



# ***Reduktion des Energieverbrauchs im Linienbetrieb - durch Innovative Lösungen im Fahrzeugkonzept***

Fabio Widmer / ETH  
Jan Wunderlich / HESS  
05.06.2024

## Ausgangslage aus Vorgängerprojekten

	Vorhandene Potentiale
■ Handlungsfeld I: Antrieb und Rekuperation	✓
■ Handlungsfeld II: Leichtbau	✓
■ Handlungsfeld III: HV Regelungsoptimierung	✓
■ Handlungsfeld IV: Heizung / Klimatisierung	++
■ Handlungsfeld V: Wagenkasten	+++
■ Handlungsfeld VI: Batterietechnologie	+
■ ...	

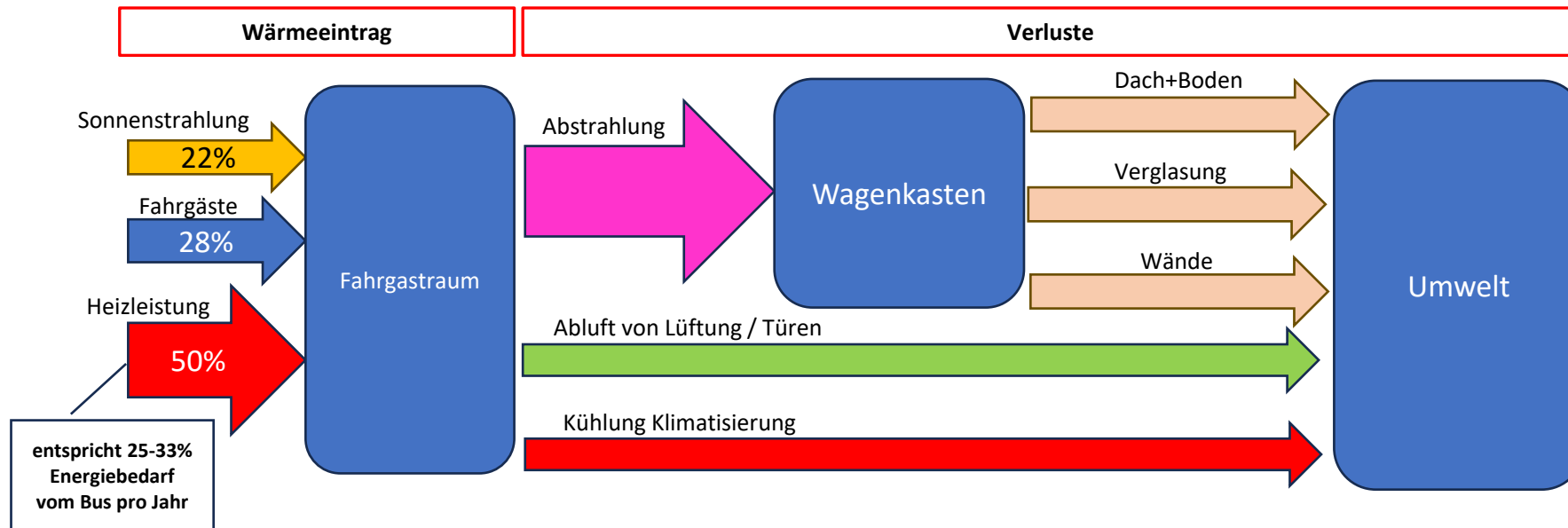
Anforderung:

«Nichtfossilen Verkehrsträgern im öffentlichen Verkehr auf Strassen zum Durchbruch verhelfen»...*durch anwendbare Technologie, Innovationen und Mut*

# Innovationen bei Heizung & Kühlung

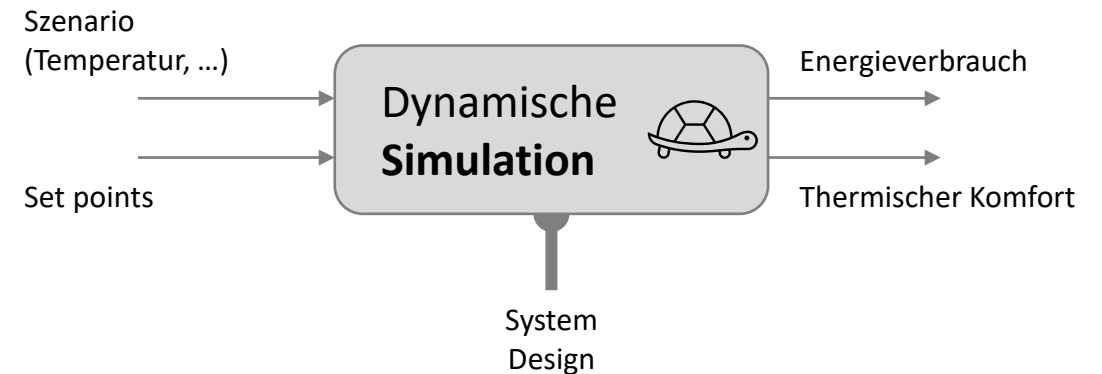
## Energieflüsse H&K im Bus im Jahresdurchschnitt

Wo ist energetisches Potenzial im Busbau?

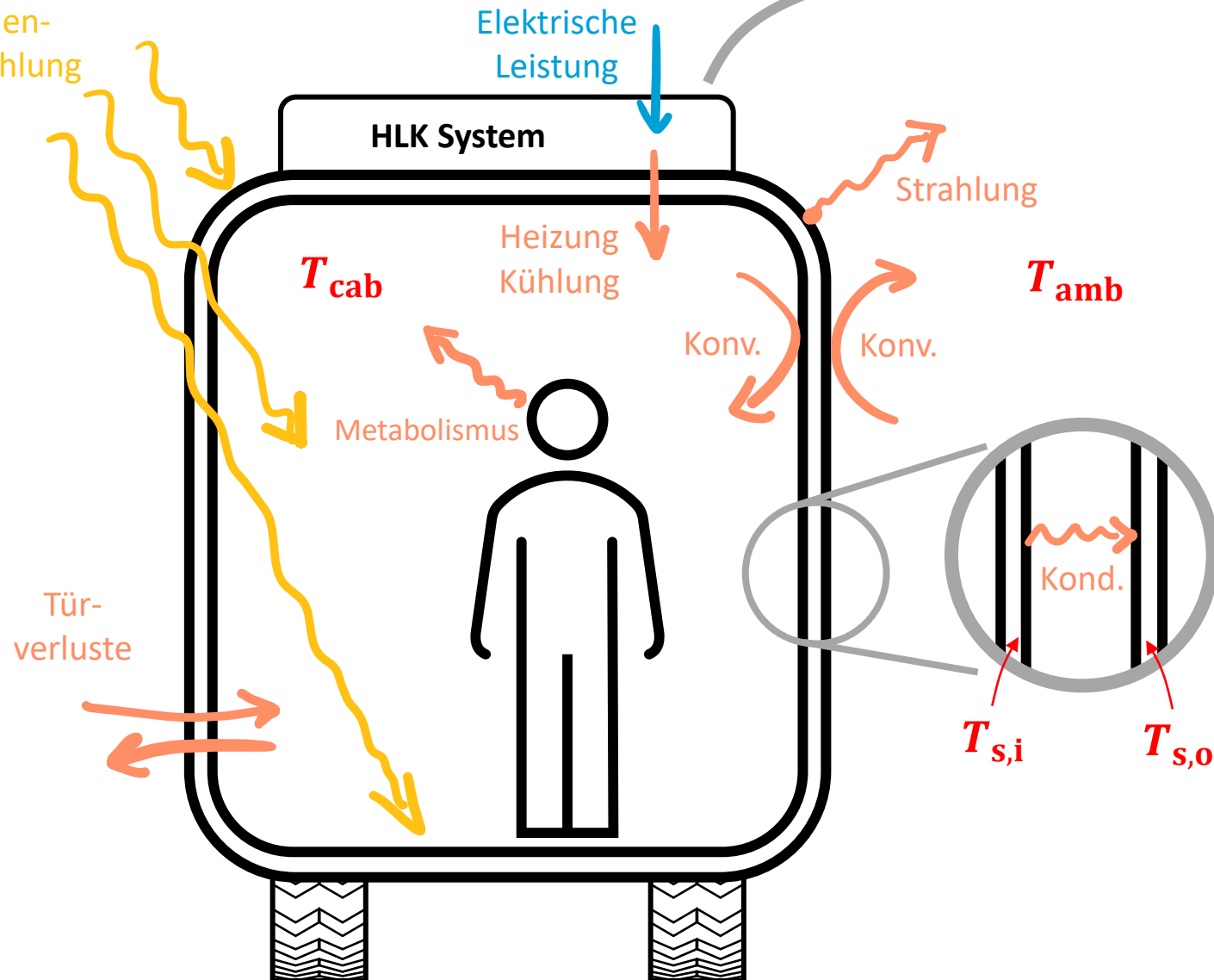


# Entwicklung Simulationsumgebung: Motivation

- Vergleich verschiedener HLK Systemkonfigurationen
  - Basierend auf Simulationen
- Dynamische physikalische Simulationen sind langsam
  - Berücksichtige limitierte # Szenarios
  - Verändere limitierte # Parameter
- **Wir möchten eine schnelle und effiziente Simulation**



# Modellübersicht



## HLK System

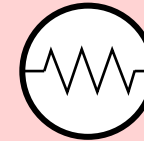
Kühlen:



Klima

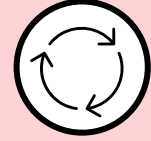
Heizen:

Widerstands-  
heizung

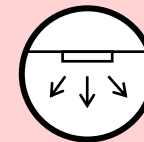


oder

Wärme-  
pumpe



+ Infrarot-  
panels

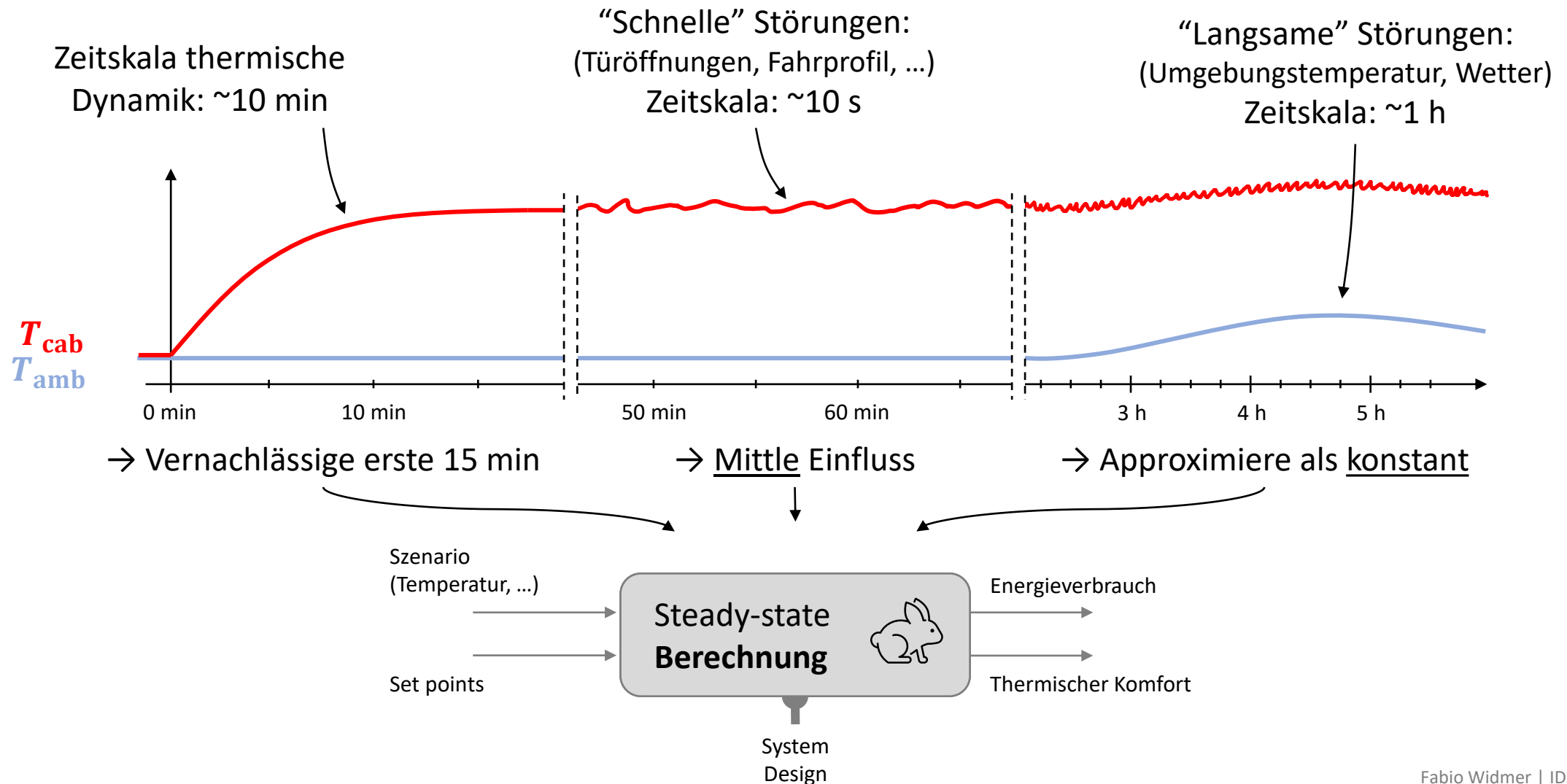


Zus.:



Türluftschleier

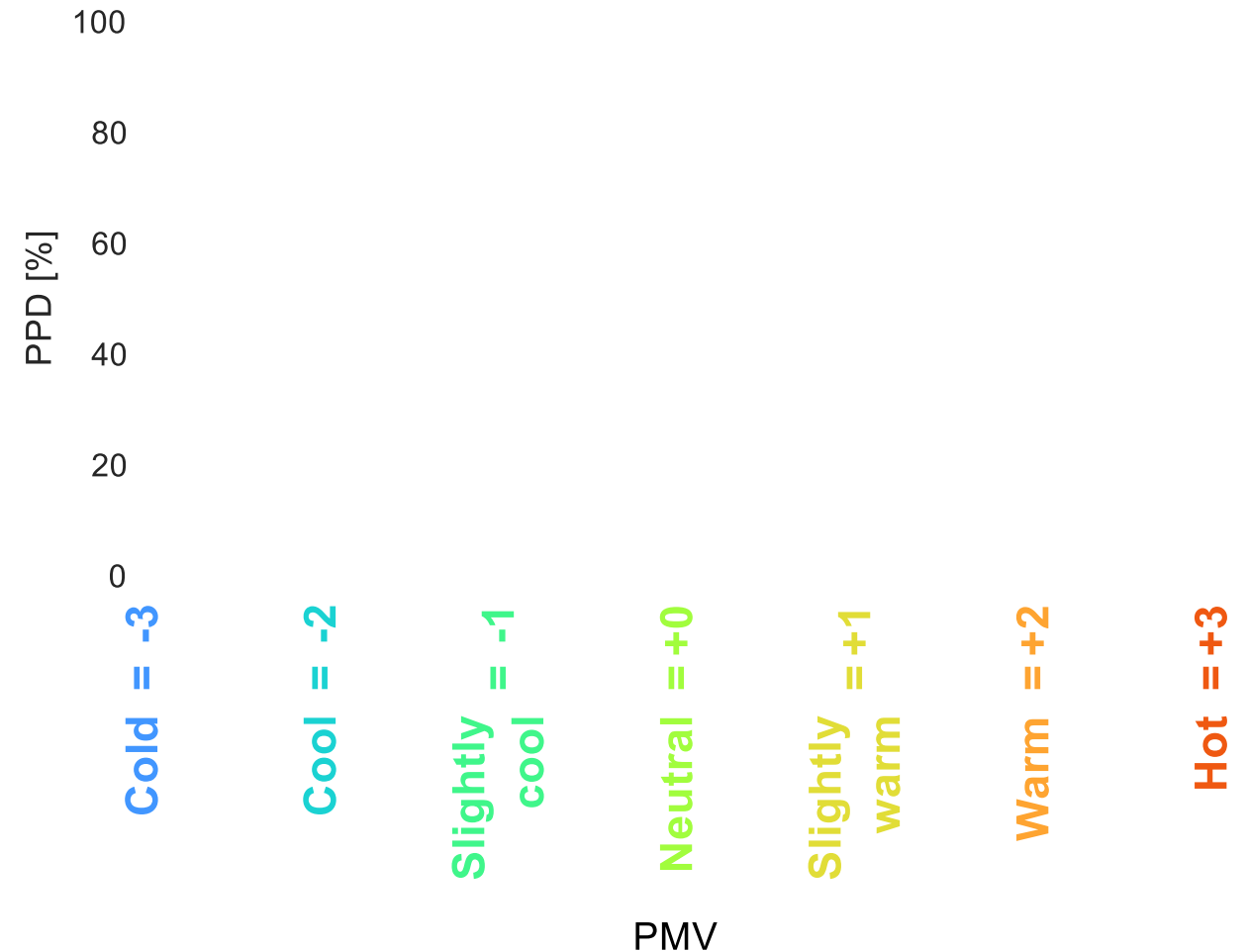
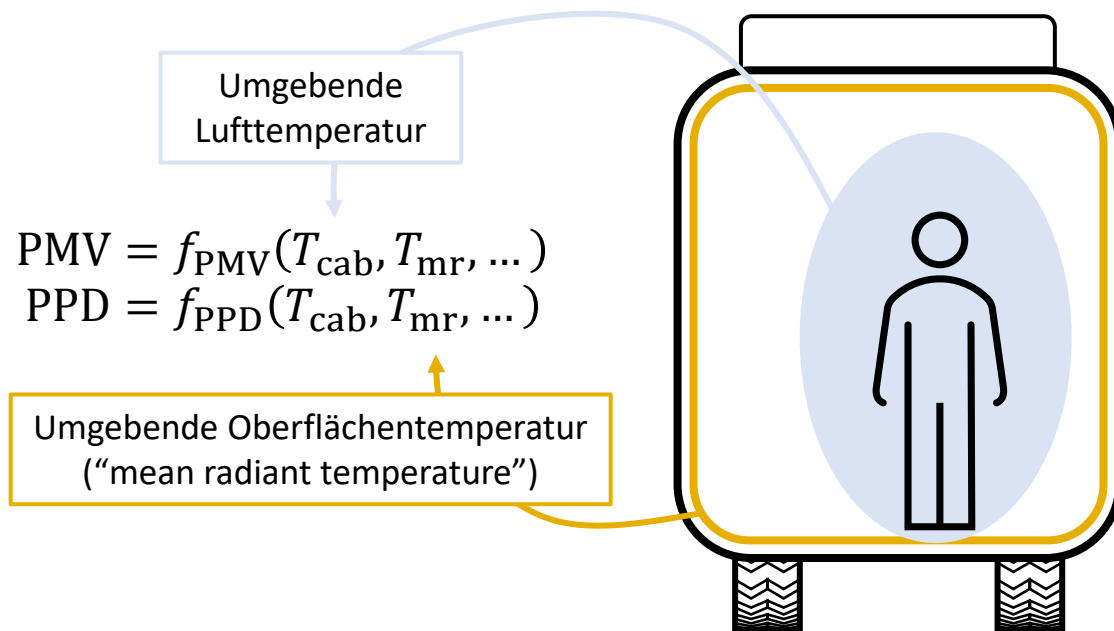
# Vereinfachung durch Steady-State-Betrachtung



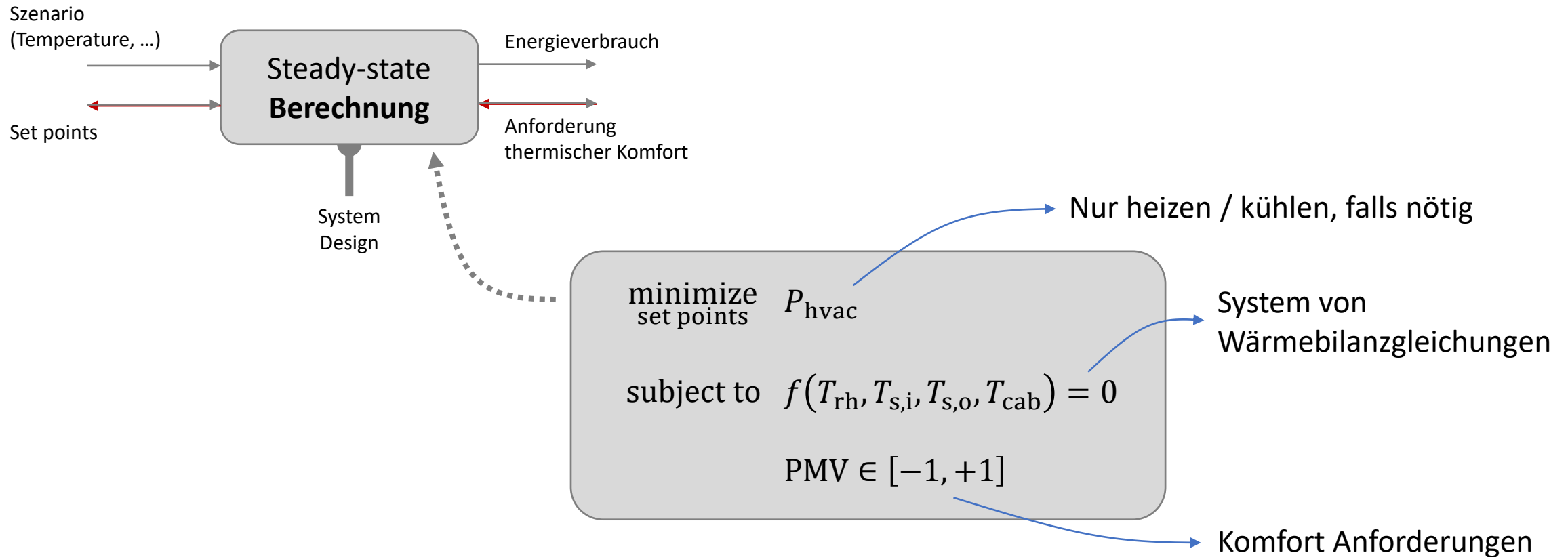
# Quantifizierung des thermischen Komforts

## Fanger's PMV & PPD Model (ISO 7730):

- PMV: Predicted Mean Vote  
→ "erwartete durchschnittliche Empfindung"
- PPD: Predicted Percentage Dissatisfied  
→ "erwartete durchschnittliche Unzufriedenheitsrate"



# Sicherstellung des Komforts im Modell → “Invertierte Kausalität”

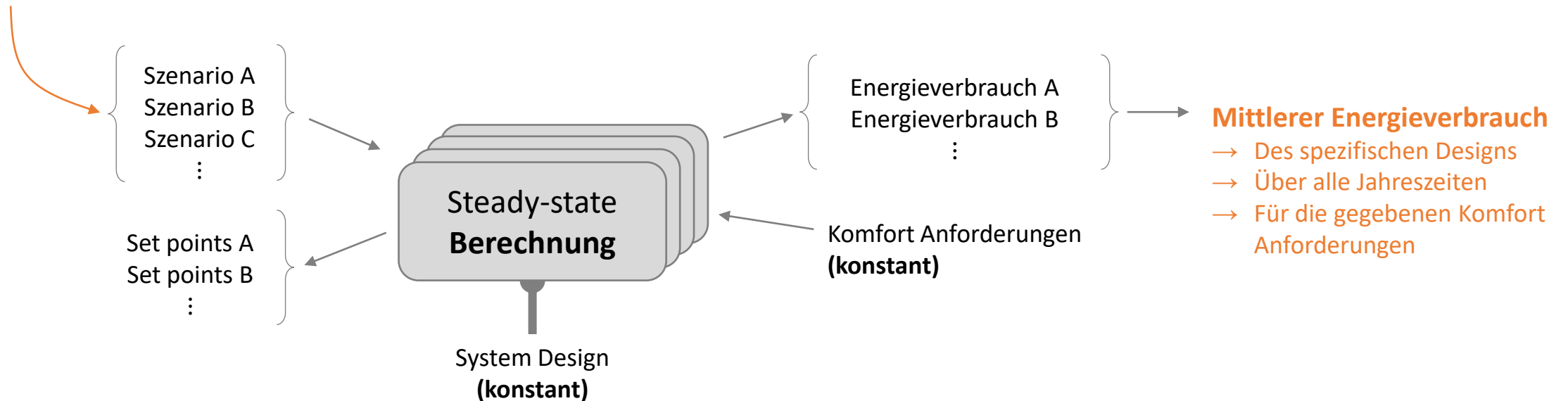


→ Kann in 0.2 s auf einem Laptop gelöst werden

# Von Einzelszenarien zu Ganzjahresbetrachtung

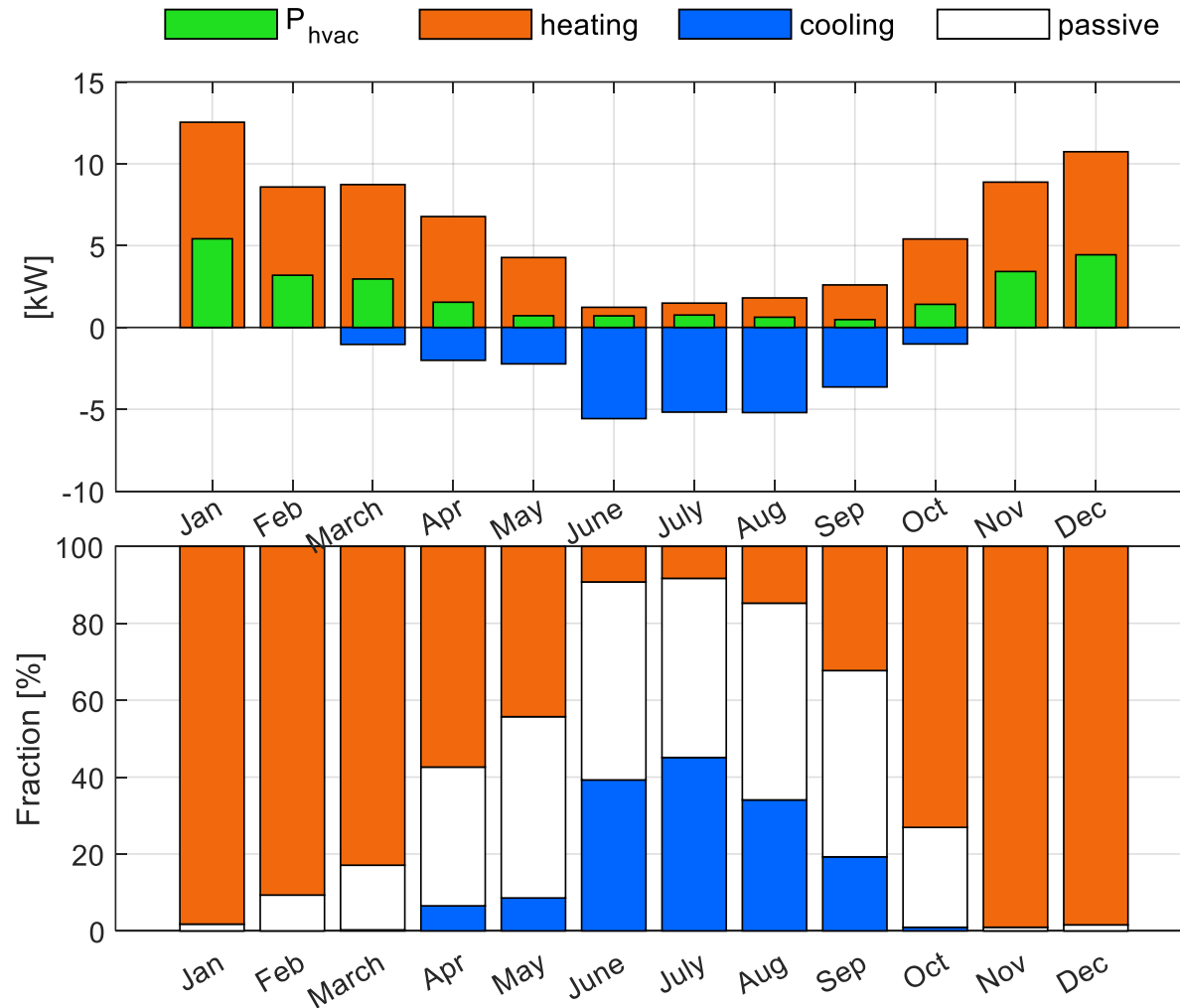
## 7500 Szenarien

- Basierend auf Messdaten (ZTBus\*)
- Gesammelt über 3 Jahre
- Decken alle Jahreszeiten ab



→ Braucht ~6 min auf einem Laptop

# Übersicht über Ganzjahresbetrachtung



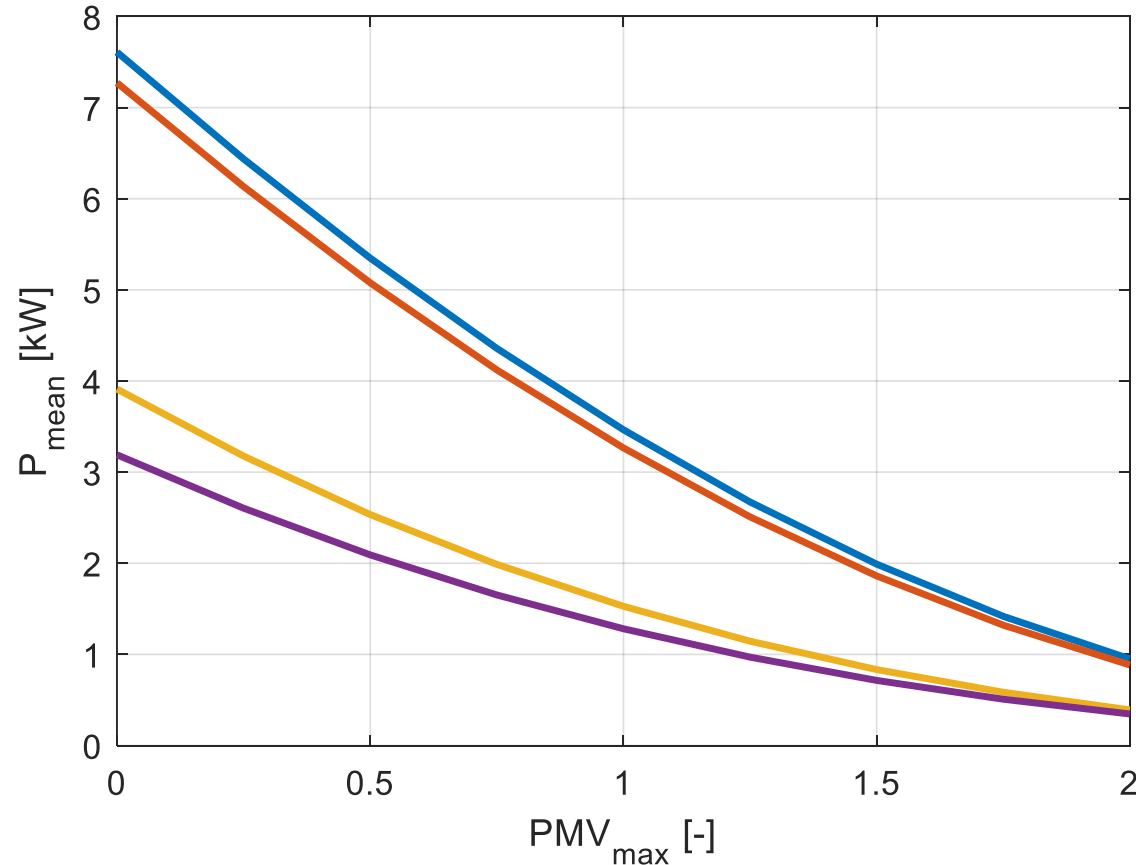
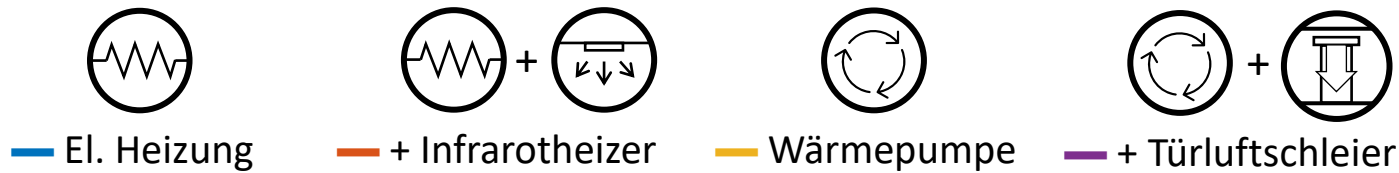
Komfort Anforderung:  
 $PMV \in [-1, +1]$

→ Heizungen ist energetisch anspruchsvoller als Kühlen

→ Heizung wird häufiger gebraucht als Kühlung

→ Oft wird weder Heizung noch Kühlung gebraucht (passiv = Lüften)

# Vergleich verschiedener Technologiekombinationen



- Infrarot Heizpanels können Effizienz um 5% bis 10% erhöhen
- Wärmepumpe kann Effizienz um 50% bis 60% erhöhen
- Kombination von Infrarotheizer und Wärmepumpe bringt keinen Vorteil
- Türluftschleier sind auch in Kombination mit Wärmepumpe vielversprechend

# Wichtigste Erkenntnisse aus Steady-State Betrachtung

- Wärmepumpen sind extrem wichtig
- Für CH-Klima ist Heizen deutlich wichtiger als Kühlen  
→ Effizienzverbesserungen für Heizen sind erstrebenswert
- Infrarotheizer sind in Kombination mit Wärmepumpe nicht empfehlenswert
- Türluftschleier sind eine vielversprechende Technologie

## Referenzen:

- F. Widmer et al., Highly efficient year-round energy and comfort optimization of HVAC systems in electric city buses, 22nd IFAC World Congress. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.715>.
- F. Widmer et al., Optimization of the energy-comfort trade-off of HVAC systems in electric city buses based on a steady-state model, preprint submitted to Control Engineering Practice (2024). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.00517>.

# Technologie Transfer mit dem Fokus: Linienbetrieb

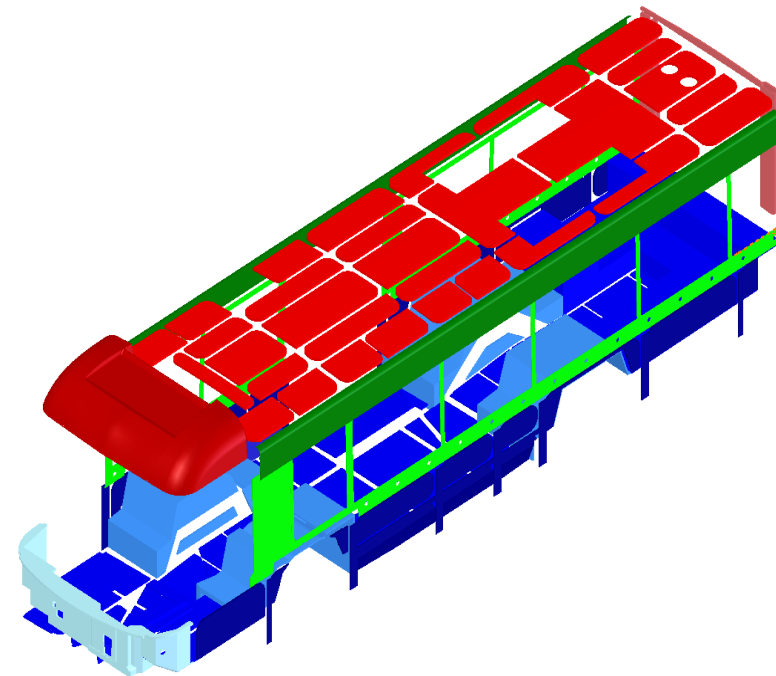
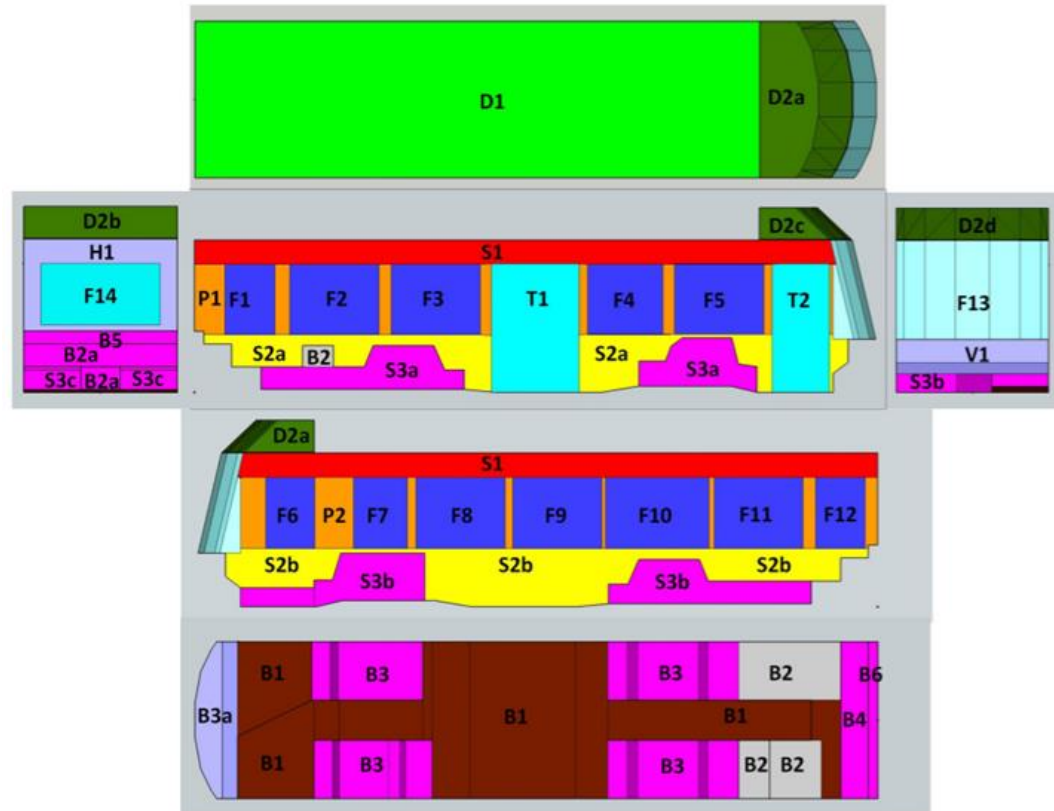
Erkenntnisse und konkrete Umsetzung:

«One solution fits all»

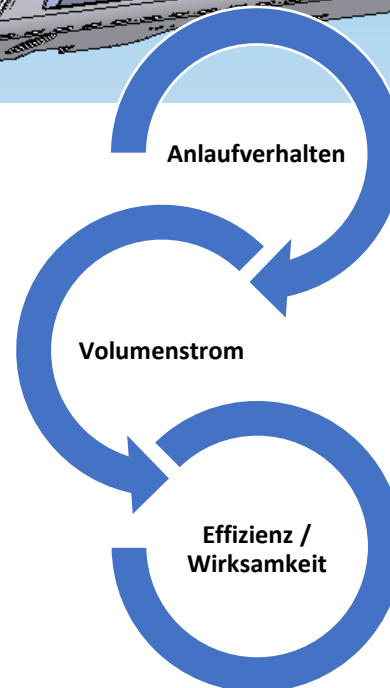
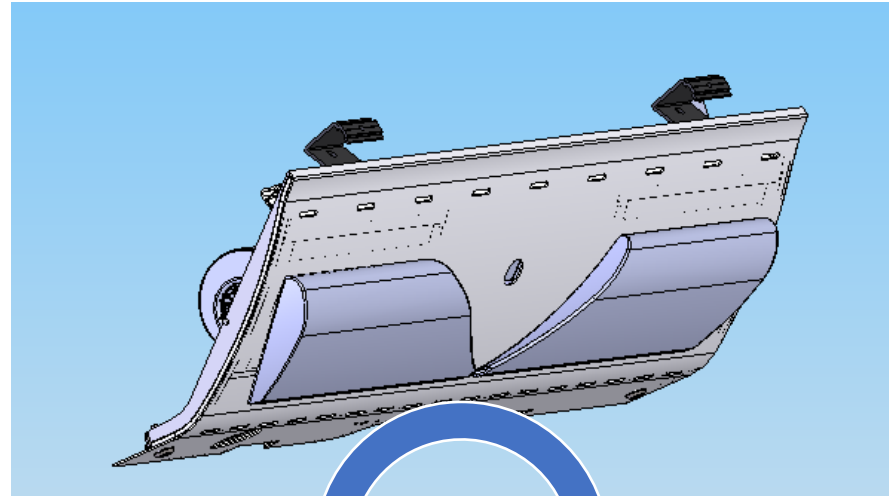


- **Bedarfsgerechte Systemauslegung durch den lighTram® Baukasten** – Was bietet die grösste Nachhaltigkeit im jeweiligen Einsatzszenario im gesamten Fahrzeugkonzept?
- **Wagenkasten Optimierungen** – Detaillierte Feinabstimmung für alle Materialien und Oberflächen
- **Höchste Steckerladeleistung CCS2** – Operative Flexibilität für eine effiziente Integration und optimale Ausnutzung der E-Bus Flotte
- **Bedarfsgeregelte Sub-Systeme** – reaktiv und adaptiv auf äussere Anforderungen und intelligent durch Systemvernetzung
- **Wärmepumpe CO2** – Höchste Wirkungsgrade mit Fokus auf die Heizperiode
- **Türen und Eintrittsbereiche energetisch optimieren** – Verluste vermeiden
- ...

# Technologie Transfer mit dem Fokus: Linienbetrieb



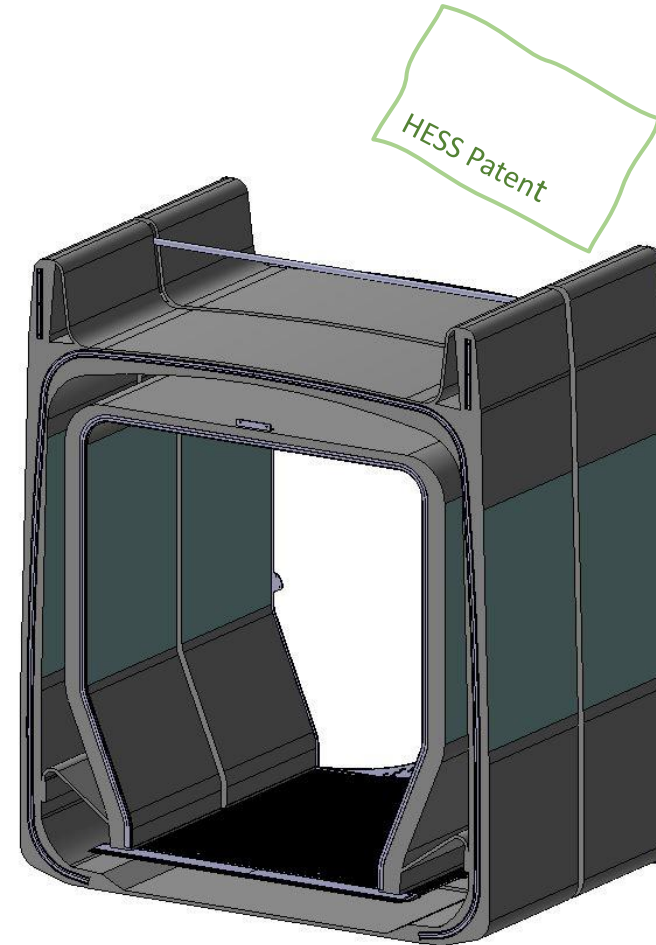
# Technologie Transfer mit dem Fokus: Linienbetrieb



# Technologie Transfer mit dem Fokus: Linienbetrieb

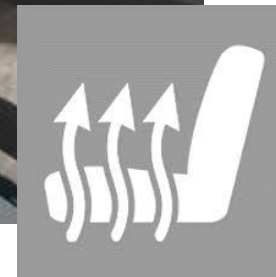
Optimal isolierter Gelenkbereich bei hoher Aufenthaltsqualität:

- Durchgehend doppelwandig ausgeführt für eine bessere Isolation und zusätzliche Geräuschkämmung
- Vergrößerter transluzenter Bereich für noch mehr natürliches Licht
- Kasseler Sonderboard kompatibel



# Technologie Transfer mit dem Fokus: Linienbetrieb

Thermischer Komfort → Wärme am richtigen Ort + zur richtigen Zeit



- Direkter Wärmeübertrag – erlaubt ein tieferes Temperaturniveau im gesamten Fahrgastraum

***Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit  
und besuchen Sie in der Ausstellung unsere Innovationen***



