

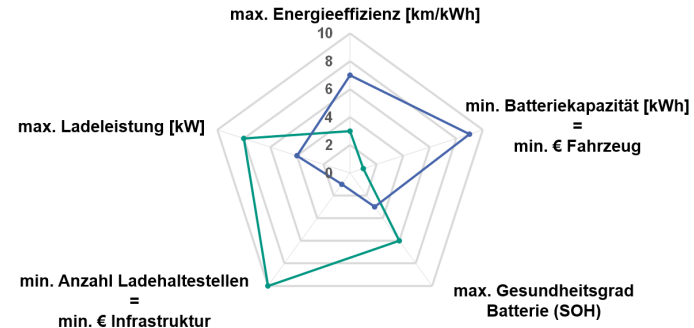
# Auslegungsmethodik für die Elektrifizierung von Buslinien

Markus Tesar

Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Teilinstitut Bahnsystemtechnik

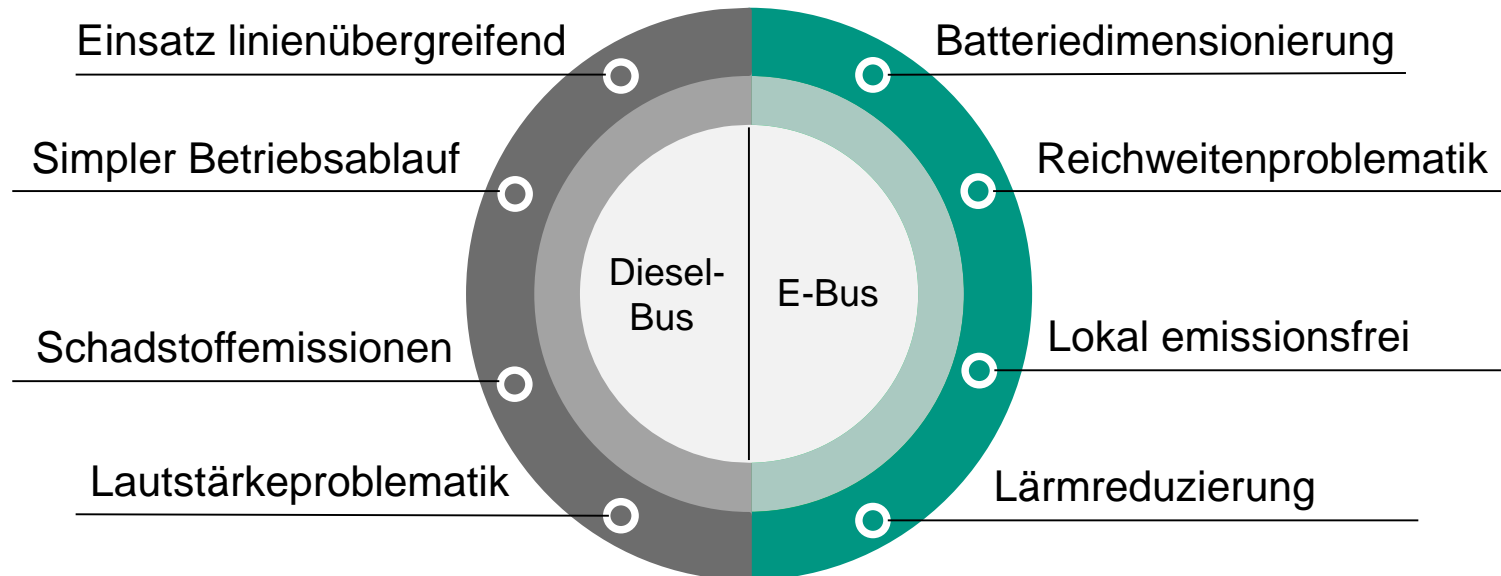


—●— E-Bus Batteriekapazität groß    —●— E-Bus Batteriekapazität klein  
 0 = schlechte Zielerreichung    10 = gute Zielerreichung



# Motivation

## ÖPNV im Wandel



E-Bus fördert Trend zu lebenswerteren Städten

# Motivation

- Grundlage: PRIMOVE Mannheim
  - Induktives Gelegenheitsladen auf der Linie 63
  - Bus mit 60 kWh Batterie ausgestattet
- Ziel: Erkenntnisse zur Elektrifizierung weiterer Linien



Quelle: PRIMOVE Mannheim

## Leitfrage

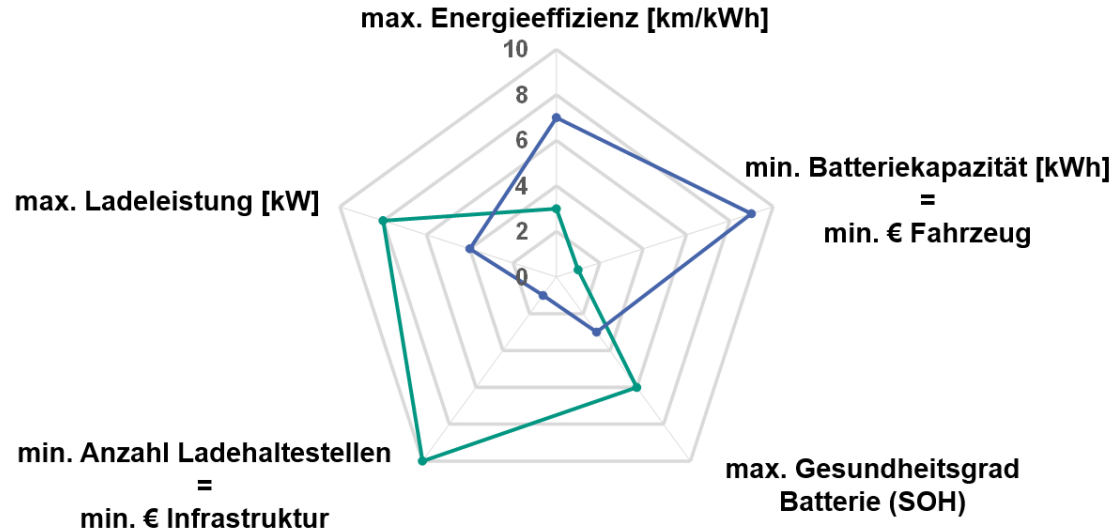
Wie muss das **Gesamtsystem aus Fahrzeug, Betrieb und Infrastruktur** ausgelegt werden, um einen **möglichst energieeffizienten Betrieb** und eine **möglichst lange Lebensdauer der Batterie** zu ermöglichen?

# Agenda

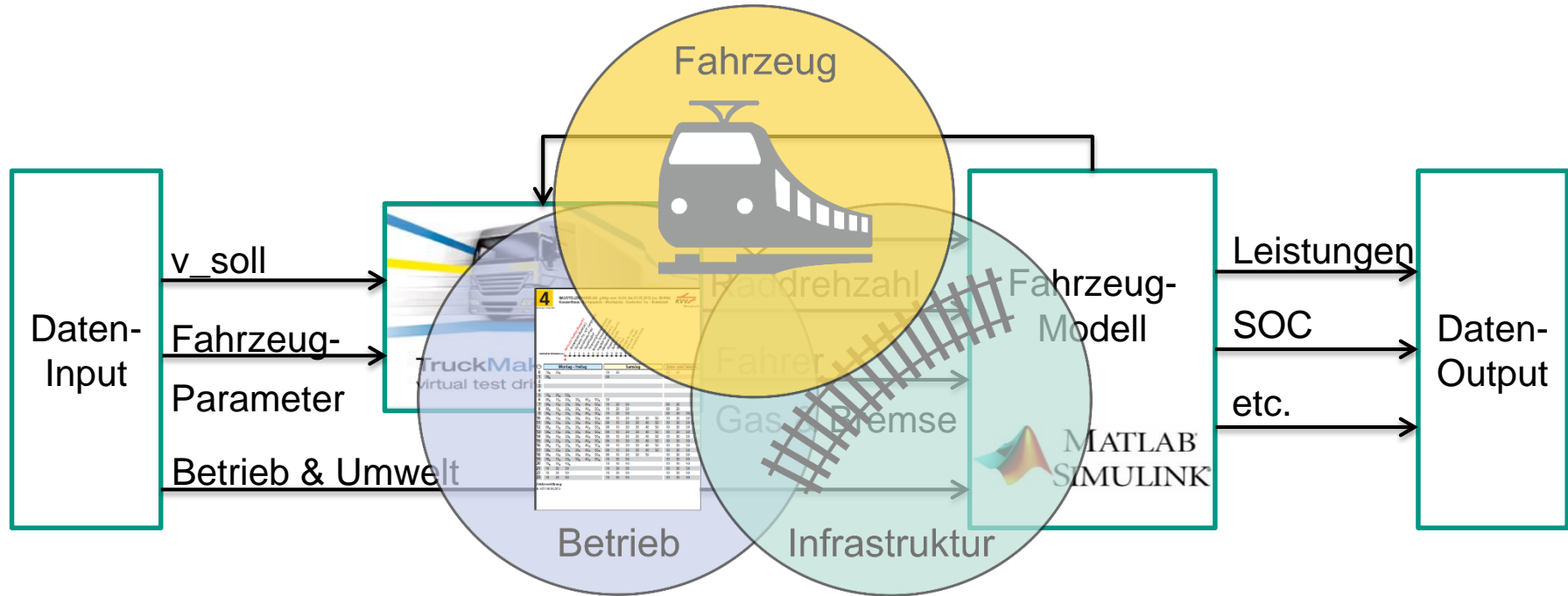
- Grundlagen
- Weiterentwicklung Gesamtsystem E-Bus
- Simulationsstudien
- Ergebnisse
- Zusammenfassung

# Grundlagen

—●— E-Bus Batteriekapazität groß —●— E-Bus Batteriekapazität klein  
0 = schlechte Zielerreichung      10 = gute Zielerreichung



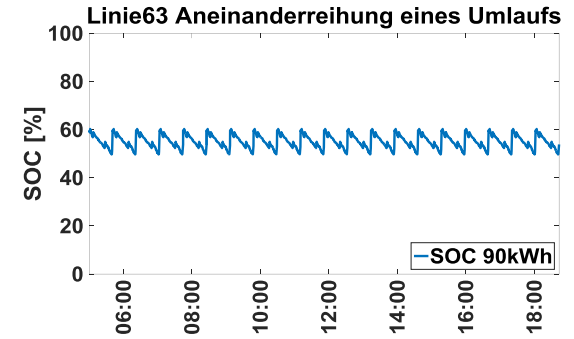
Auslegung ist mit Zielkonflikten behaftet



Modell bildet die Teilsysteme Fahrzeug, Betrieb und Infrastruktur ab

## Gesamtsystemsimulation

- Energieflüsse validiert
- Initialzustand nach jedem Umlauf angenommen
- Ausschließlich Linie 63 betrachtet
- Einfluss der Infrastruktur nicht berücksichtigt
- Keine Gefäßgrößenvariation möglich

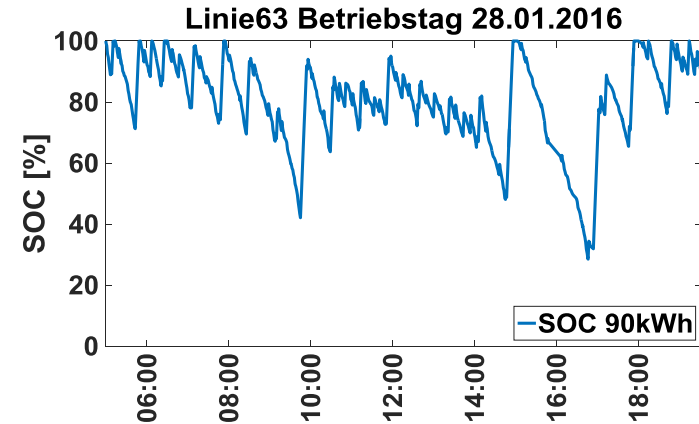


Untersuchung der Wechselwirkungen noch nicht möglich

# Weiterentwicklung Gesamtsystem E-Bus

## Gesamtsystemsimulation

- Auswirkungen von variierendem Verkehrs- und Fahrgastaufkommen
- Berücksichtigung von Aus- und Einrückfahrten



Repräsentative Aussagen zu Zielgrößen durch Simulation mehrerer, kompletter Betriebstage



# Weiterentwicklung Gesamtsystem E-Bus

## Teilsystem Betrieb

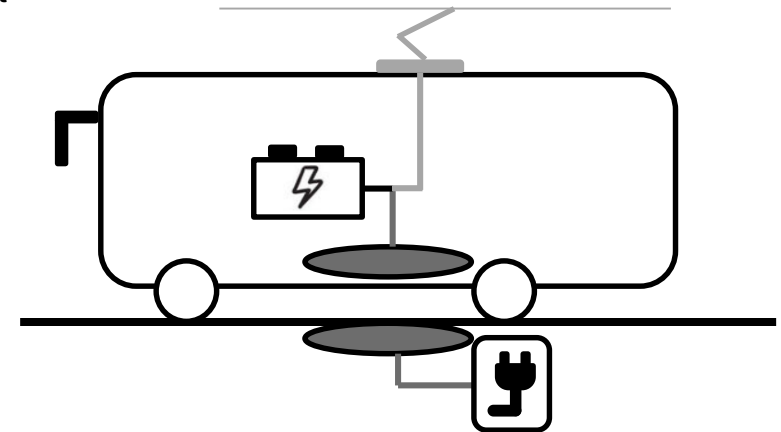
| Linie                           | 63    | 60    | 53    |
|---------------------------------|-------|-------|-------|
| Tägl. Fahrstrecke               | 180km | 220km | 290km |
| Anzahl Umläufe                  | 19    | 10    | 8     |
| Anzahl Haltestellen             | 25    | 46    | 72    |
| Betriebstage<br>(GPS-Messdaten) | 3     | 3     | 3     |

Abweichende Charakteristika der Linien 53 und 60 zur Linie 63

# Weiterentwicklung Gesamtsystem E-Bus

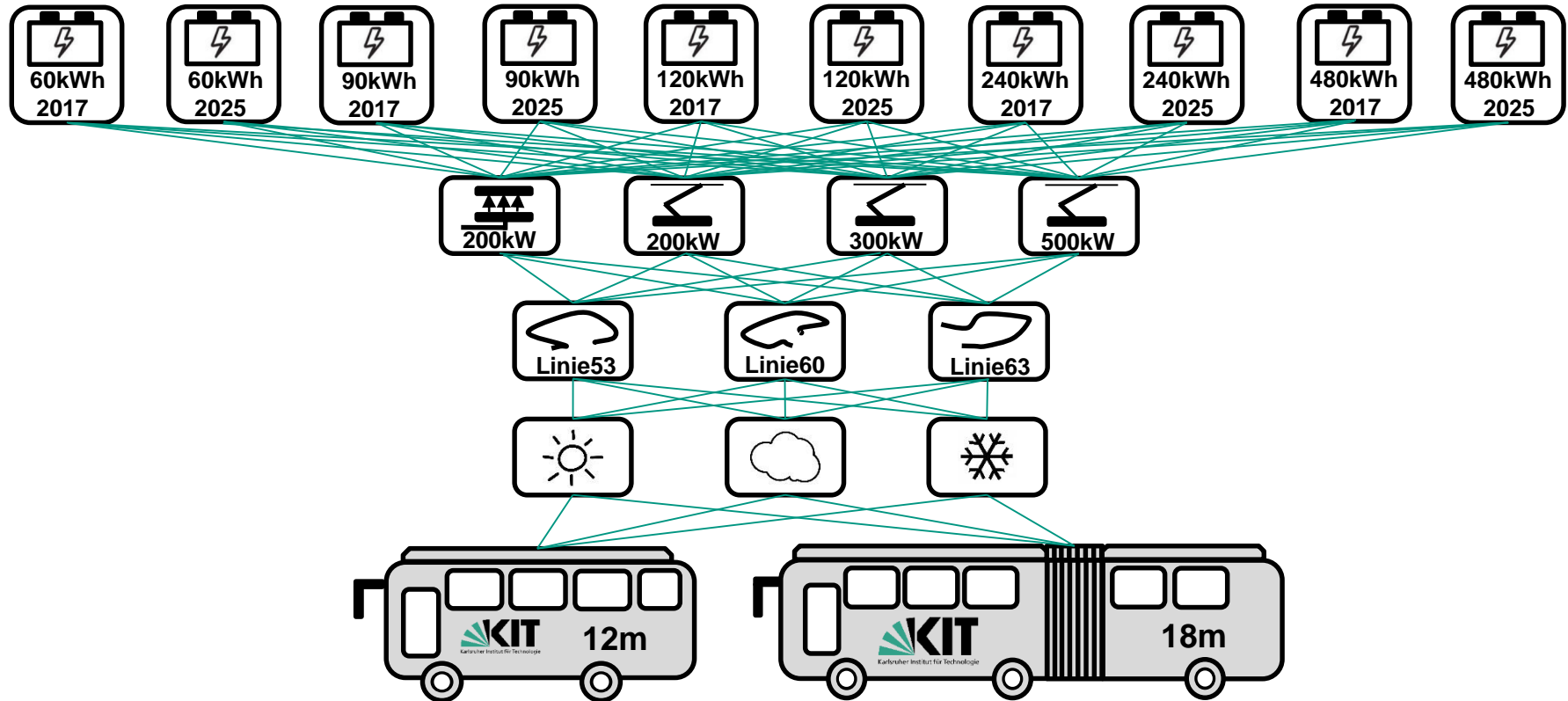
## Teilsystem Infrastruktur

- Linie 53 und 60 bisher nur für Dieselbusse ausgelegt
- Auswahl geeigneter Ladehaltestellen nötig
- Berücksichtigung von:
  - Haltedauer
  - Haltewahrscheinlichkeit
  - Netzanbindung durch ergänzenden Nahverkehr



Elektrifizierung der Linien 53 und 60 mit 10 bzw. 12 Ladehaltestellen

# Simulationsstudien



## Gesamtsystemsimulation

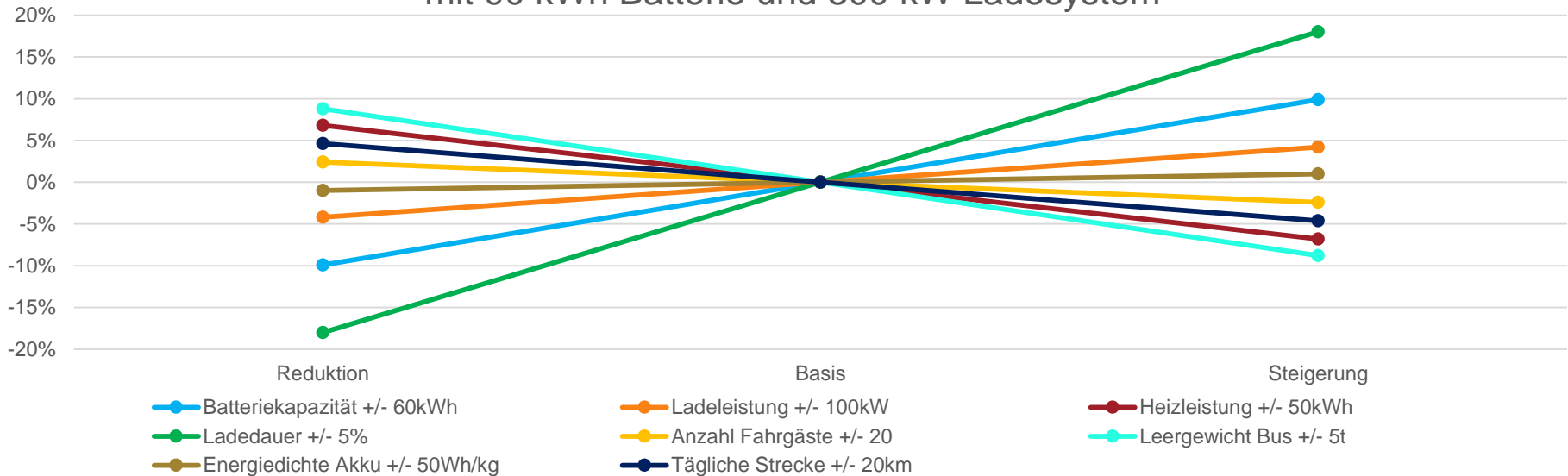
| Linie            | 63  | 60   | 53   |
|------------------|---|------|------|
| Simulationen     | ~450  | ~150 | ~100 |
| Anzahl Ladehalte | 0-12  |      |      |
| Besonderheiten   | Zusätzliche Standzeiten an den Endhaltestellen<br>Umfahrt<br>Batterietechnologie 2025++ |      |      |

### Ziele:

- Bestätigung Zielkonflikte bei Elektrifizierung von Buslinien
- Identifikation von Alterungsfaktoren der Batterie
- Feststellung Energiebedarf in Abhängigkeit der Gesamtsystemkonfiguration

## Sensitivitäten Batterielebensdauer

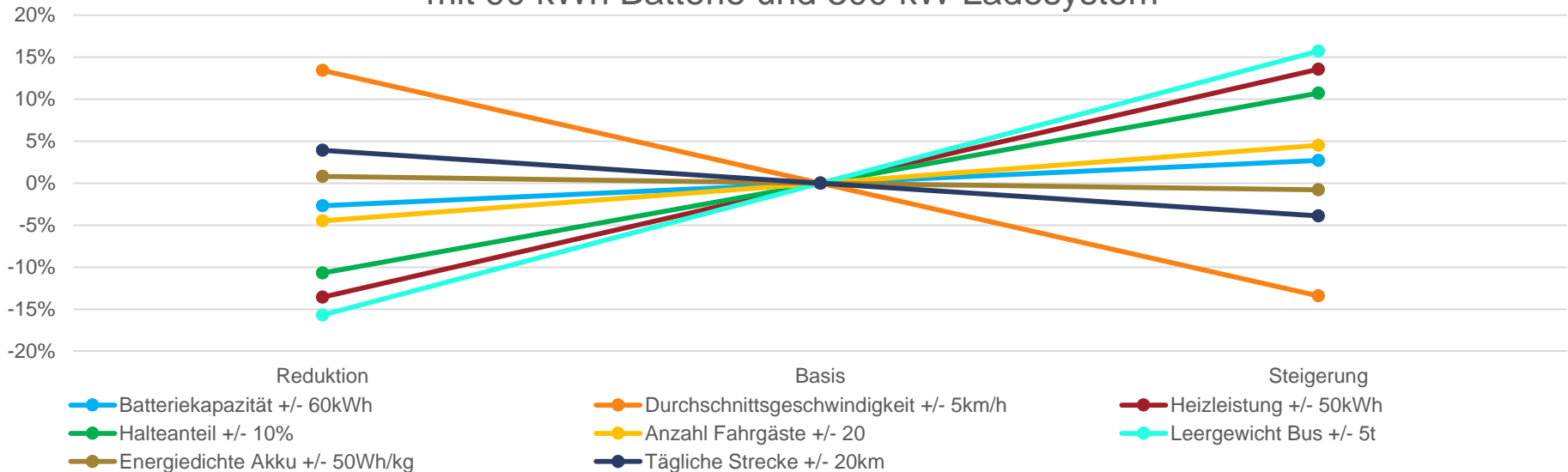
Sensitivitätsanalyse: Auswirkungen auf Lebensdauer für 12 m Bus mit 90 kWh Batterie und 300 kW Ladesystem



Treibende Faktoren sind Ladedauer, Kapazität und Gefäßgröße

## Sensitivitäten Energiebedarf

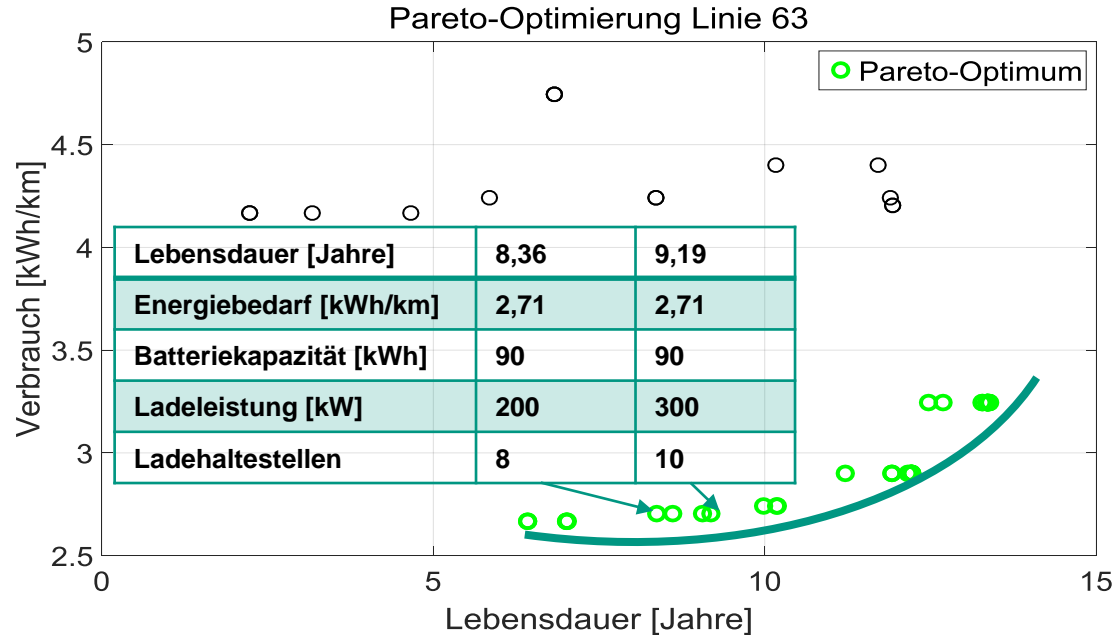
Sensitivitätsanalyse: Auswirkungen auf Energiebedarf für 12 m Bus mit 90 kWh Batterie und 300 kW Ladesystem



Treibende Faktoren sind Gefäßgröße, Klimatisierung und Streckenführung

# Ergebnisse

## Pareto-Optimierung mittels Partikelschwarmoptimierung



Zielkonflikt bei Auslegung durch Pareto-Optimierung bestätigt

# Ergebnisse

## Erkenntnisse technologische Auslegung

- Technisch optimal: jede Haltestelle = Ladehaltestelle
  - Minimierung Lade-/Entladehöhe
  - Kleinere Batterie einsetzbar
- Aufwand höherer Ladeleistungen bleibt unberücksichtigt
  - Ausstattung mit höherer Ladeleistung teurer
- Kleine Gefäßgröße immer bevorzugt
  - Fahrgastaufkommen wird außer Acht gelassen

Betrachtung betriebswirtschaftlicher Faktoren notwendig



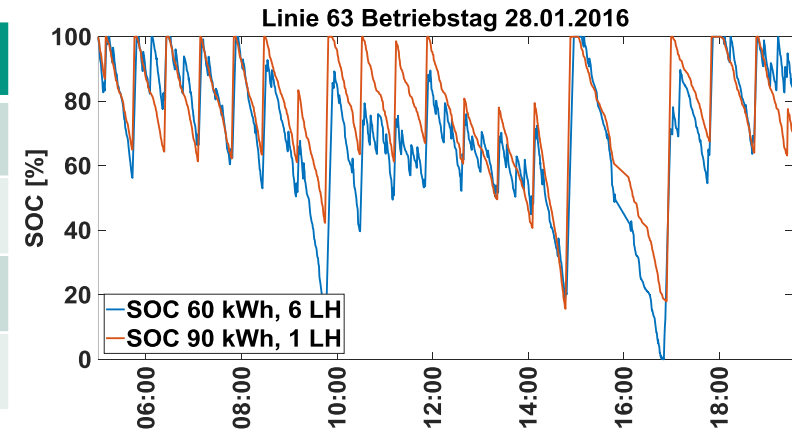
# Ergebnisse

## Minimalauslegung für die Linie 63

- Endhaltestelle als Ladepunkt ausreichend



|                     | 60 kWh      | 90 kWh      |
|---------------------|-------------|-------------|
| # Ladehaltestellen  | 6           | 1           |
| Ladeleistung        | 200 kW      | 500 kW      |
| Batterielebensdauer | 4,71 Jahre  | 5,94 Jahre  |
| Energiebedarf       | 2,07 kWh/km | 2,10 kWh/km |



Praxistrend bei Linienauslegung geht in Richtung großer Batterie und wenig Ladeinfrastruktur

# Zusammenfassung

## Zusammenfassung

- Zielkonflikte für die Auslegung nachgewiesen
- Einflussfaktoren auf Lebensdauer und Energiebedarf ermittelt und quantifiziert
- Auslegungsmethodik entwickelt
- Optimierungspotenzial an der Mannheimer Linie 63 aufgezeigt

Markus Tesar, M. Sc.

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Teilinstitut Bahnsystemtechnik  
Rintheimer Querallee 2 - Geb. 70.04, Raum 034 - 76131 Karlsruhe

Telefon: +49 (0)721 / 608 - 4 1819  
E-Mail: [markus.tesar@kit.edu](mailto:markus.tesar@kit.edu)  
Internet: [www.bahnsystemtechnik.de](http://www.bahnsystemtechnik.de)