

# Erstellung eines thermischen Wagenkastenmodells für einstöckige (batterieelektrische) Schienenfahrzeuge

Sylvio Donner  
Institut für Fahrzeugkonzepte, FK-FEK  
05.10.2022



Wissen für Morgen

# Agenda

- Einleitung
- Modellierung
  - Gesamtkonzept
  - Das thermische Wagenkastenmodell
  - Wandmodell
  - Klimaanlagenmodell
- Automatisierung
- Ergebnisse aus dem EU-Projekt FINE-2
- Ergebnisse aus Projekt MOSENAS
- Ausblick



# Einleitung

**Motivation:** Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie die Senkung des Gesamtenergiebedarfes

- Transportsektor 30 % des Gesamtenergiebedarfes in Deutschland ( $\cong$  400 TWh)
- Verkehrsverlagerung von Straße auf Schiene
- Nur 54 % der Strecken OL-elektrifiziert
- Nicht- bzw. teilelektrifizierte Strecken werden dieselbetrieben befahren
- Lösung: batterieelektrische Antriebe
- Herausforderung: Sicherstellung der Reichweite auch unter anspruchsvollen klimatischen Randbedingungen

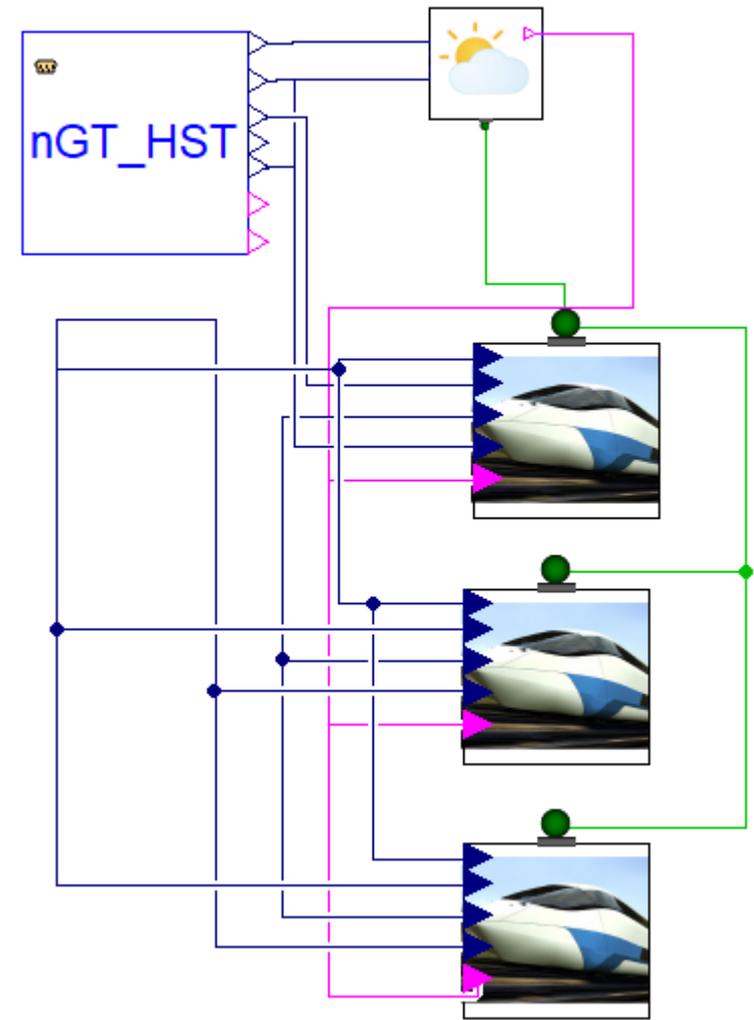
**Ziel:** Kenntnis der charakteristischen thermodyn. Größen im thermischen Wagenkastenmodell (TWKM) zur Sicherstellung der Reichweite

**Vision:** [\(12\) NGT CARGO: Intermodales Terminalkonzept - YouTube](#)



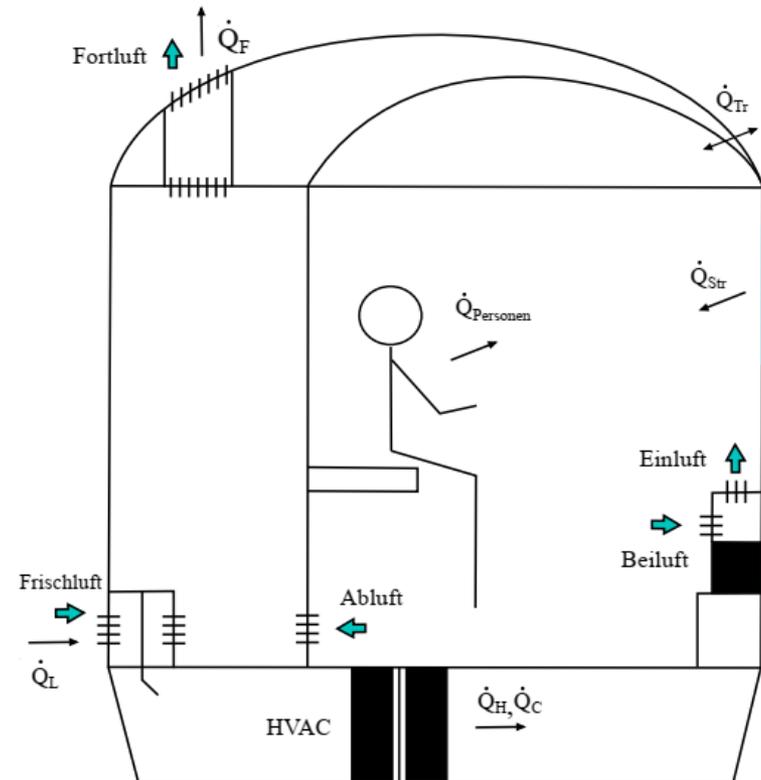
# Modellierung: Gesamtkonzept

- Gesamtmodell bestehend aus drei Untermodellen:
  - Wettermodell: Einstellung der klimatischen Randbedingungen
  - Fahrdynamikmodell: ermöglicht Energiebetrachtungen bezüglich Antriebsleistung
  - TWKM: Berechnung des HVAC-Leistung- und Energiebedarfes
- Einbindung der fahrzeugspezifischen Parameter mithilfe von records über eine Auswahl von Fahrzeugen aus einer Datenbank



# Modellierung: Das thermische Wagenkastenmodell

- Bilanzierung der auf- und abgegebenen Wärmemengen ( $Q$ )
- Implementierung des Wagenkastens durch verschiedene Wand- und Fensterelemente
- Regelung von Fahrgastraumtemperatur und Frischluftzufuhr über ein Klimaanlagenmodell (HVAC)
- Fahrgastmodell zur Beschreibung der temperaturabhängigen Wärmeenergie- und Feuchtigkeitsabgabe

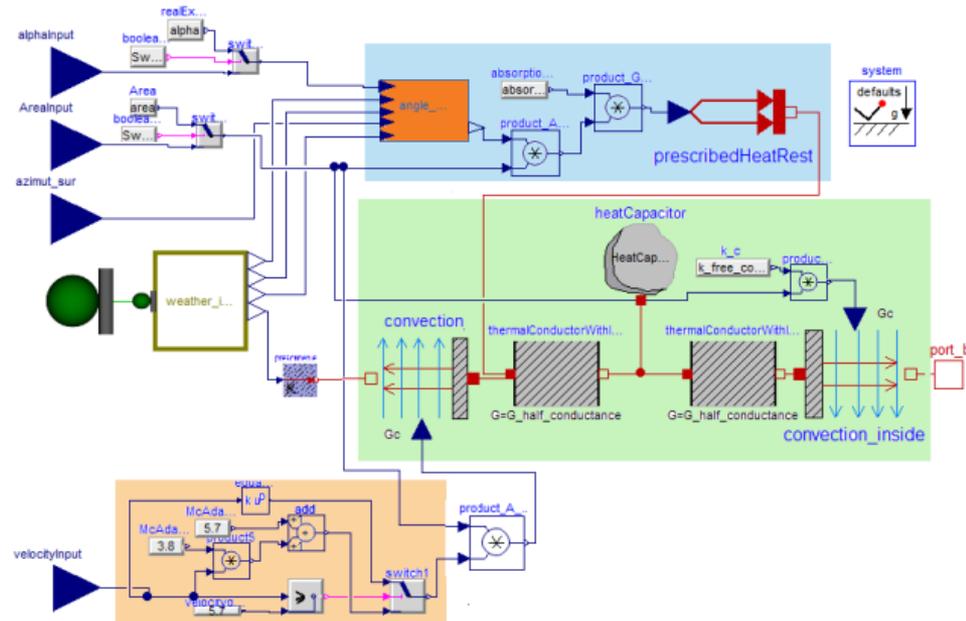


# Modellierung: Wandmodell

## Modellstruktur:

- Wärmestrahlung mit Einstrahlwinkelberechnung (blau)
- Wärmedurchgang (grün)
- Berechnung des äußeren Wärmeübertragungskoeffizienten (orange)

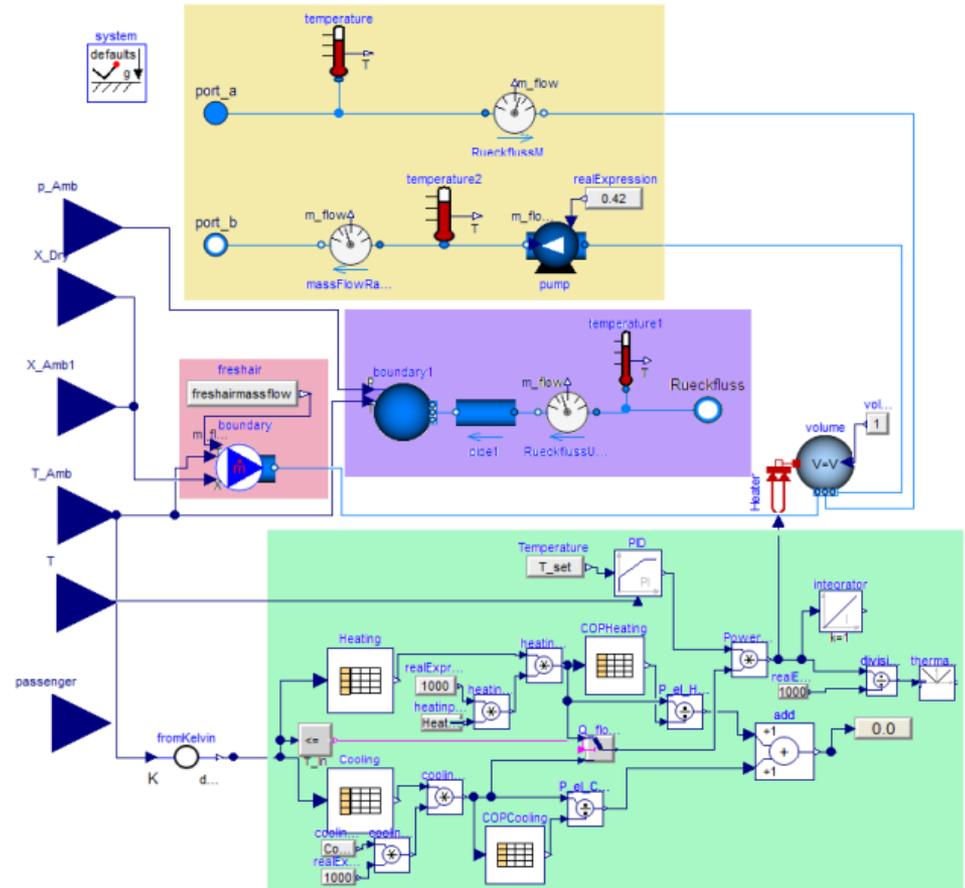
Drei Wärmeübertragungsmechanismen: Wärmestrahlung, Konvektion und Wärmeleitung



# Modellierung: Klimaanlage

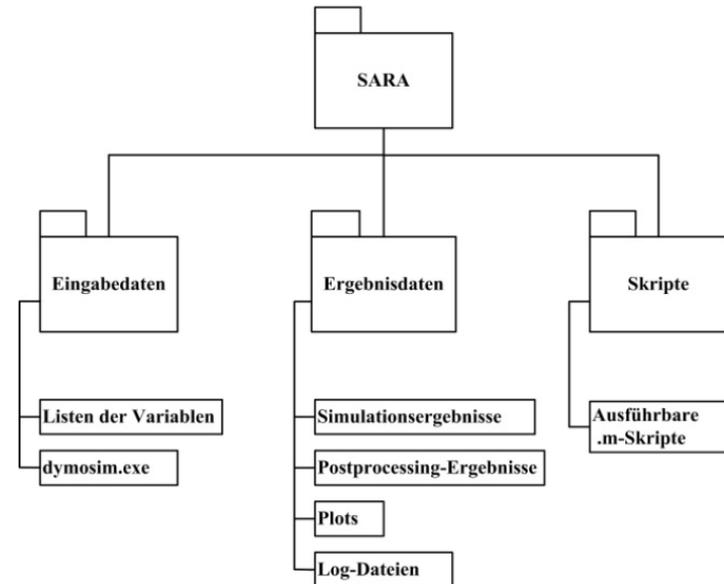
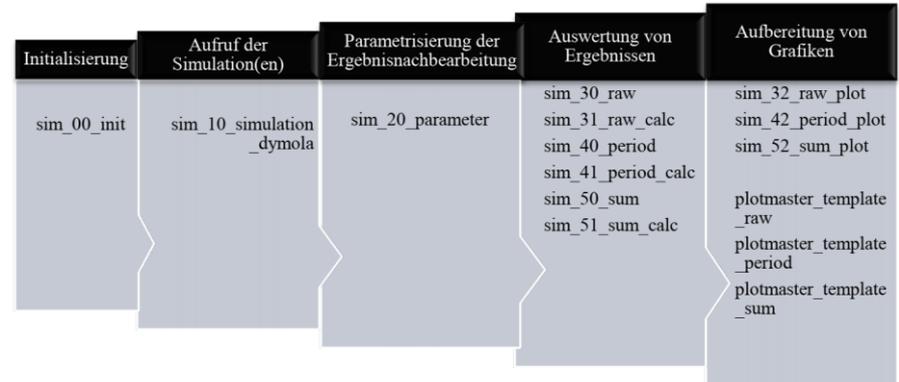
## Modellstruktur:

- Zuluftkreislauf mit Zuluftventilatoren (gelb)
- Besetzungsabhängige Zufuhr von Frischluft (rot)
- Rückfluss und Druckausgleich der Raumluft mit der Umgebung (lila)
- Regelung der Temperatur im Fahrgastraum durch PI-Regler und Kombitabelle für Heiz-/Kühlleistung (grün)



# Automatisierung: SARA-Skript

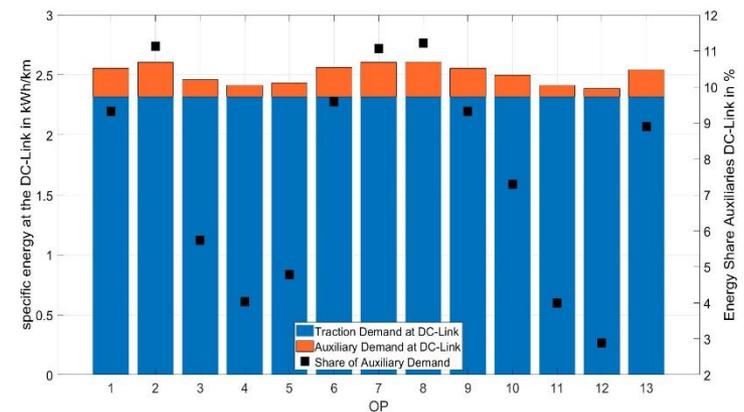
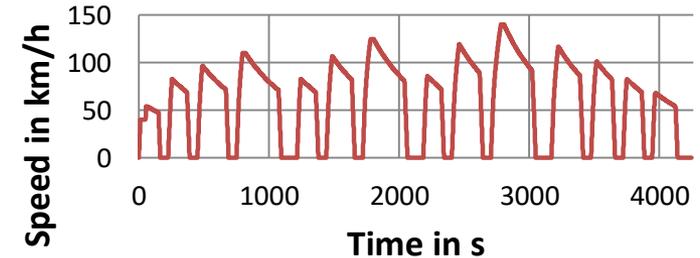
- Automatisierung der Simulationen mithilfe des SARA-Skriptes (Simulation Automation & Result Analysis)
- Vorteile:
  - Beschleunigung häufig wiederkehrender Vorgänge
  - Schnelle Anpassung von Modellen und Modellparametern
  - Parametervariation mit geringem Aufwand
- Modularer Aufbau des Skriptes ermöglicht einfache Änderungen von Parameter für Variationen



# Einsatz des Modells im EU-Projekt FINE-2

- Aufgabe: Ermittlung und Bewertung von Energieeinsparmaßnahmen für HVAC-Systeme
- Definition eines Referenzfahrzeuges und Referenzstrecke (Reg140)
- Ermittlung des notwendigen Leistungs- und Energiebedarfes für die Referenz nach EN 50591
- Definition und Bewertung von Maßnahmen:
  - Einsatz Wärmepumpe
  - Variation Wärmedurchgangskoeff.
  - Ausnutzung der Solltemperaturgrenzen
  - Integration Wärmespeicher

Referenzparameter	Wert
Anzahl Wagen	2
Zuglänge	40 m
Designmasse	90 t (inkl. Batterie)
Anzahl Sitze	100
Traktion Motor Leistung	4 x 320 kW = 1280 kW



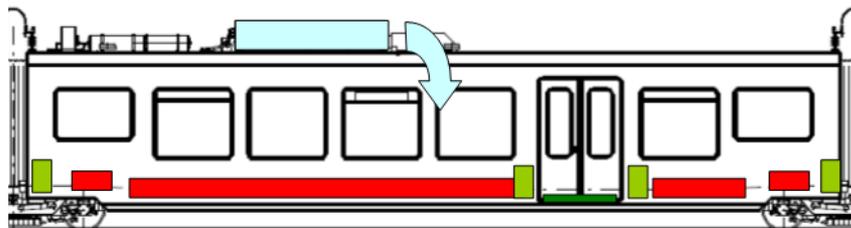
# Ergebnisse: FINE-2

Maßnahme	Gewichteter spezifischer Energiebedarf am DC-Link in kWh/km (EN 50591)	Jährlicher Energiebedarf DC-link in MWh (EN 50591)	Änderung der jährlichen Energiekosten in % (EN 50591)	Änderung des Energiebedarfes am meist kritischen Betriebspunkt OP in %
Referenzszenario	2.47	85.4	-	-
Ersetzen der Wärmepumpe durch Widerstandsheizter	2.60	89.9	+5.36	+17.0
Reduktion des Wärmeübergangs über die Wände	2.45	84.7	-0.76	-0.86
Verbesserung des COP der Wärmepumpe	2.46	85.1	-0.36	-0.84
Ausnutzung der Solltemperaturgrenzen	2.46	84.8	-0.63	-0.24
Integration eines Latentwärmespeichers	2.40	82.8	-3.01	-0.16



# Einsatz des Modells im Projekt MOSENAS

- Aufgabe: Berechnung und Bewertung von verschiedenen HVAC-Energieeinsparmaßnahmen zur Erhöhung der Reichweite eines BEMUS
- Definition des Klimatisierungskonzeptes
- Definition des batterieelektrischen Fahrzeuges
- Definition verschiedener umwelttechnischer Randbedingungen (Temperatur, Fahrgastrate, Sonneneinstrahlung)
- untersuchte Maßnahmen:
  - Freies Kühlen
  - Besetzungsabhängige Frischluftregelung
  - Variation des Wärmedurchgangskoeffizienten
  - Ausnutzung des Solltemperaturbereiches
  - Nutzung einer Wärmepumpe



Konvektoren
Umluftheizung
Schiebetrittheizung
HLK FGR

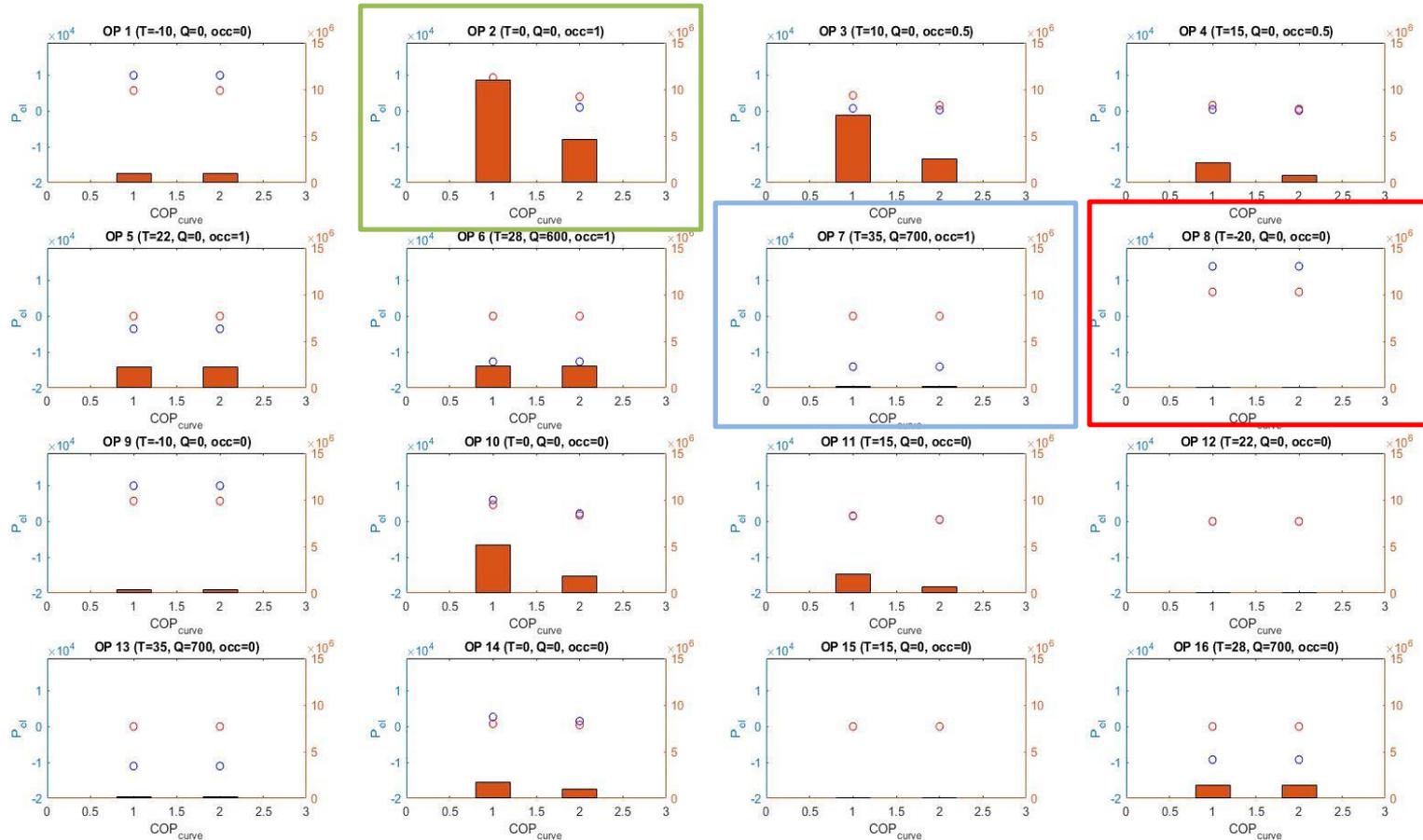


# Betriebspunkte nach der EN50591

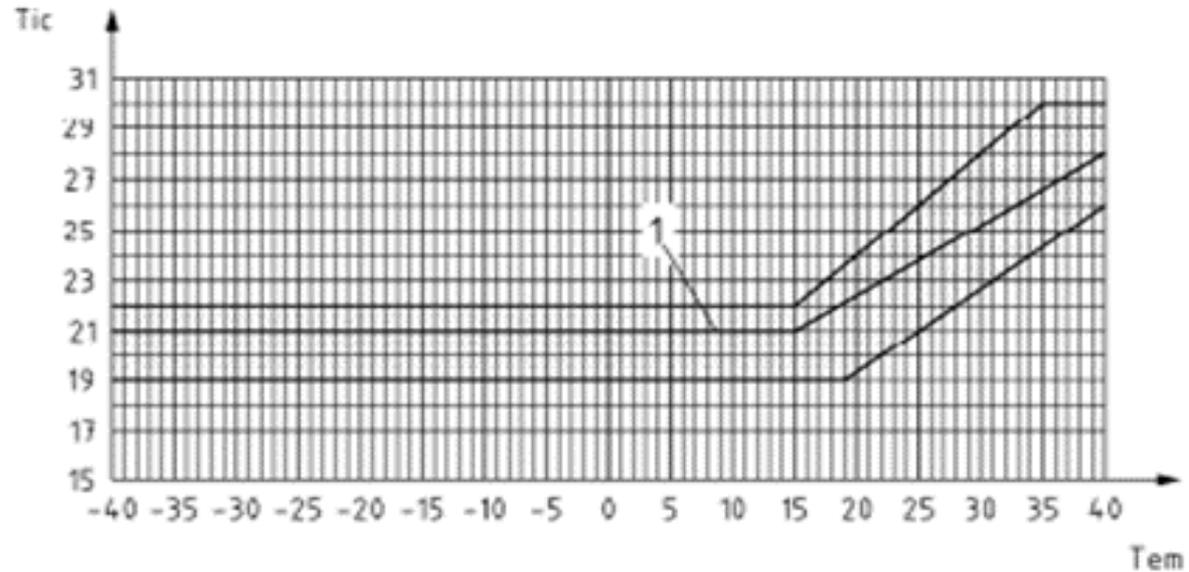
Betriebspunkt (OP)	Außentemperatur $T_a$ in °C	Luftfeuchtigkeit $H_r, amb$ in %	Sonneneinstrahlung in $W/m^2$	Fahrgastrate in %		Betriebspunkt t	Zone I	Zone II	Zone III
1	-10	90	0	0	Verkehrsbetrieb im kommerziellen Einsatz (VikE)	OP1	2	65	372
2	0	90	0	100		OP2	244	945	1 445
3	10	90	0	50		OP3	1 086	1 442	1 198
4	15	90	0	50		OP4	1 163	1 102	889
5	22	80	0	100		OP5	969	627	404
6	28	70	600	100		OP6	695	185	72
7	35	50	700	100		OP7	221	14	NA
						Gesamt VikE	4380	4380	4380
8	-20	90	0	0	Verkehrsbetrieb außerhalb des kommerziellen Einsatzes (VakE)	OP8	NA	0	15
9	-10	90	0	0		OP9	0	21	109
10	0	90	0	0		OP10	175	490	638
11	15	80	0	0		OP11	657	674	539
12	22	80	0	0		OP12	533	257	143
13	35	50	700	0		OP13	95	18	16
						Gesamt VakE	1460	1460	1460
14	0	90	0	0	Abstellbetrieb (Ab)	OP14	175	512	762
15	15	80	0	0		OP15	827	801	629
16	28	50	700	0		OP16	458	147	69
						Gesamt Ab	1460	1460	1460



# Ergebnisse: MOSENAS – Einsatz Wärmepumpe



# Ergebnisse MOSENAS - Solltemperaturkurven



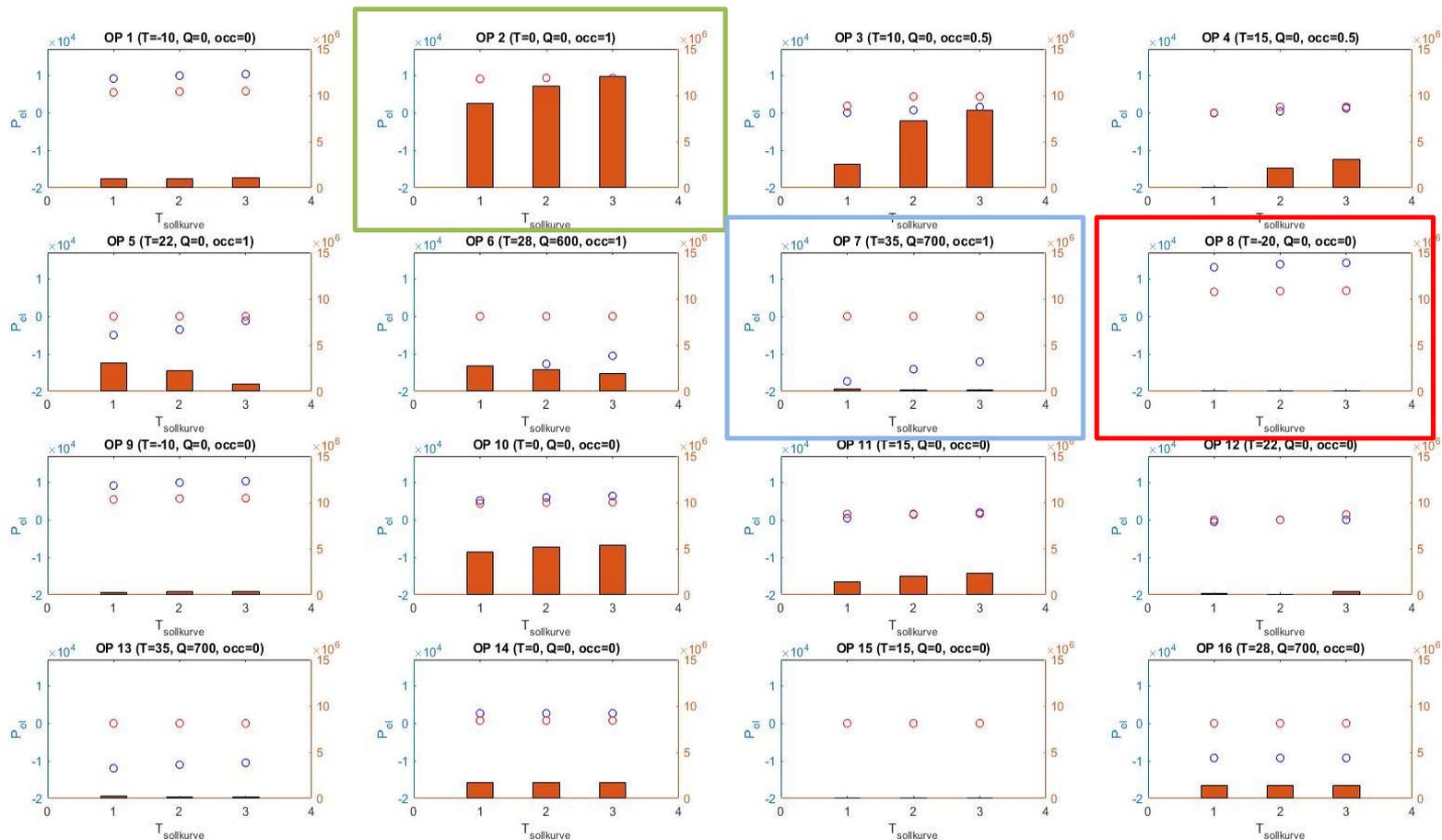
## Legende

- Tem Mittelwert der Außentemperatur, in °C
- Tic Sollwert der Raumtemperatur, in °C
- 1 empfohlene Kurve für Fahrzeuge der Kategorie A

**Bild A.1 — Zulässiger Bereich für die Festlegung der Regelkurve für Fahrzeuge der Kategorie A**

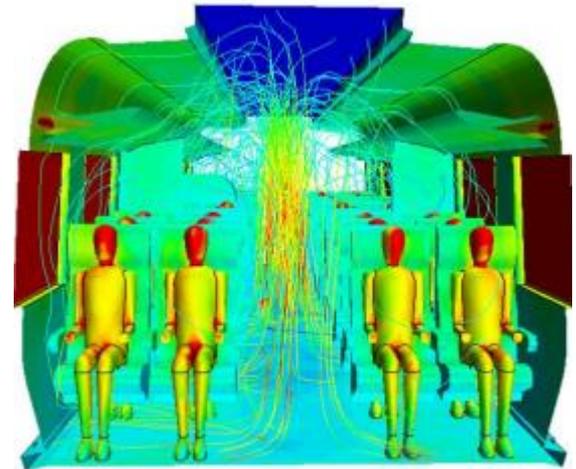


# Ergebnisse: MOSENAS – Solltemperaturkurven



# Ausblick

- **Weiterentwicklung des Modell:**
  - Aufbau eines Türmodells
  - Integration eines physikalischen Klimaanlage-modells
  - Aufteilung des Fahrgastraumes in Schichten
  - Integration einer Metallhydrid-Kälteanlage als FMU und Bewertung gegenüber konventioneller Anlage
  - Strömungssimulation im Fahrgastraum



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



# CODE OF CONDUCT ARTICLE

The Parties and their staff undertake to work together and individually in a cooperative and open manner so as to perform the Project and, overall the Programme, under the following principles:

Commitment to deliver the S2R Programme in order to achieve the S2R objectives as established in the S2R Regulations,  
Efficient implementation of the Project and timely performance of all obligations under the S2R regulatory framework and agreed Decisions (e.g. Governing Board Decisions)

Promptly respond to requests arose during the Project and Programme execution, in particular with an active participation to the works (no sleeping partners).

Carry out the Programme and Project activities using diligent efforts and cooperating in good faith,  
with fundamental ethical principles, in a professional manner, taking necessary steps to avoid conflicts and disputes;  
seeking for consensus in decision making processes or escalate without delay, in accordance with the S2R Regulation, possible risks or issues which would undermine the Project performance and/or present/future Programme activities,  
implementing the best efforts to remove any impediments to consider new opportunities for research and innovations activities,  
subject to the legal obligation established in the present Consortium Agreement and connected Grant Agreement.

The Parties and their staff shall use their best efforts to perform such further acts in order to carry out the Project to accomplish the purposes of the S2R Programme.

