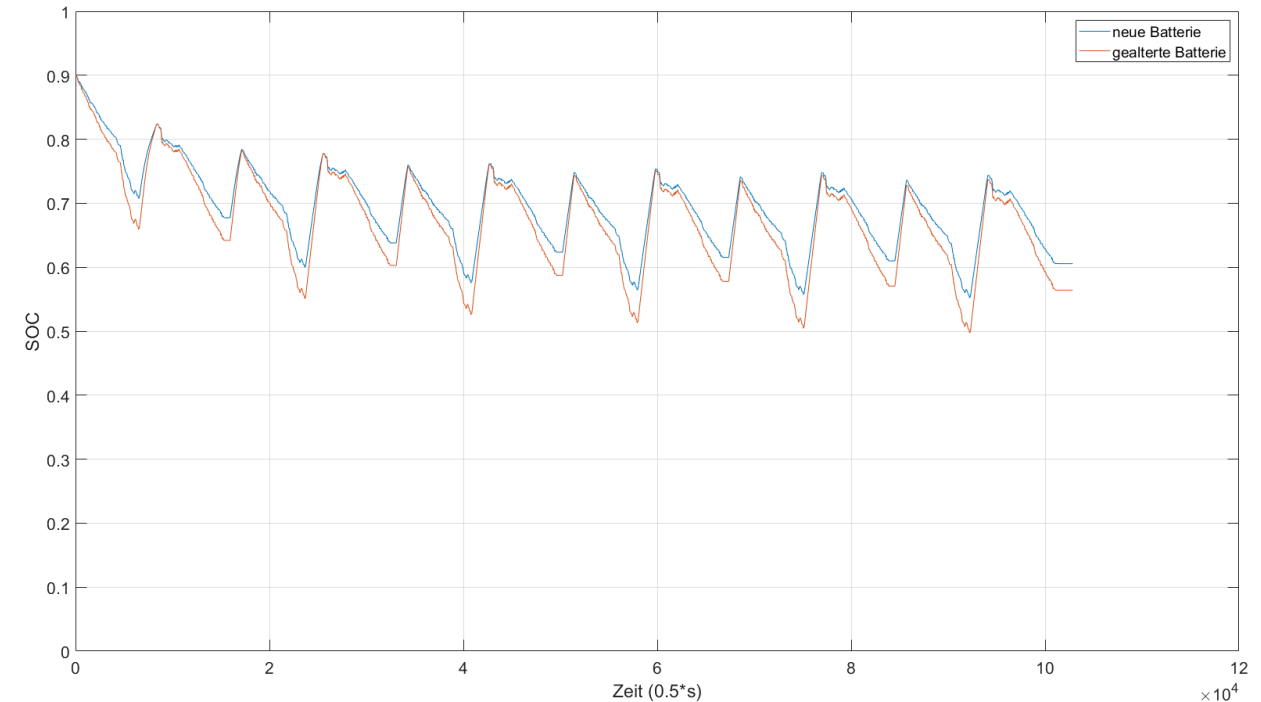
- Tagesfahrstrecke: 228 km
- Fahrzeugtyp: 18m
- Umgebungstemp.: 25°C
- 20 min Takt
- 12 Jahre Fahrzeuglebensdauer

Ergebnis der Optimierung

- $E_{\text{batt}} = 232 \text{ kWh}$
- $P_{\text{charge}} = 190 \text{ kW}$
- Kombination LP = 1/1 (beide Ladepunkte)
- Lebensdauer Batterie: 3.5 Jahre*

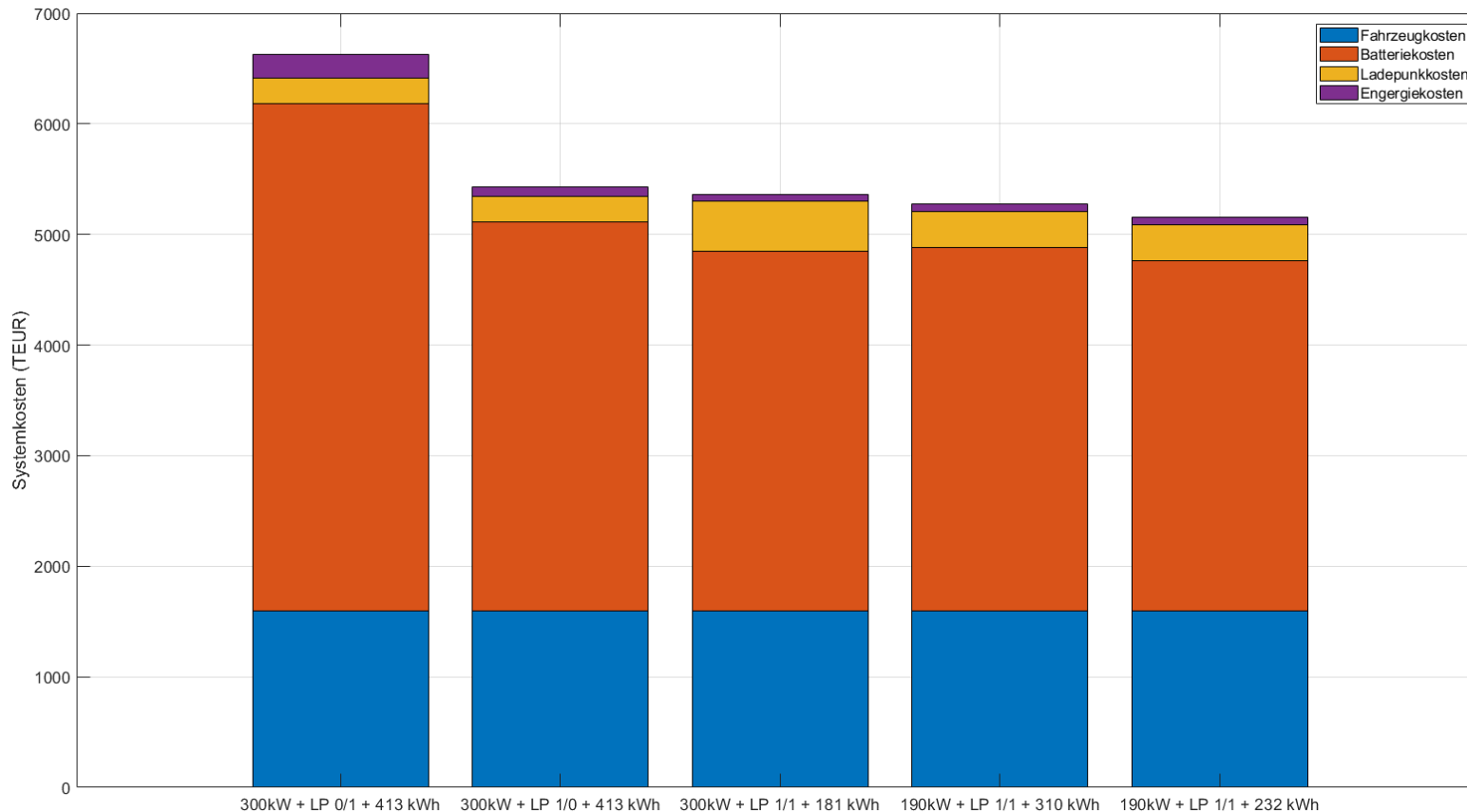
* 365 Betriebstage pro Jahr

Resultierender SOC-Verlauf



Auslegung einer Elektrobuslinie mittels Systemsimulation

Beispielrechnung – Variantenvergleich und Fazit



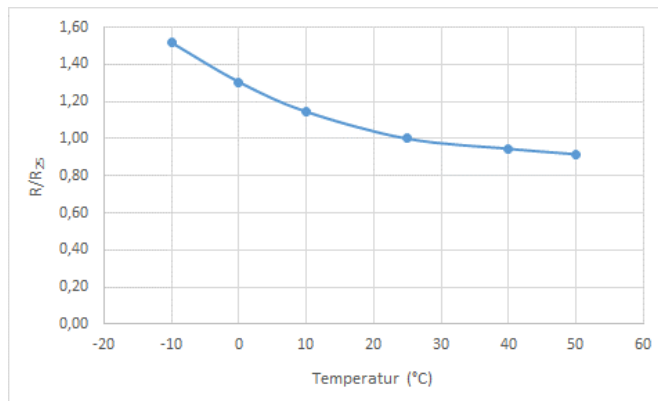
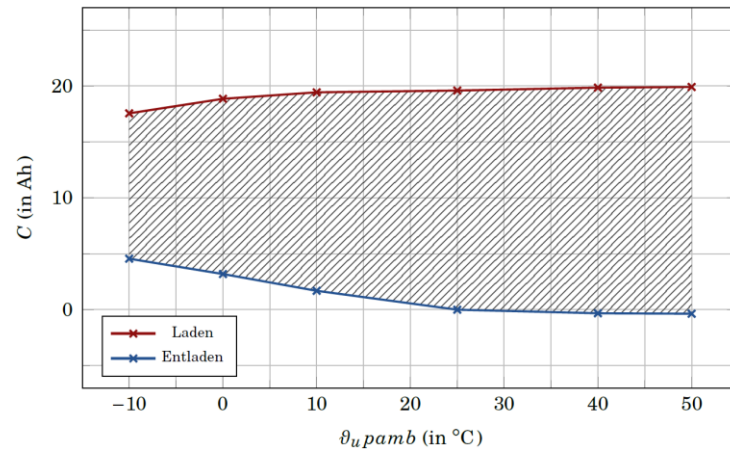
- Batteriekosten sind wesentlicher Bestandteil der Gesamtsystemkosten
- Optimierte Batterielebensdauer trägt wesentlich zur Wirtschaftlichkeit bei
- Investkosten für strecken-seitige Ladeinfrastruktur fallen vergleichsweise gering aus
- Energiekosten stellen nur einen sehr kleinen Teil der Gesamtkosten dar

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

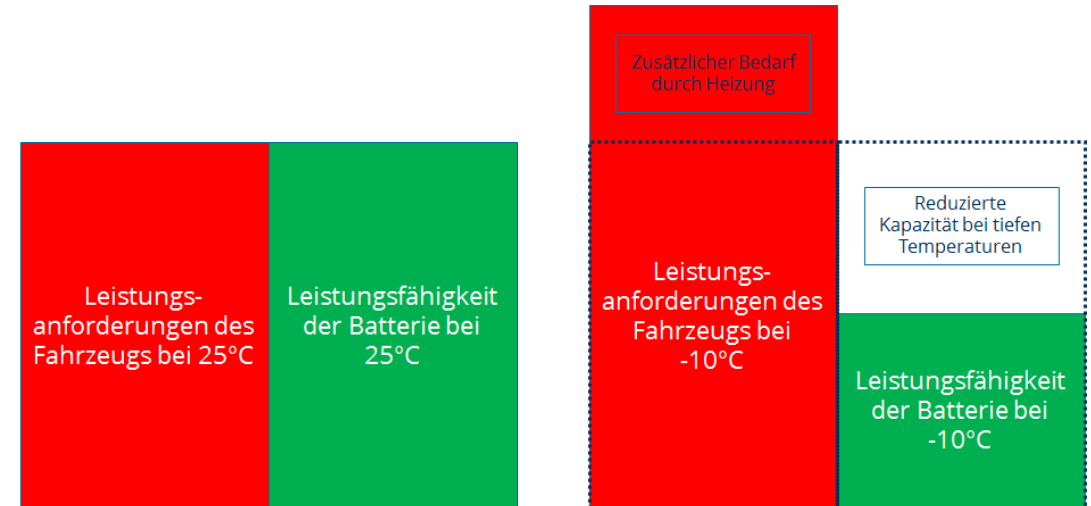
martin.ufert@tu-dresden.de
+49 351 463 39563

Systemanforderungen bei unterschiedlichen Temperaturen

Kapazität und Innenwiderstand sind in stark temperaturabhängig



Tiefe Temperaturen sind in doppelter Hinsicht problematisch



Möglichkeiten zur Effektminderung

- Aktive Batterietemperierung
- Fossile Zusatzheizung

SOC-Verlauf bei -10°C (Umgebungstemperatur)

Bei -10°C Umgebungstemperatur kann die Tagesfahrstrecke nur mit neuer Batterie (und ohne Reserve) bewältigt werden!

$E_{\text{batt}} = 412 \text{ kWh}$ // $P_{\text{charge}} = 150 \text{ kW}$ // $t_{\text{charge}} = 15 \text{ min}$

