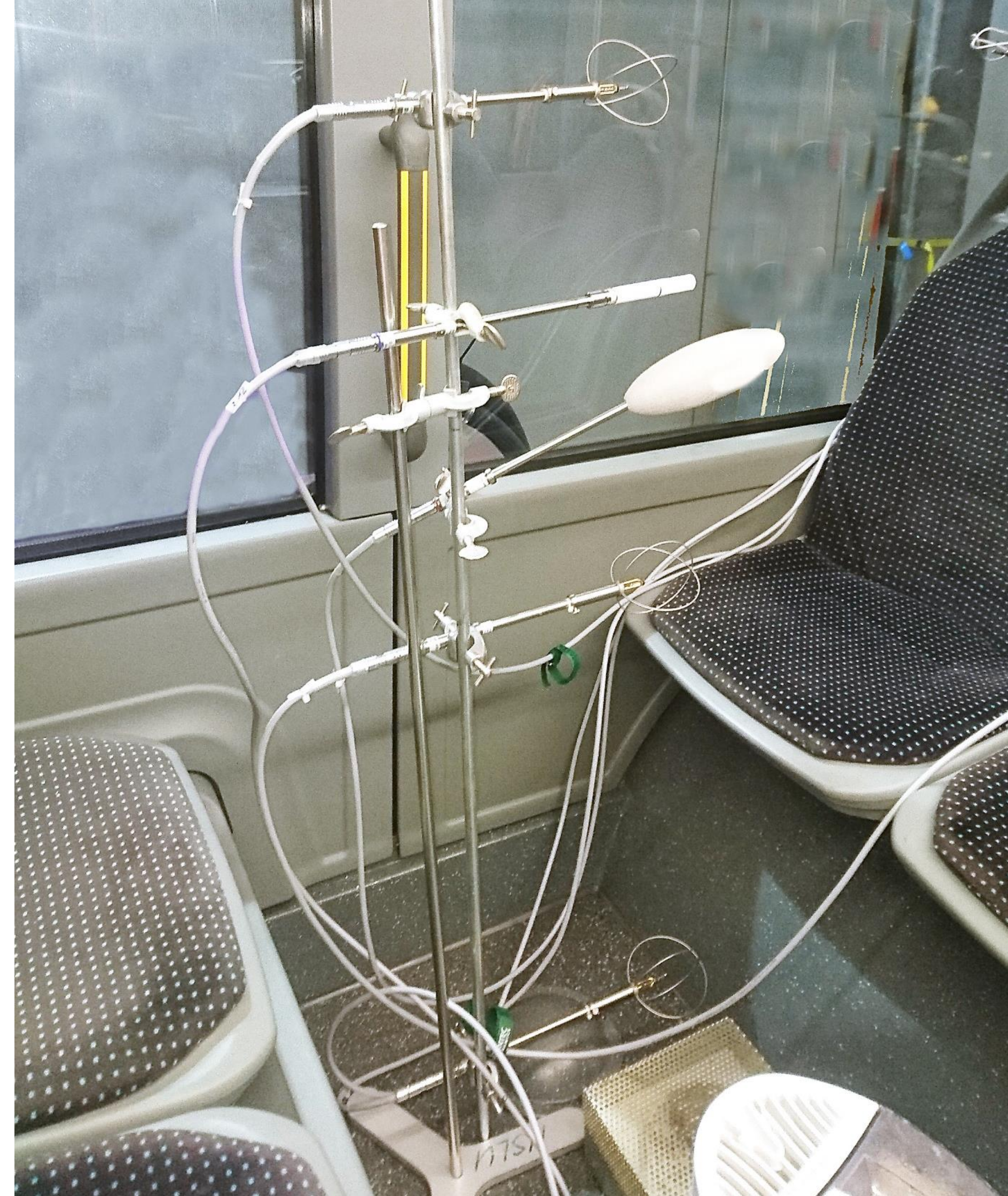


# Komfortmessungen in Linienbussen

VöV Bustagung, Freiburg  
18.5.2022

**Technik & Architektur**  
18. Mai 2022





# Inhalt

## Ausgangslage

- Ausgangslage
- Motivation
- Projektziele

## Methodik

- Grundlagen thermische Behaglichkeit
- Fahrzeuge
- Türöffnungszyklen
- Sollwertkurven
- Behaglichkeitskennfeld
- Messeinrichtung
- Vorbereitung Fahrzeuge
- Messprogramm

## Ergebnisse

- Versuchsverlauf
- Temperaturschichtung
- Behaglichkeitskennfeld
- Sollwertabweichung
- Oberflächentemperaturen
- Luftgeschwindigkeiten
- Komfortbewertung

## Empfehlungen

- Fazit
- Empfehlungen
- Fragen

# Ausgangslage, Ziele

## Ausgangslage

- Innenraumklima ist eine relevante Grösse für die Fahrgäste und somit für die Attraktivität des öV
- Unterschiedliche Normen
  - VDV 236 (Busse)
  - EN 14750-1 (Schienenfahrzeuge)
  - EN ISO 7730 (Behaglichkeit allgemein, Fanger-Theorie)
- Überarbeitung VDV 236
  - Grundlagen der Behaglichkeit
  - Hinweise und Anforderungen an HLK-Anlagen

## Auftrag VöV an die HSLU mit den Zielen

- Überprüfung des Innenraumklimas von zwei Fahrzeugen mit reproduzierbaren Bedingungen => Klimakammer
- Vergleich der Behaglichkeitskriterien mit den Normen: VDV 236, EN 14750-1, EN ISO 7730
- Empfehlungen für Busbetreiber und Ausschreibungen
- Sensibilisierung der Busbetreiber und der Bushersteller für dieses wichtige Thema

# Grundlagen thermische Behaglichkeit

## Thermische Behaglichkeit

- Grundsatz: Energiebilanz Mensch = 0
- Einflüsse:  
Kleidung, Aktivität, Lufttemperatur,  
Luftfeuchtigkeit, Oberflächentemperaturen,  
Strahlung, Luftbewegung, Verdunstung

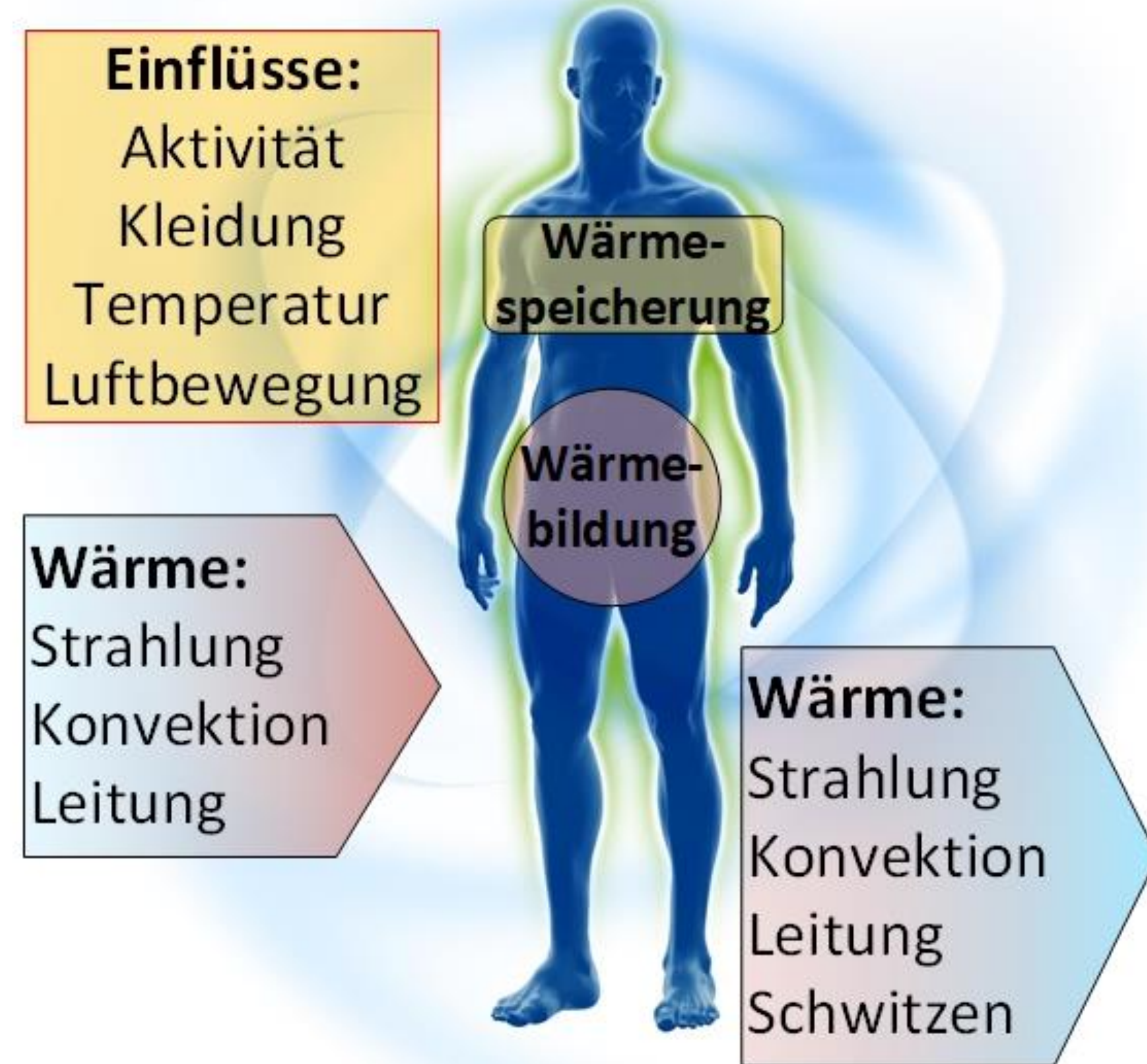
## Weitere Einflüsse (nicht berücksichtigt)

- Gerüche, Lärm, optisch (Blendung)
- Allgemeines Wohlbefinden

## Behaglichkeitsbewertung

- ISO 7730 ermittelte Formel an Personen
- statistische thermische Empfindungsskala PMV
- erwartete mittlere Unzufriedenheitsrate PPD

# Wärmebilanz





# Fahrzeuge

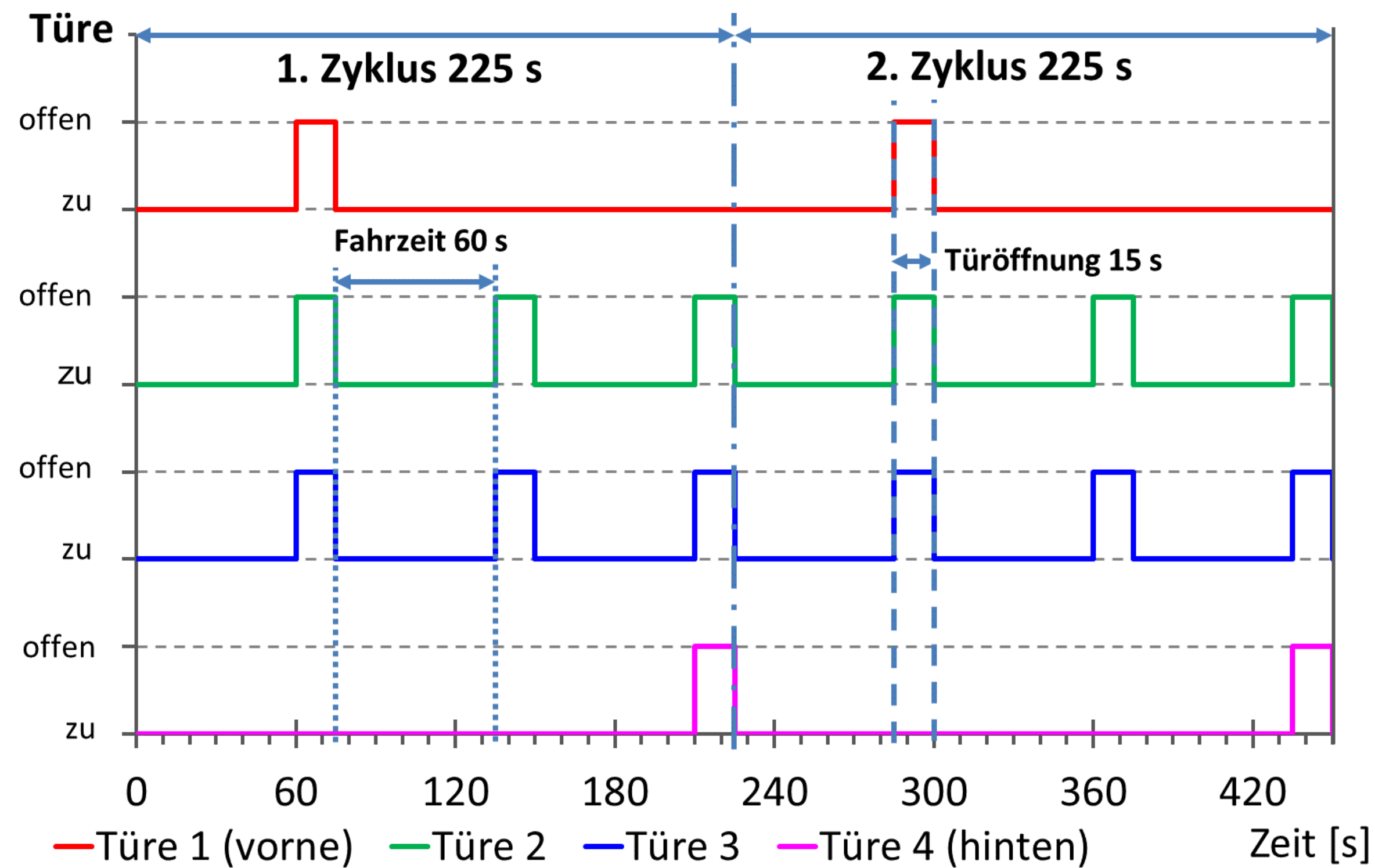
Was	Solaris Urbino 18	Mercedes Benz Citaro
Baujahr	2020	2019
Länge	18 m	12 m
Leergewicht	17.3 t	11.4 t
Sitzplätze / Stehplätze	43 / 106	33 / 57
Anzahl Türen / Grösse (BxH)	4 / 1,2 x 2.0 m	3 / 1,25 x 2.0 m
Leistung Antriebsmotor	270 kW	220 kW
Kühlleistung Klimaanlage	2 x 30 kW	2 x 36 kW
Heizleistung Klimaanlage	2 x 24 kW	2 x 32 kW
Heizleistung Konvektoren	6 kW	5.5 kW
Heizleistung Standheizung	35 kW	35 kW



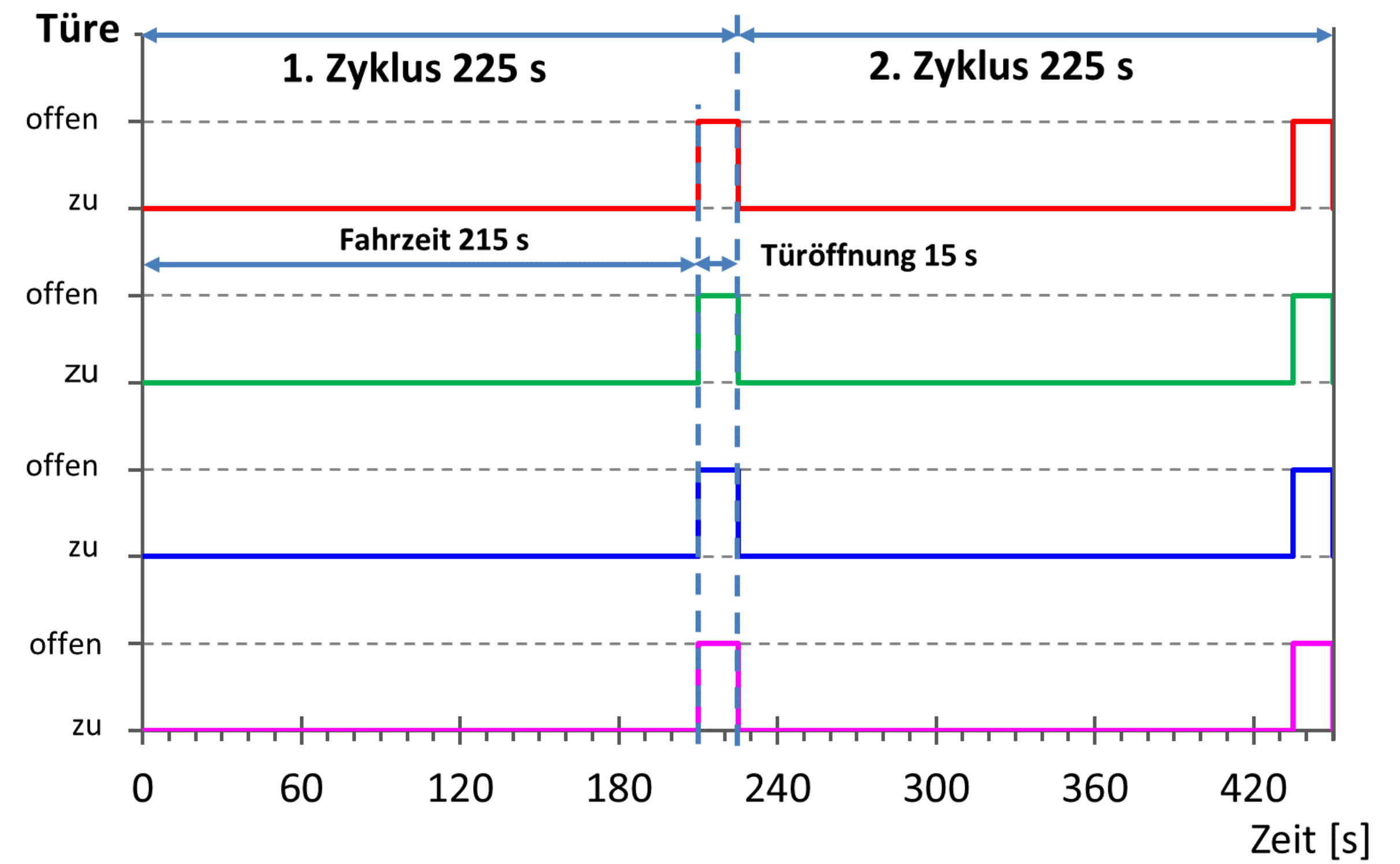


# Türzyklus

## Türzyklus Stadt

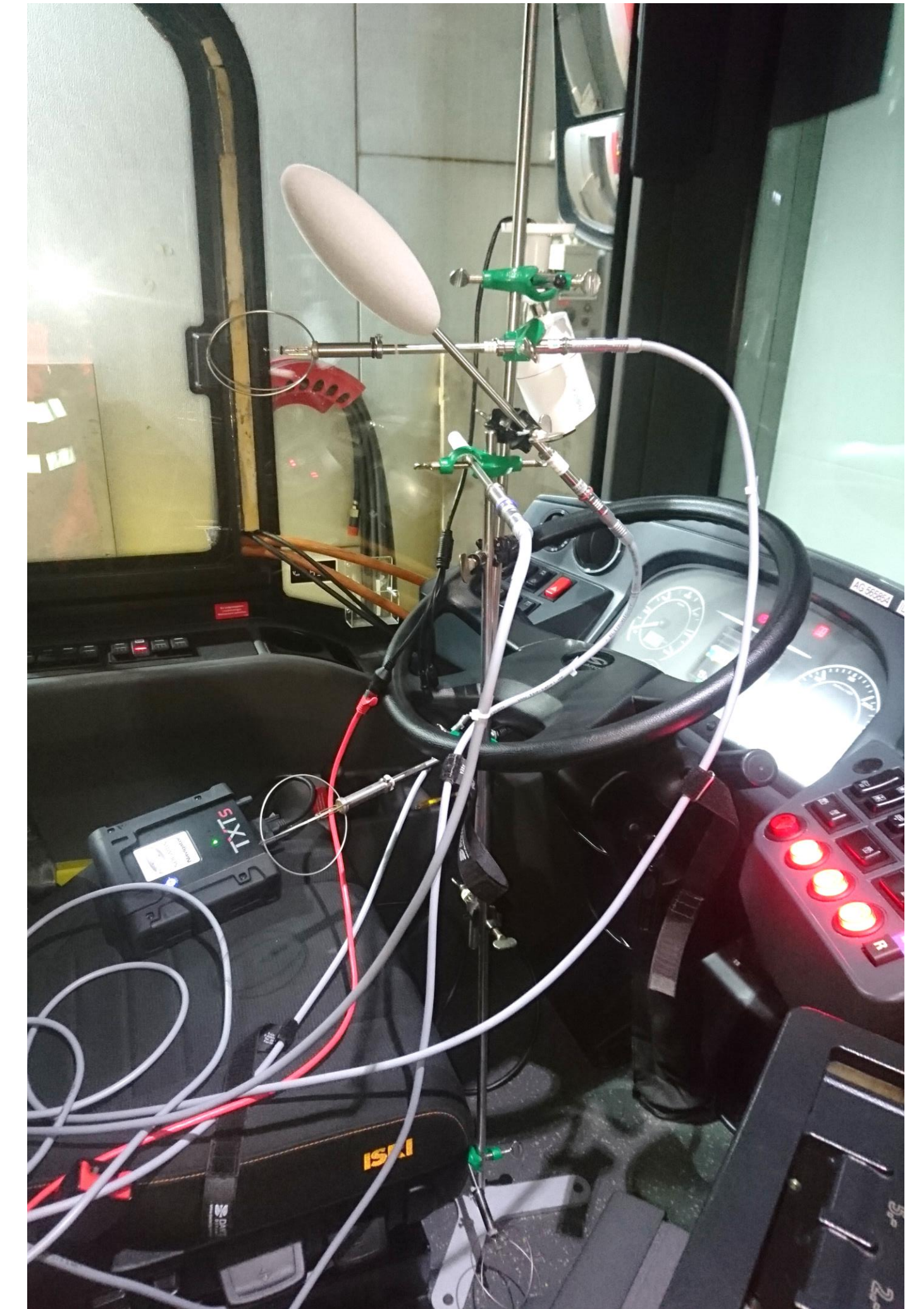
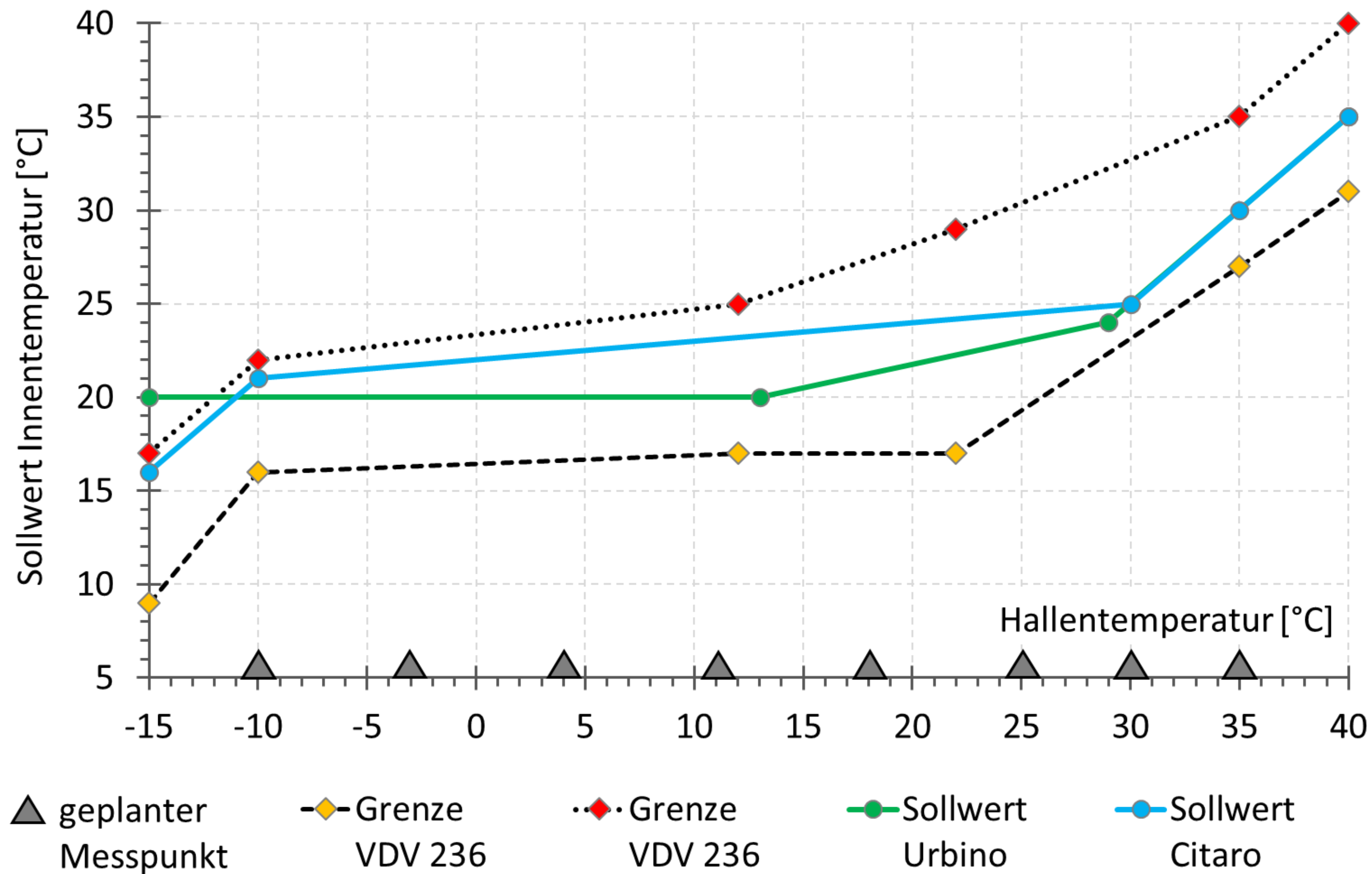


## Türzyklus Land



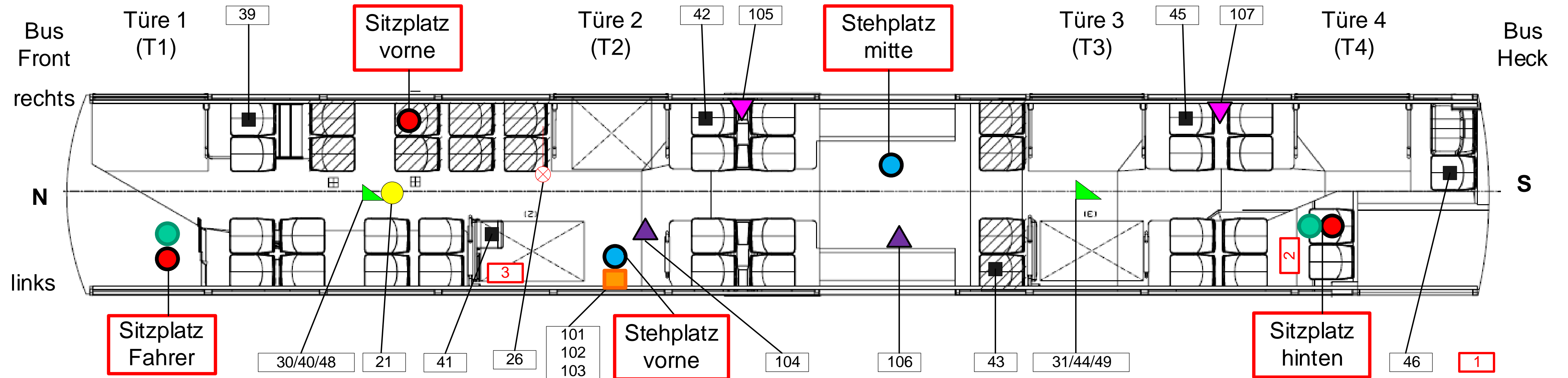


# Sollwertkurven, Behaglichkeitskennfeld VDV 236





# Messeinrichtung Urbino



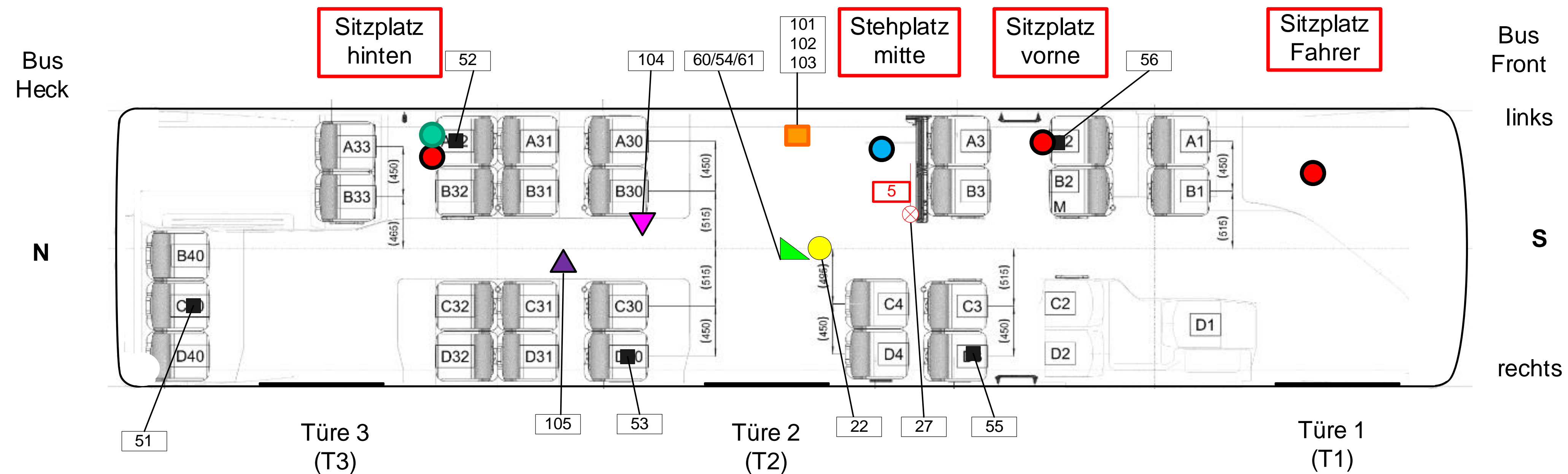
- Lufttemperatur 1.1m ab FOK
- ▲ Lufttemperatur 0.1/1.1/1.7m ab FOK
- ⊗ Innenüberdruck gegenüber Aussenluft
- Lufttemperatur & Luftgeschwindigkeit  
Sitzplatz: 0.1/0.6/1.1m ab FOK

- ▼ Zulufttemperatur
- Luftfeuchtigkeit
- xy Messbox
- Lufttemperatur & Luftgeschwindigkeit  
Stehplatz: 0.1/0.6/1.1/1.8m ab FOK

- ▲ Ablufttemperatur
- Oberflächentemperaturen:  
Boden, Brüstung, Glas
- Operative Temperatur & Rel.  
Feuchte 1.1 m ab FOK



# Messeinrichtung Citaro



- |   |   |   |
|---|---|---|
| ■ Lufttemperatur 1.1m ab FOK  | ▼ Zulufttemperatur  | ▲ Ablufttemperatur                                      |
| ▲ Lufttemperatur 0.1/1.1/1.7m ab FOK                                      | ● Luftfeuchtigkeit  | ■ Oberflächentemperaturen HSLU: Boden, Brüstung, Glas   |
| ⊗ Innenüberdruck gegenüber Aussenluft                                     | xy Messbox  |   |
| ● Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit HSLU Sitzplatz: 0.1/0.6/1.1m ab FOK | ● Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit HSLU Stehplatz: 0.1/1.1/1.8m ab FOK | ● Operative Temperatur & Rel. Feuchte HSLU 1.1 m ab FOK |



# Messeinrichtung

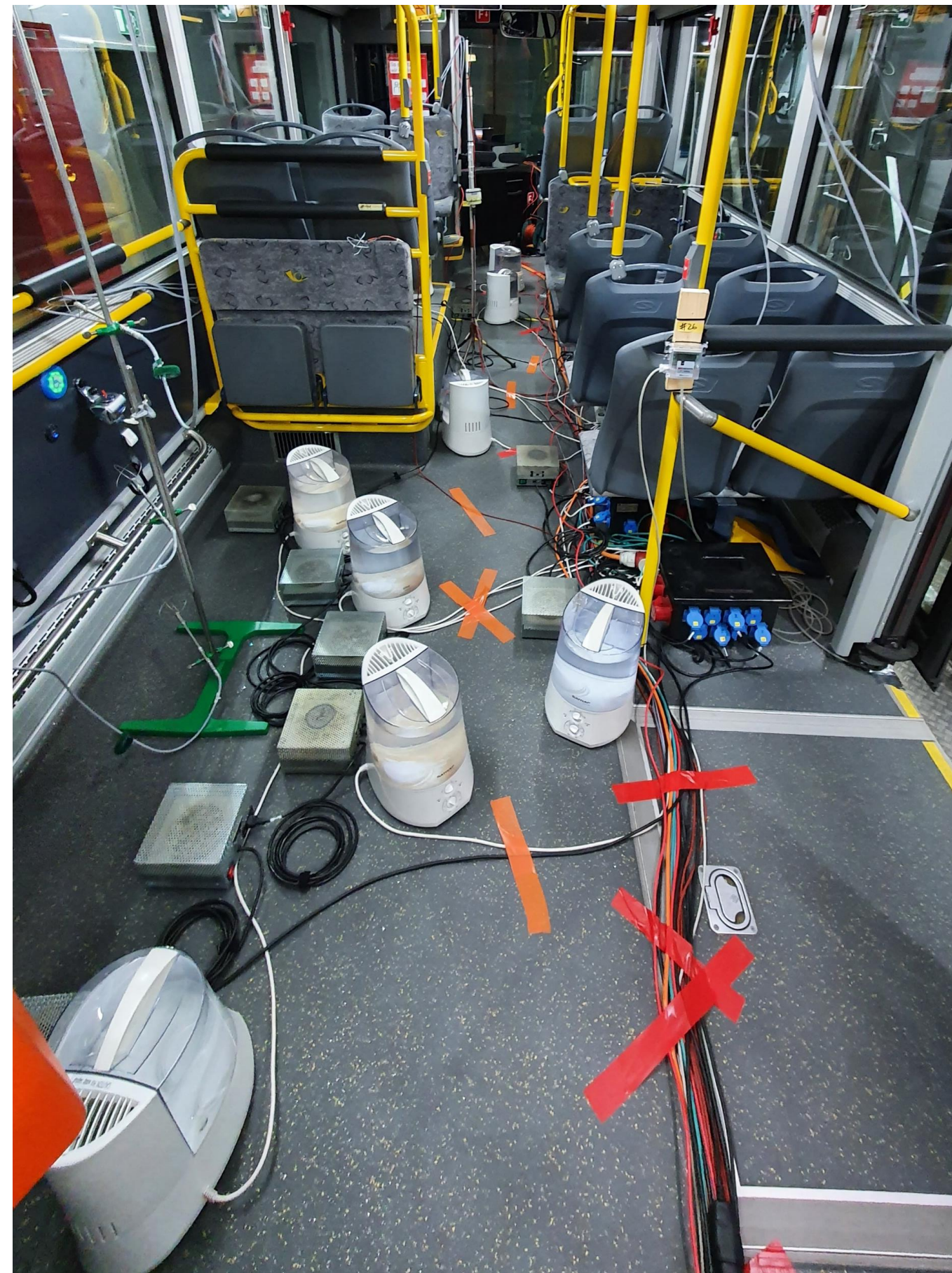
## Sensoren am Fahrerplatz

Urbino



## Personensimulation

Urbino



## Oberflächentemperatur Glas

Citaro





# Vorbereitung der Fahrzeuge

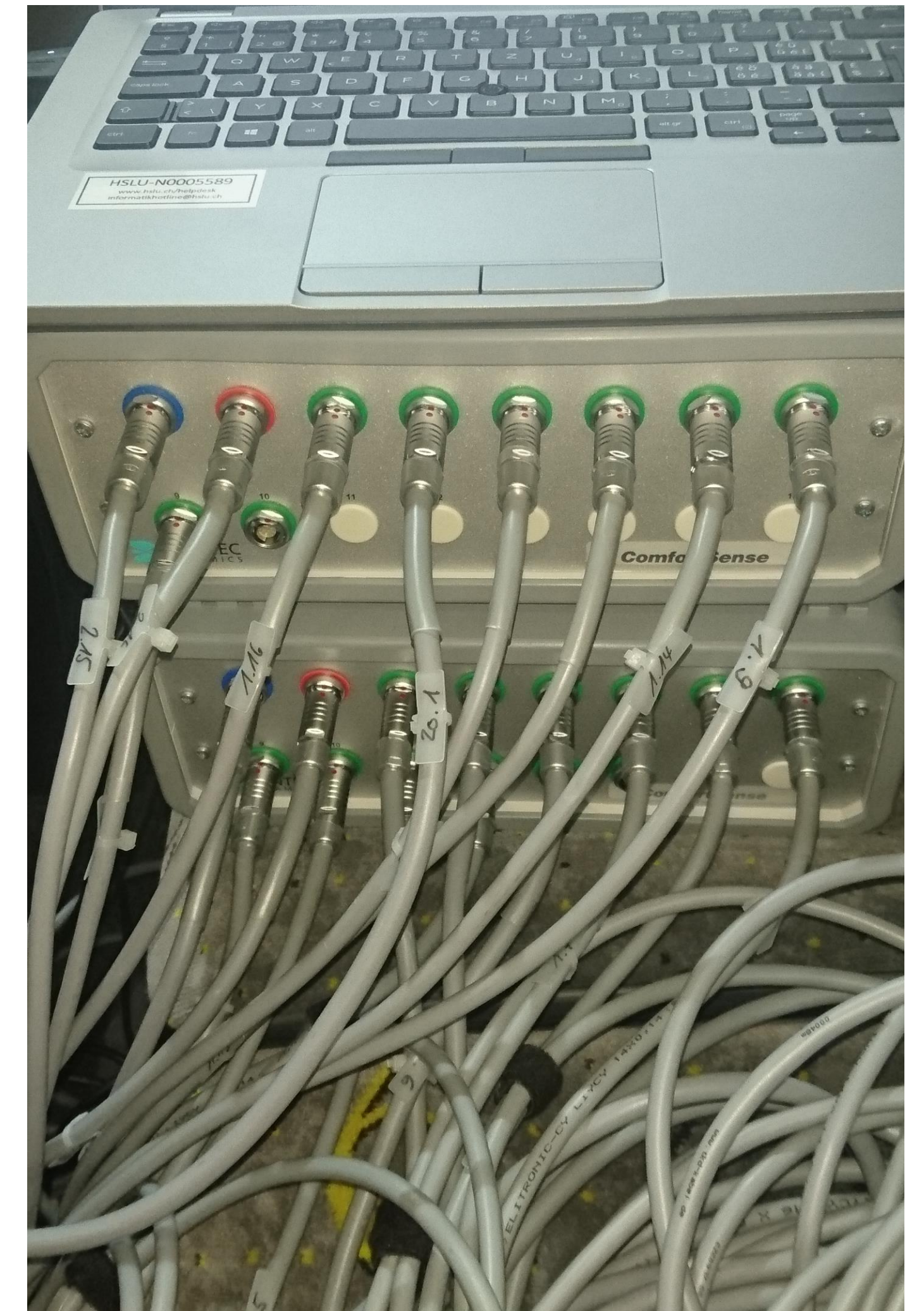
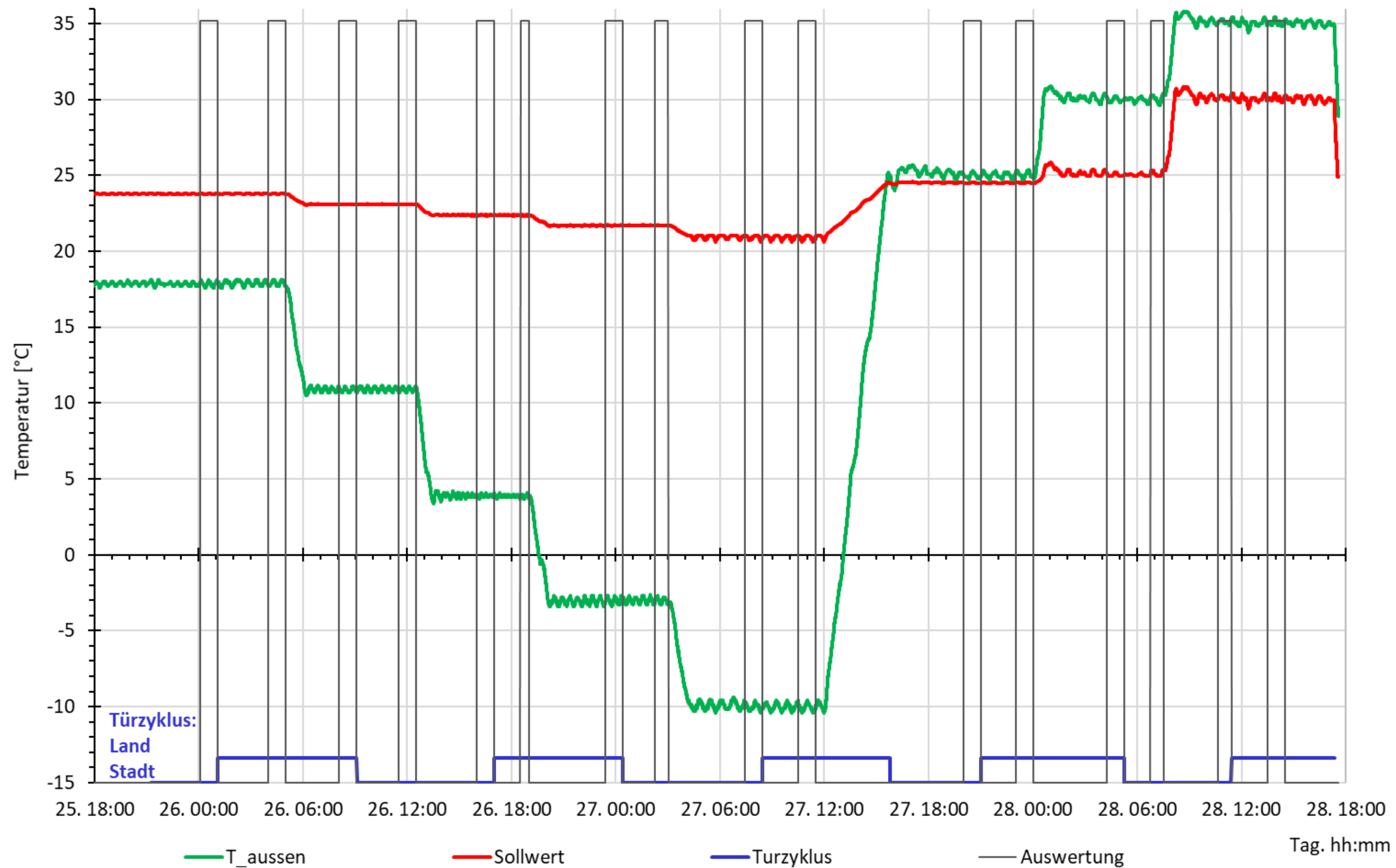
## Randbedingungen

- Messungen mit laufendem Motor
  - gleiche Bedingungen wie im Linienbetrieb
  - Klimageräte im Automatikbetrieb
  - Türsteuerung mit externem Steuergerät
- Im Heizbetrieb zusätzliche Wärmezufuhr in den Wasserkreislauf mit externen Heizgeräten
- Im Kühlbetrieb Motordrehzahl erhöht damit der Klimakompressor genügend Leistung hat
- 24h – Betrieb
  - Videoüberwachung Cockpit (Alarmleuchten)
  - Motordatenüberwachung mit Diagnosegeräten
  - Abgasüberwachung der Klimakammer





## Messprogramm und Auswertung

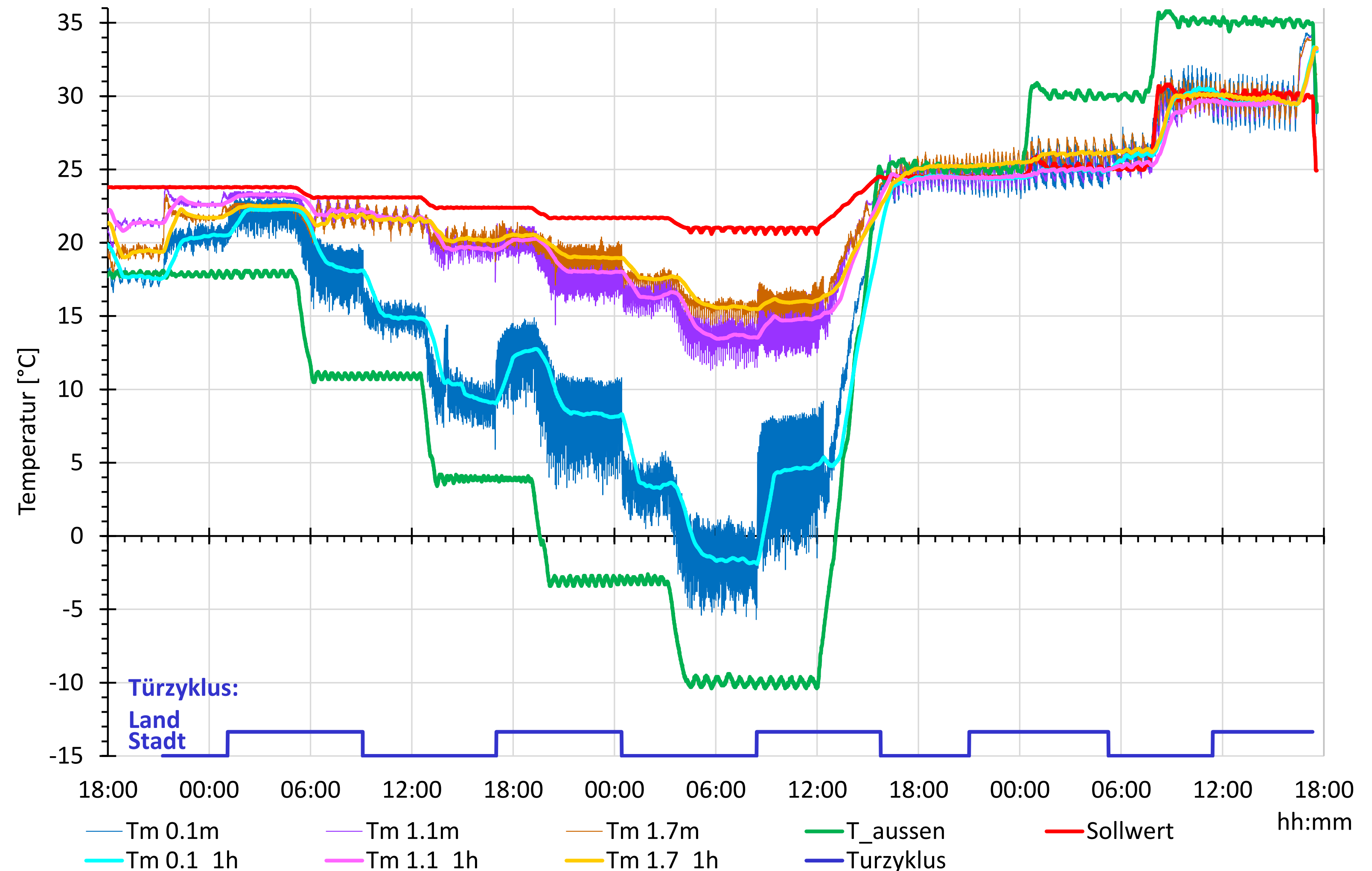




## Versuchsverlauf Citaro (25.5.21 18:00 bis 28.5.21 18:00)

### Messprogramm

- Start mit Heizbetrieb bei 18 °C Aussentemperatur ( $T_{\text{aussen}}$ )
- Im Heizbetrieb mit Zusatzheizung
- Absenkung der Aussentemperatur nach Einschwingen und Messung (ca. 1h)
- Messung pro Aussentemperatur mit einem Türzyklus Land und Stadt
- Kühlbetrieb ab 27.5 12:00 mit erhöhter Drehzahl des Motors (Kompressor)





# Temperaturschichtung im Citaro

## Temperaturschichtung (vertikal)

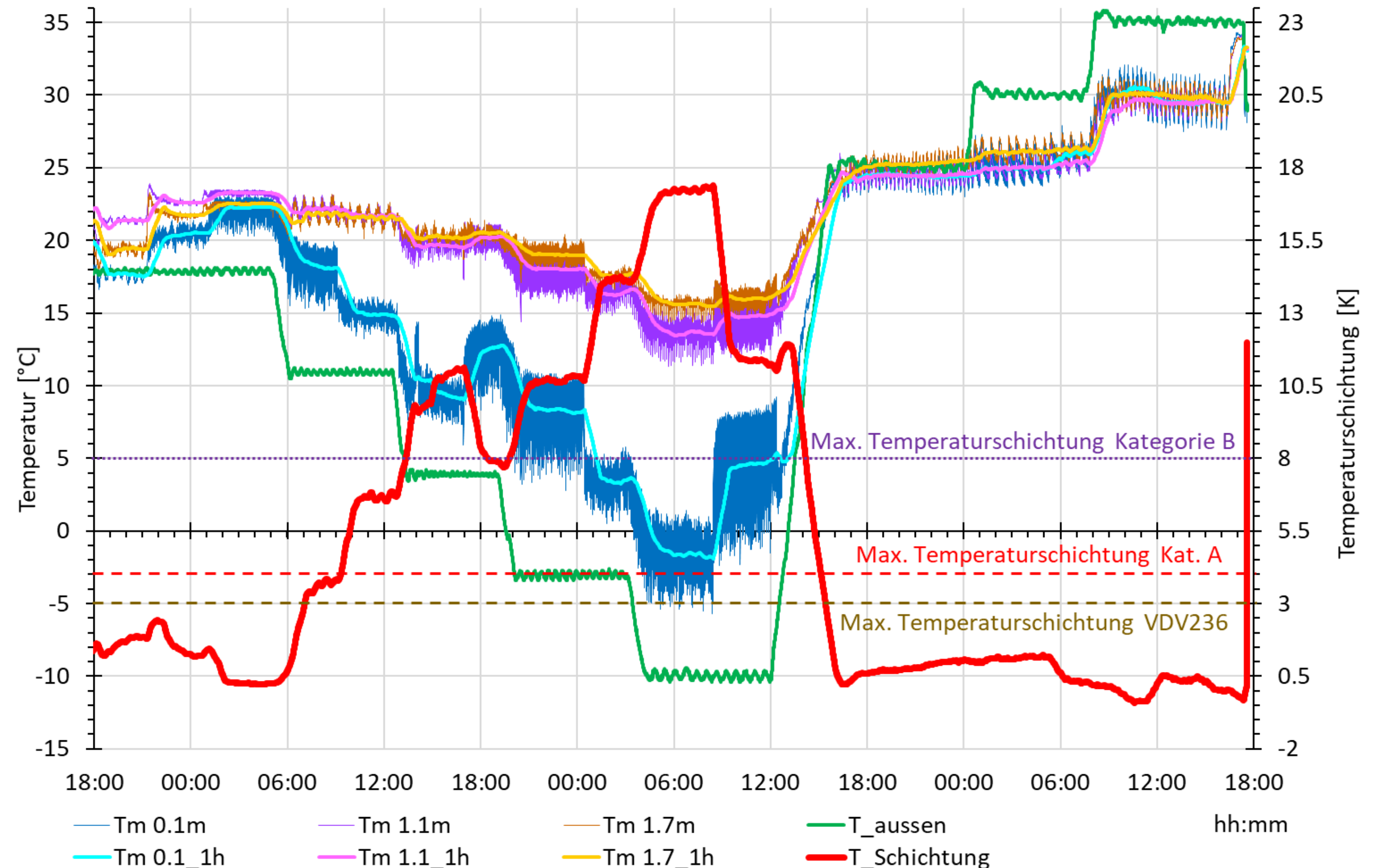
Differenz der mittleren Innentemperatur auf der Höhe 1.7 m minus mittlere Innentemperatur auf der Höhe 0.1 m

### Kühlbetrieb

- Kleine Temperaturschichtung ( $< 1$  K)
- Alle Grenzwerte gut eingehalten

### Heizbetrieb

- Grosse Temperaturschichtung bei Aussentemperaturen  $< 0$  °C
- Grenzwerte EN 14750 (Kat. A, B) sowie VDV 236 werden überschritten
- Bei Auslegung ( $-20$  °C) werden grössere Abweichungen erwartet





# Behaglichkeitskennfeld und Sollwertabweichung nach VDV 236 im Citaro

## Behaglichkeitskennfeld

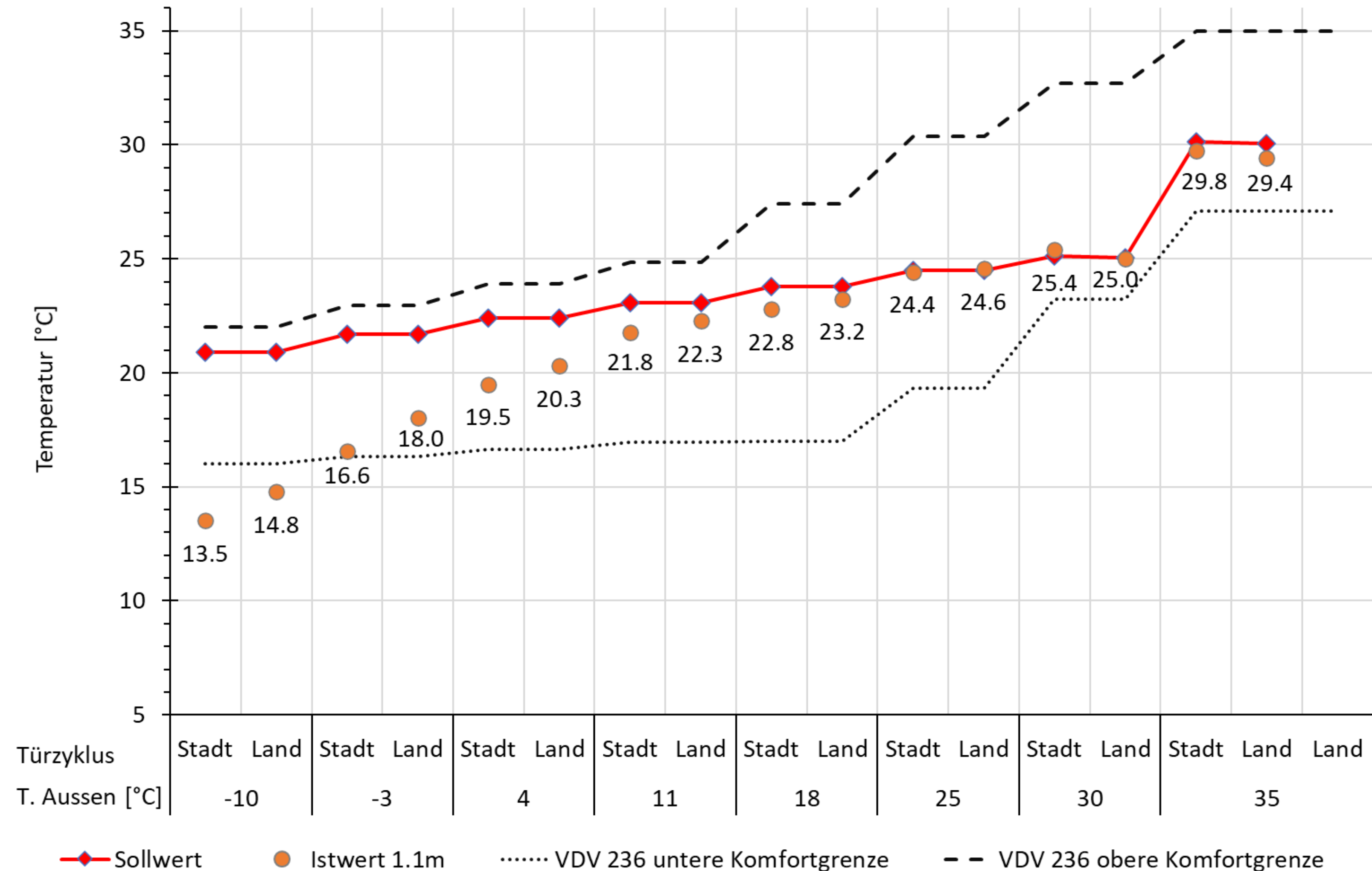
Beurteilung der mittleren Innentemperatur auf der Höhe 1.1 m mit einer oberen und unteren Komfortgrenze in Abhängigkeit der Aussen-temperatur

## Kühlbetrieb

- Alle Komfortgrenzen eingehalten

## Heizbetrieb

- Untere Komfortgrenze bei Aussen-temperaturen  $< -3$  °C verletzt
- Im Stadtzyklus grössere Abweichungen als im Landzyklus





# Sollwertabweichung nach EN 1750 im Citaro

## Sollwertabweichung

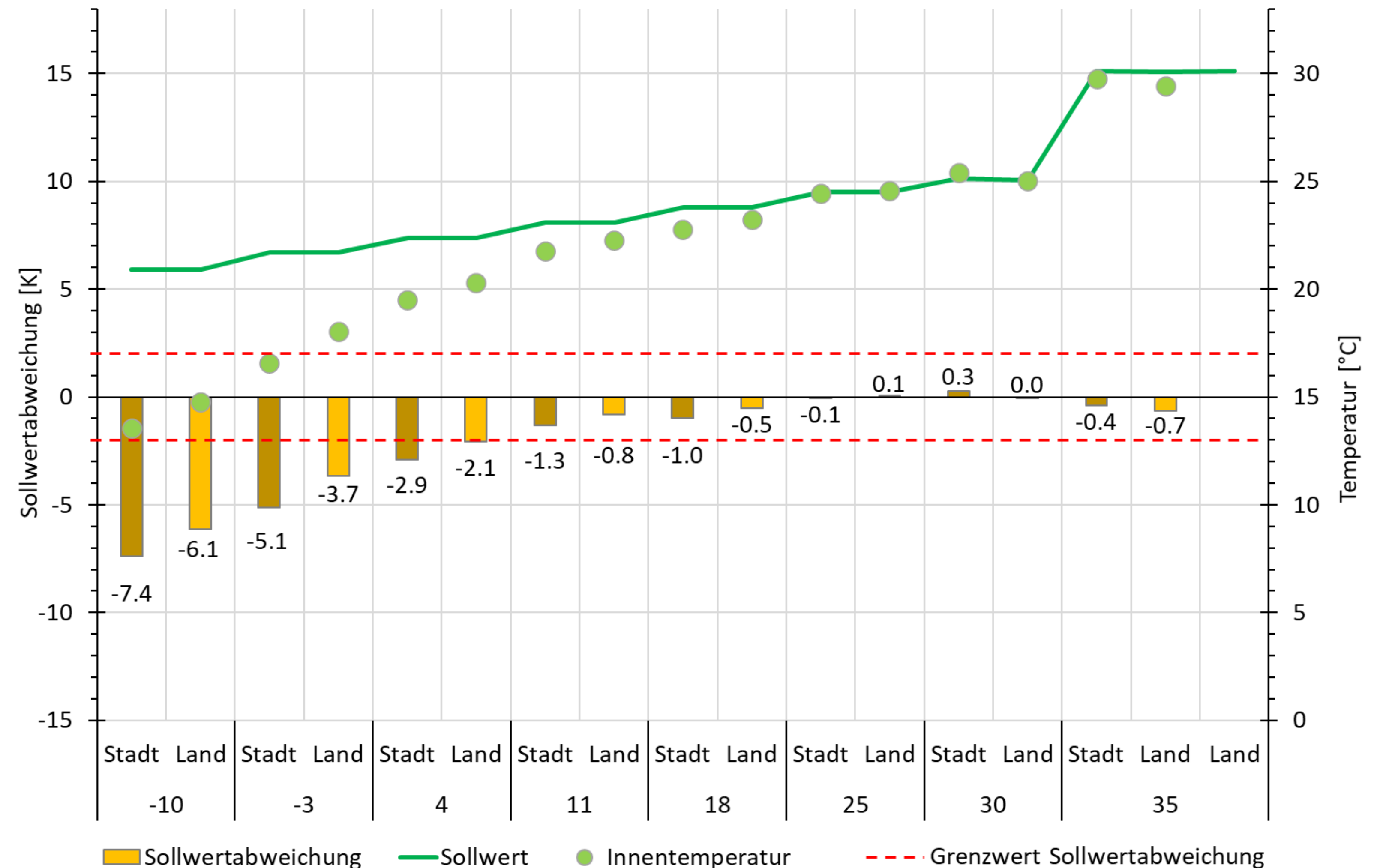
Temperaturdifferenz der mittleren Innentemperatur auf 1.1 m Höhe zum Sollwert.

## Kühlbetrieb

- Die Sollwertabweichungen sind klein, der Grenzwert 2 K wird eingehalten

## Heizbetrieb

- Die Sollwertabweichungen steigen mit abnehmender Aussentemperatur
- Bei Aussentemperaturen  $< 4\text{ °C}$  wird der Grenzwert überschritten
- Im Stadtzyklus grössere Abweichungen als im Landzyklus





# Temperaturdifferenzen von Oberflächen im Citaro

## Temperaturdifferenz von Oberflächen

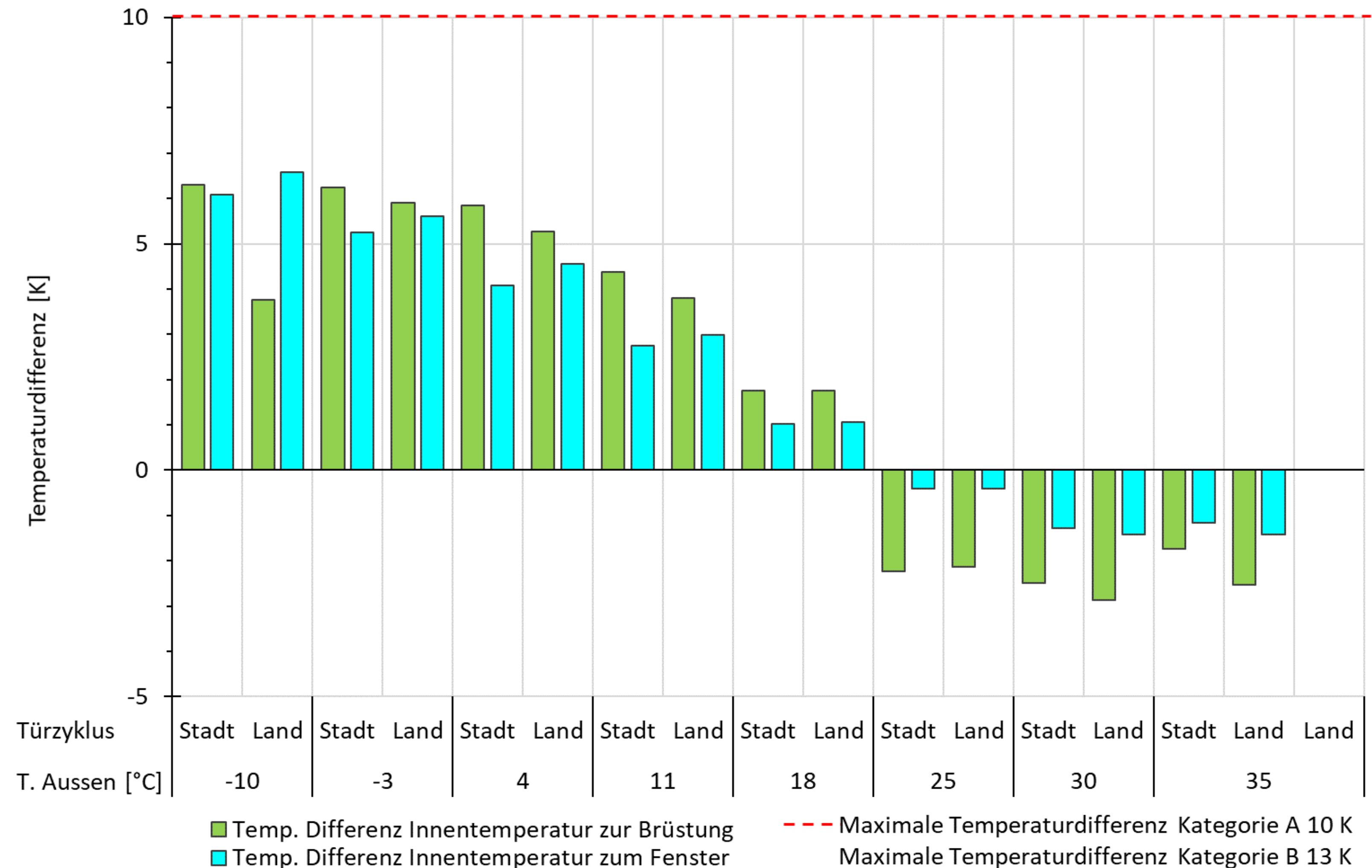
Temperaturdifferenz der mittleren Innentemperatur auf 1.1 m Höhe zur Oberflächentemperatur

### Kühlbetrieb

- Kleine Temperaturdifferenzen, Grenzwert Kat. A 10 K eingehalten
- Im Stadtzyklus ist die Differenz grösser als im Landzyklus

### Heizbetrieb

- Grössere Temperaturdifferenzen als im Kühlbetrieb
- Mit abnehmender Aussentemperatur steigt die Temperaturdifferenz an
- Grenzwerte werden eingehalten





# Oberflächentemperaturen im Citaro und Urbino

## Oberflächentemperatur

Bodentemperatur an der Oberfläche

Die minimale Bodentemperatur ist aus Sicherheitsgründen mindestens +3 °C

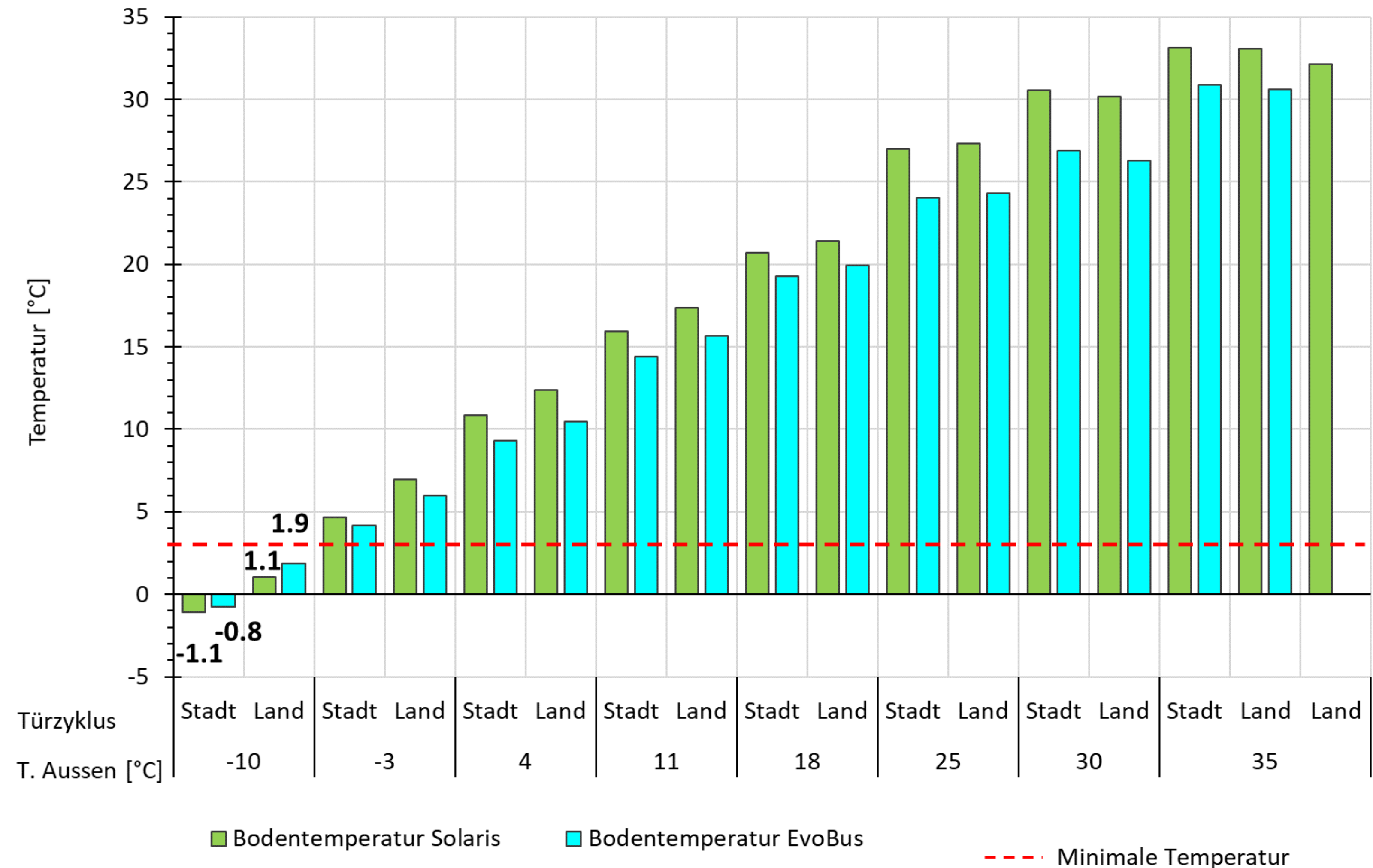
=> Verhinderung von Eisglätte

## Kühlbetrieb

- Nicht kritisch

## Heizbetrieb

- Bei Aussentemperaturen < -10 °C wird der Grenzwert unterschritten
- Negative Bodentemperatur bei Aussentemperaturen < -10 °C  
=> Gefahr von Eisglätte  
=> Passagiere können ausrutschen





# Luftgeschwindigkeit am Sitzplatz hinten im Citaro

## Luftgeschwindigkeit

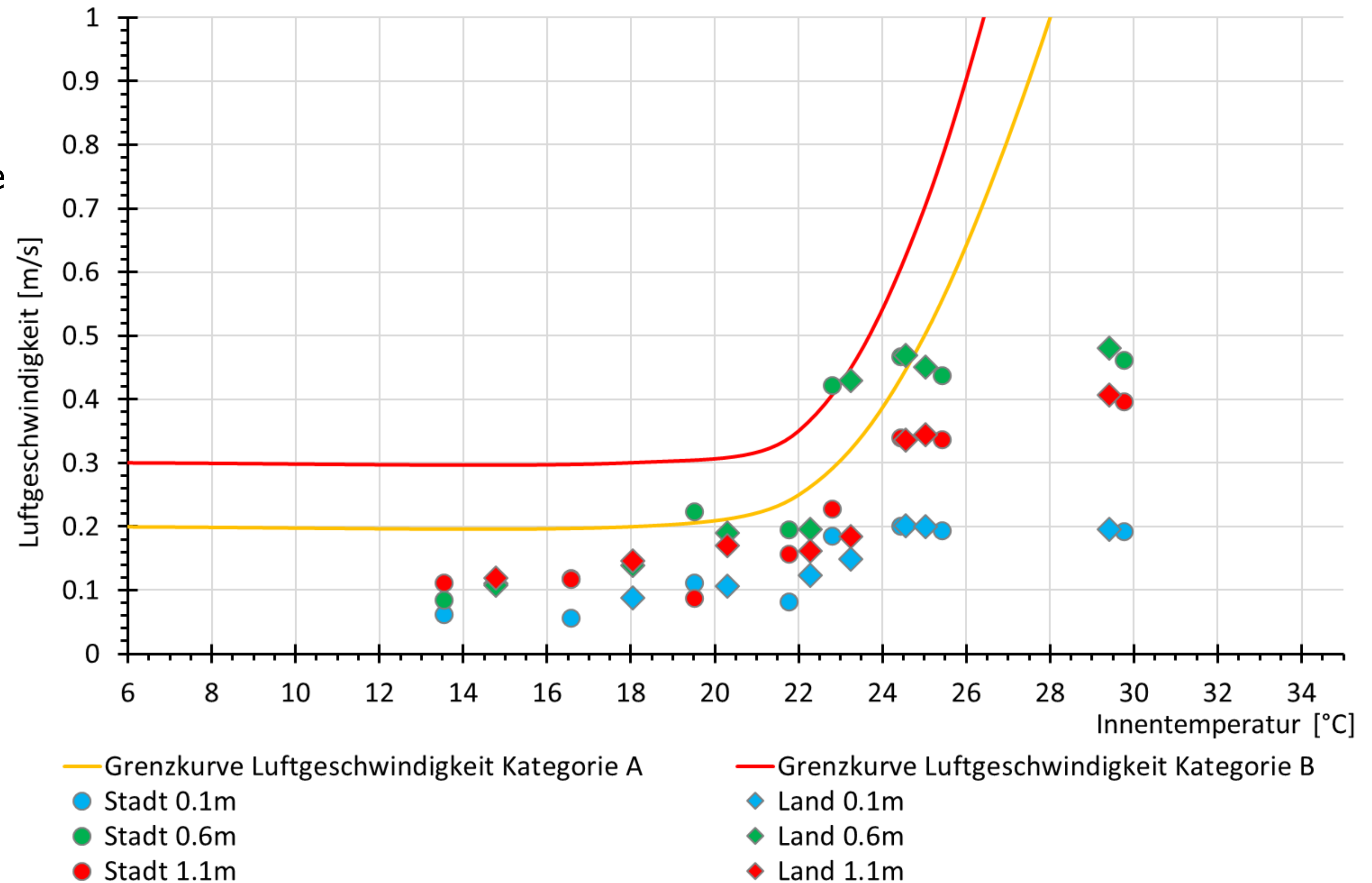
(Kriterium zur Beurteilung von Zugluft)  
Die mittlere Luftgeschwindigkeit wurde im Citaro auf Fusshöhe 0.1m, Kniehöhe 0.6 m und Kopfhöhe 1.1 m gemessen. Die Innentemperatur wurde auf der Höhe 1.1 m gemessen.

## Kühlbetrieb

- Bei Innentemperaturen von 22 °C bis 26 °C wurden auf der Höhe 0.6 m die höchsten Werte gemessen. Grenzwerte werden teils leicht überschritten.
- Begründung: Umluftanteil ist grösser

## Heizbetrieb

- Bei Innentemperaturen < 18 °C wird der Grenzwert immer eingehalten





# Komfortbewertung nach EN ISO 7730 im Citaro

## ISO 7730

- Bewertungsverfahren thermische Behaglichkeit für Innenräume

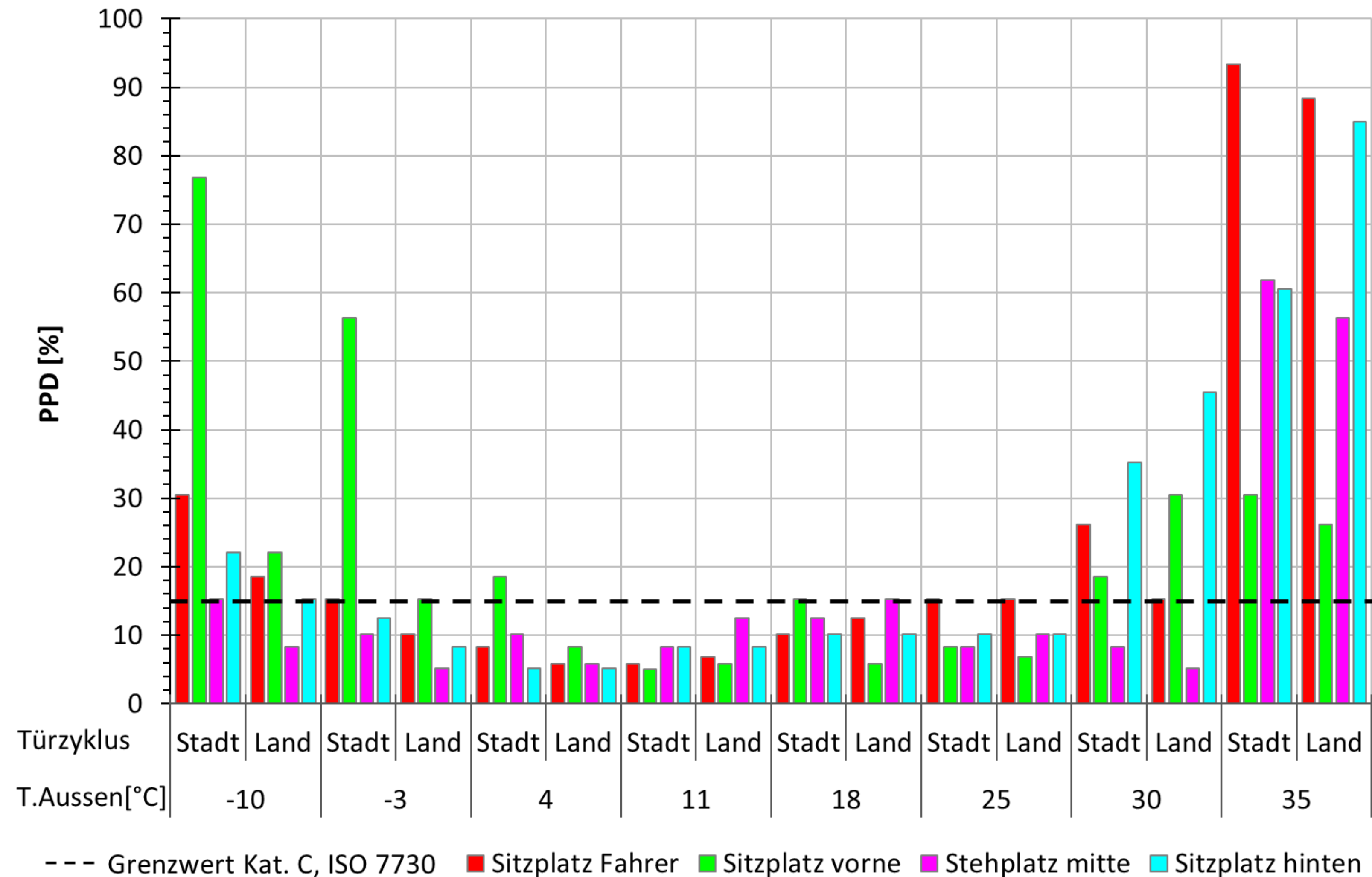
## Unterschied Gebäude zum öV

- Bekleidung  
=> adäquaten Bekleidung wie im Aussenbereich (Annahme)
- Kurze Aufenthaltsdauer  
=> Bewertung nach Kategorie C

## Auswertung PPD:

(mittlere Unzufriedenheitsrate)

- Grenzwert PPD wird im Bereich 4 - 25 °C eingehalten
- Im Stadtzyklus mehr Unzufriedene
- Sitzplatz Fahrer hat höchsten PPD-Wert

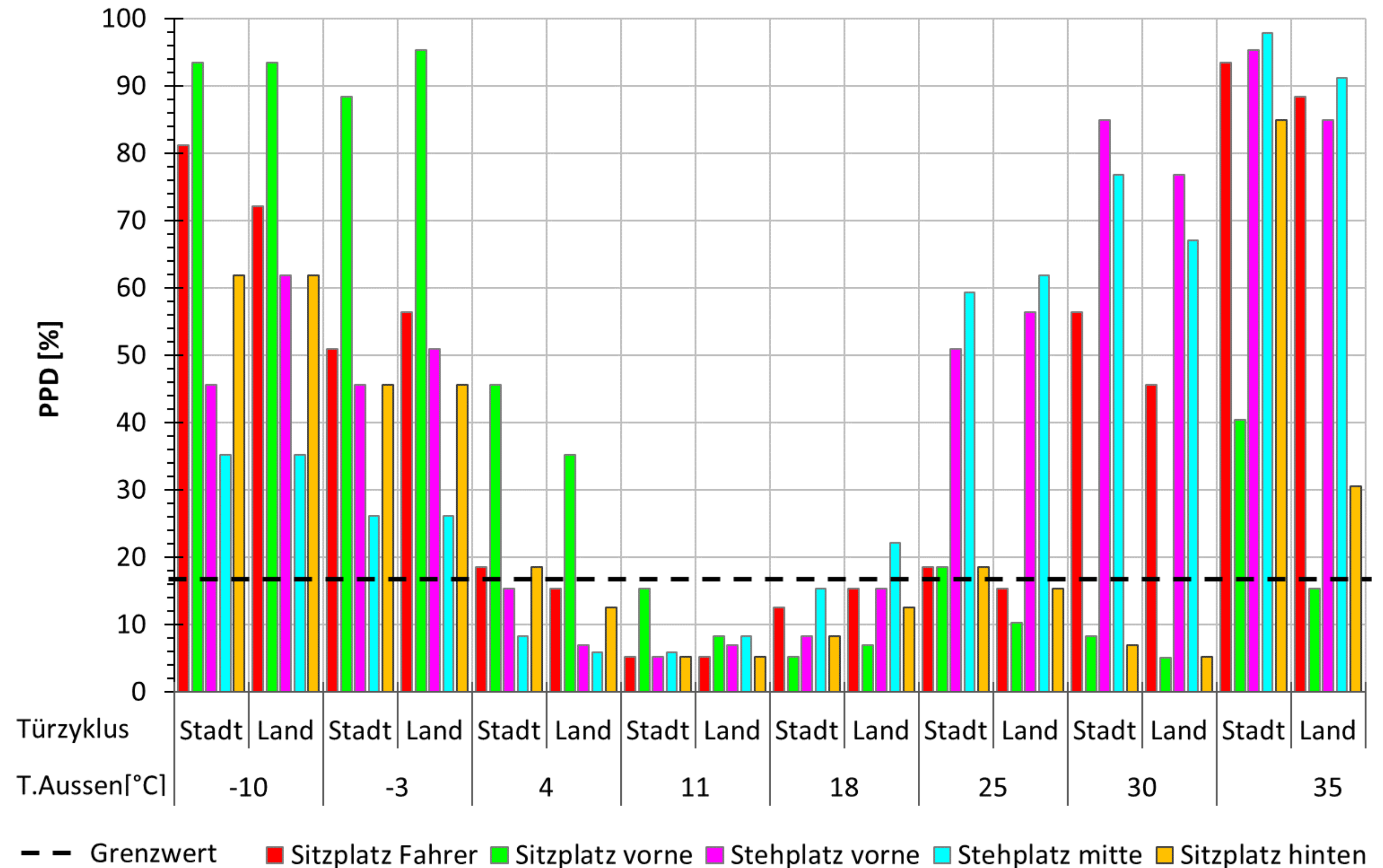




# Interpretation der Ergebnisse im Urbino

## Fehlerhafte Parametrierung HLK

- Es wurde nach den Messungen festgestellt, dass beim Urbino die Parametrierung der HLK-Steuerung fehlerhaft war.
- Das Bild zeigt den PPD-Wert des Urbino mit fehlerhafter Parametrierung.
- Deshalb wurden keine weiteren Ergebnisse des Urbino gezeigt, da keine detaillierten Angaben zur Auswirkung des Fehlers möglich sind.





## Fazit

- Die minimalen Luftgeschwindigkeiten wurden mehrheitlich gut eingehalten
- Erhebliche Abweichungen der Innentemperatur zum Sollwert
- Temperaturschichtung im Heizbetrieb sehr hoch => Grenzwerte werden nicht eingehalten
- Temperaturschichtung im Kühlbetrieb gering
- Minimale Bodentemperatur + 3 °C wurde unterschritten => Gefahr von Eisglätte
- Behaglichkeitskennwerte der VDV 236 und der EN 14750 werden häufig verletzt





## Empfehlungen Komfortverbesserungen

### Reduktion Temperaturschichtung

- Einbau von Türluftschleiern
- Anpassung der Luftführung, Luftgeschwindigkeit

### Reduktion Sollwertabweichungen

- Optimalere Platzierung des Temperatursensors (auf Kopfhöhe 1.1 m)
- Einbau von Türluftschleiern
- Dämmung der Fahrzeughülle

### Oberflächentemperaturen im Winter erhöhen

- Dämmung des Bodens verbessern
- Dämmung der Seitenwände verbessern
- Boden temperieren und Dämmung verbessern

### Anpassungen der Normen

- Türöffnungen bei Komfortmessungen berücksichtigen
- Anwendung der EN 14750 auf Busse erweitern
- Standardisieren der Sollwertkurve

### Abnahmetests

- Definition von Abnahmetests (Typprüfungen)





# DANKE

**Hochschule Luzern**  
**Technik & Architektur**  
Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE  
**Franz Sidler**  
Senior Wissenschaftlicher Mitarbeiter

T direkt +41 41 349 33 77  
franz.sidler@hslu.ch

