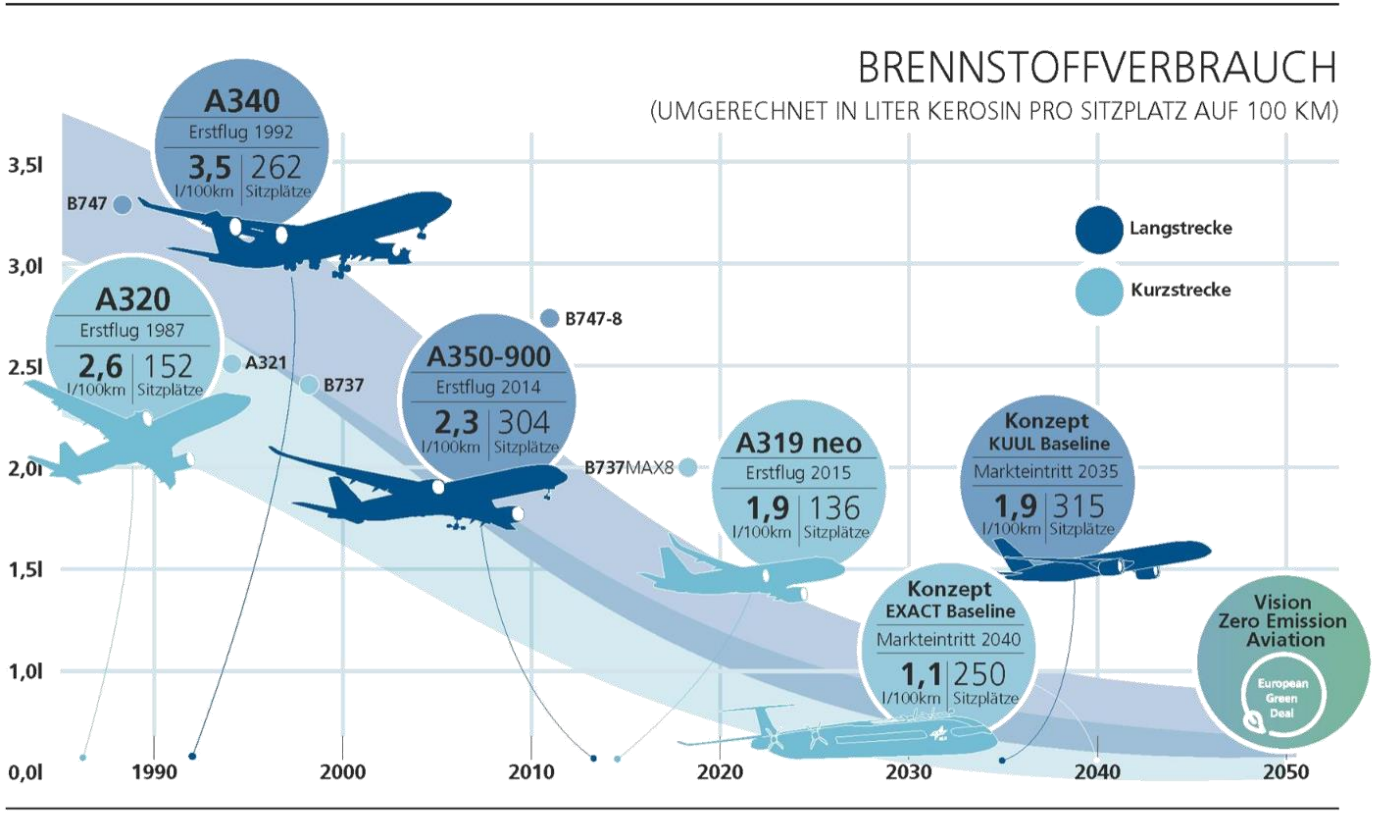
INCREASED PASSENGER DENSITY IN A LONG-RANGE AIRCRAFT CABIN MOCK-UP AT MIXING VENTILATION

Tobias Dehne, André Volkmann, Daniel Schmeling

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik (AS)

Motivation

- **Hoher Brennstoffverbrauch** pro Sitzkilometer für **komfortorientierte Langstreckenkonfigurationen**
- **Geringer Brennstoffverbrauch** pro Sitzkilometer für Kurzstreckenkonfigurationen mit **hoher Passagierdichte**
- Reduktion der Gesamtmasse um 10% für **energieeffizienten Flugzeugentwurf**



Arcadia - Automated and Reconfigurable Cabin Development Process in Aircraft design

Beteiligte Institute:

AS – Aerodynamik und Strömungstechnik
BT – Bauwesen und Strukturtechnologie
ME – Luft- und Raumfahrtmedizin
SL – Systemarchitekturen in der Luftfahrt
TS – Verkehrssystemtechnik

Zielsetzung

Übergeordnetes Projektziel:

- Zusammenführung von Flugzeugentwurf (EXACT) und Kabinendesign (InDiCaD) zum ganzheitlichen Entwurf des digitalen Produkts „Flugzeugkabine“ für klimaneutrales Fliegen

Beitrag zur Luftfahrtstrategie des DLR zum European Green Deal:

- Entwicklung energieeffizienter und flexibel konfigurierbarer **Kabinen- und Frachtsysteme**

Hauptziele:

- Bereitstellung neuer Kabinenkonzepte
  → Erhöhter Passagierdichte = gesteigerte Energieeffizienz
- Schnittstellen und Leistungsanforderungen der **Kabinenbelüftung**

→ Experimentelle Untersuchung erhöhter Passagierdichten auf den thermischen Komfort sowie energierelevante Parameter

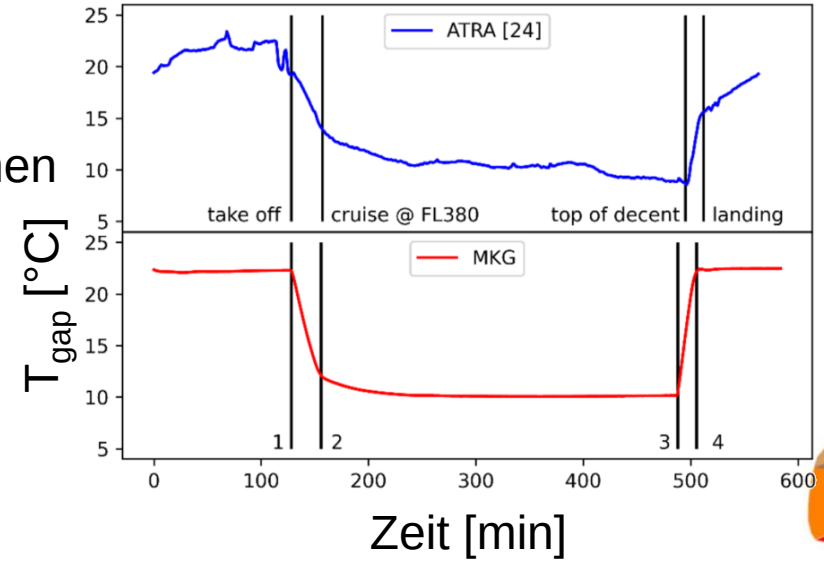
Modulares Kabinen-Mock-Up Göttingen (MKG)

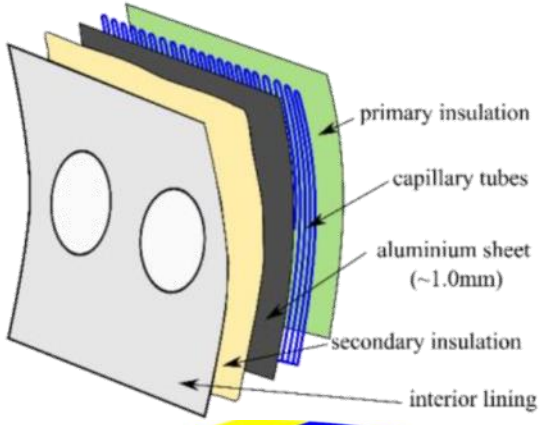
Fakten

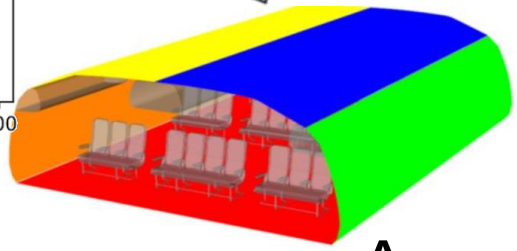
- Testanlage in Originalgröße **(Maßstab 1:1)**
  - Raumvolumen: 126,7 m^3
- 10 Sitzreihen in 3-4-3-Sitzkonfiguration
  - Gesamtkapazität: **100 PAX**
- Innenausstattung (Paneele, Gepäckfächer, Sitze) → **echte Flugzeugteile**
- Realistische **thermische Eigenschaften**

Temperaturgeregelte Rumpfelemente

- **Kühl- und Heizsystem** der inneren Oberflächen im Spalt zwischen primärer und sekundärer Isolierung
- **Individuell steuerbar** für verschiedene Kabinenbereiche
- Betriebsrelevante Temperatur- und Zeitskalen

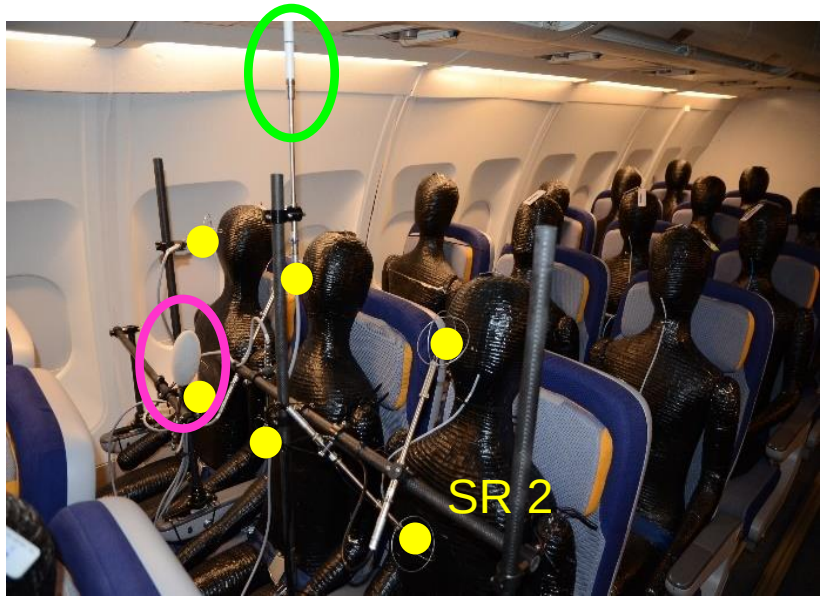


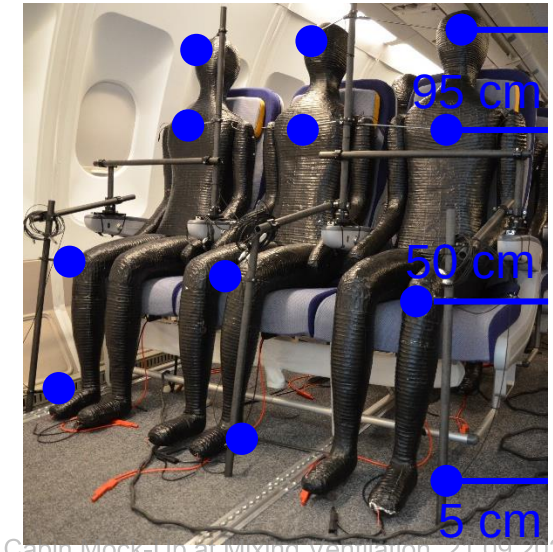


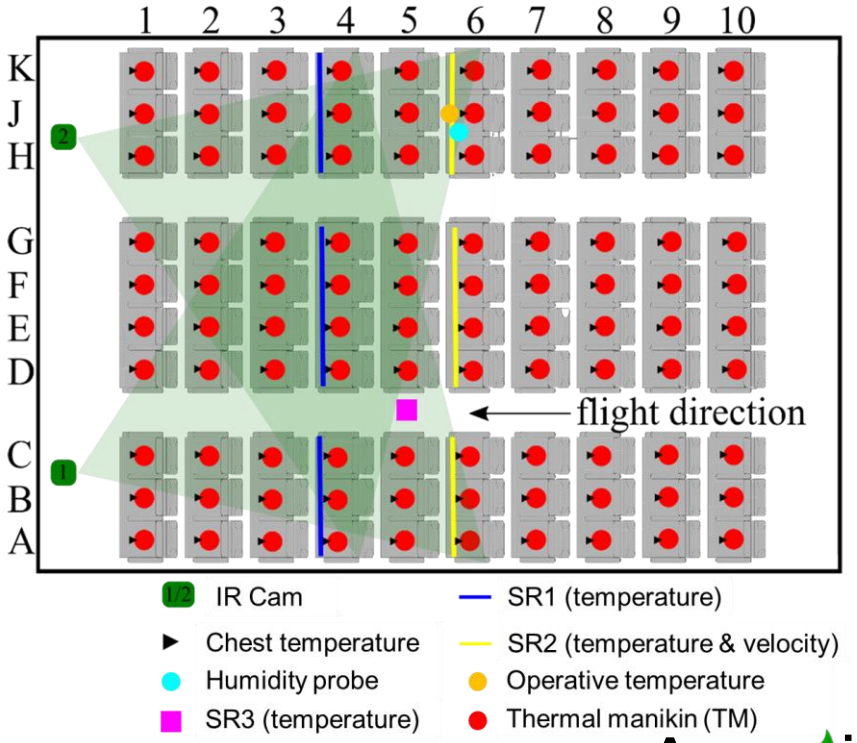


Messaufbau

- Lufttemperaturen auf 4 verschiedenen Höhen in Reihe 4 → Pt100
- Luftgeschwindigkeiten auf 4 verschiedenen Höhen in Reihe 6
  → omnidirektionale Geschwindigkeiten
- Predicted Mean Vote (PMV) am Sitzplatz
  Predicted Percentage Dissatisfied (PPD)
  → Geschwindigkeitssone
  → Feuchtigkeitssonde
  → Globale Temperatur
- Thermische Menschmodelle
- 100 Pt100 auf Brusthöhe ▶







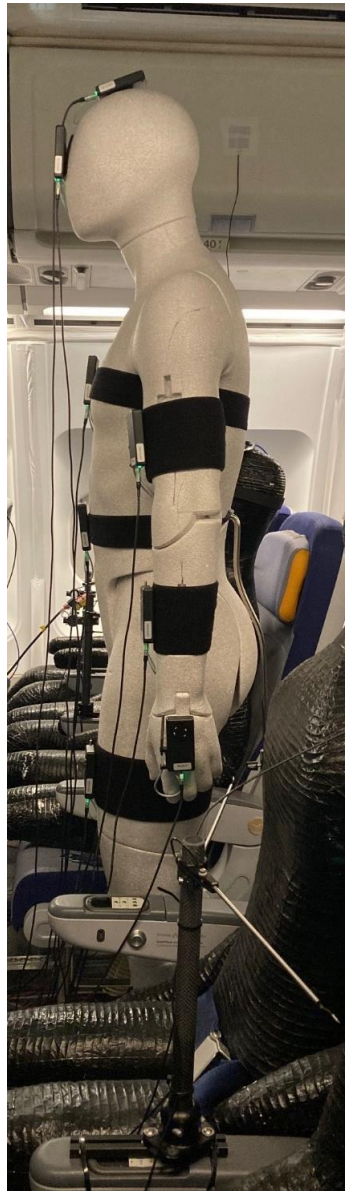
Messaufbau – Äquivalenttemperatur im Gang

- 16 Äquivalenttemperatursonden („Equites-Sonden“)
  → Erkennung lokaler Wärmeströme

- Objektive Komfortmessung

- Fünfstufigen Empfindungsskala von:
  - Zu kalt
  - Kühl aber komfortabel
  - Komfortabel
  - Warm aber komfortabel
  - Zu warm

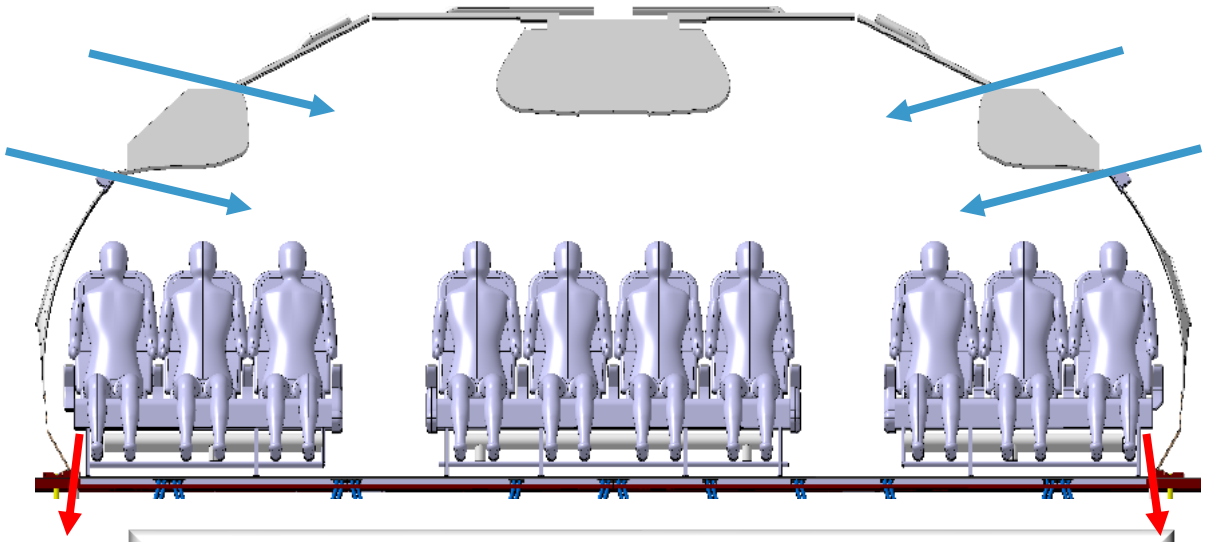
- Äquivalenttemperatur = integrale Größe:
  - Lufttemperatur
  - Luftbewegung
  - Strahlung



[2] Comlogo.com

Untersuchtes Belüftungssystem mit Testfällen

Mischlüftung (MV)



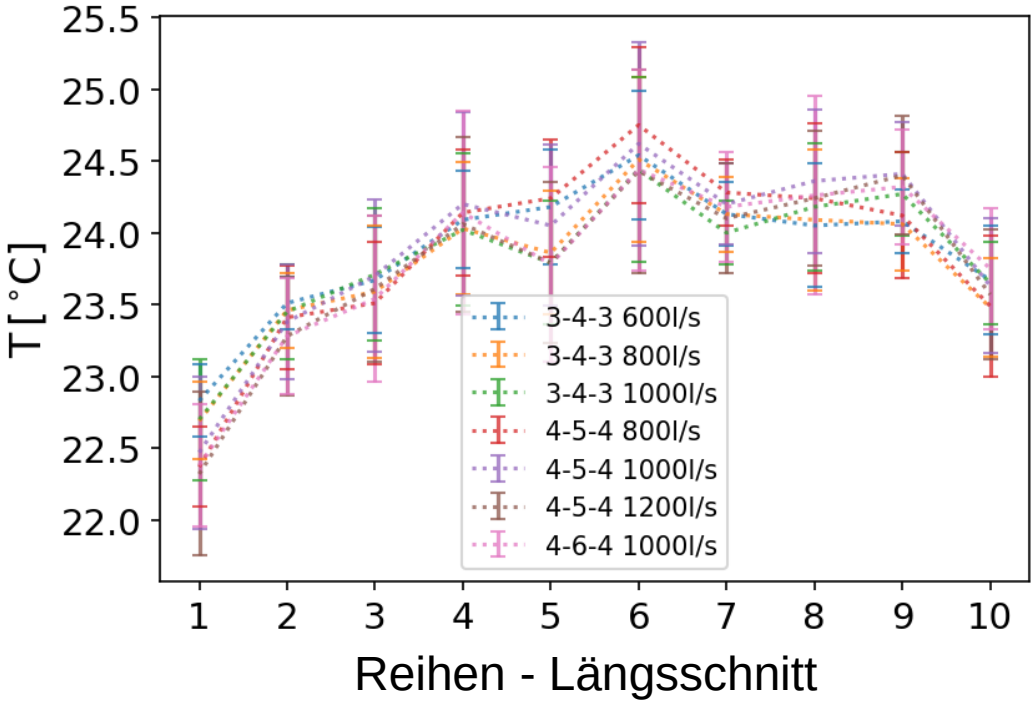
- Stand der Technik
- Zufuhr der kühlen Luft in Form von <u>impulsreichen Strahlen</u> (v~1m/s)
- Vermischung von frischer und verbrauchter Luft durch Turbulenz
- Austritt der vermischten Luft in Bodennähe

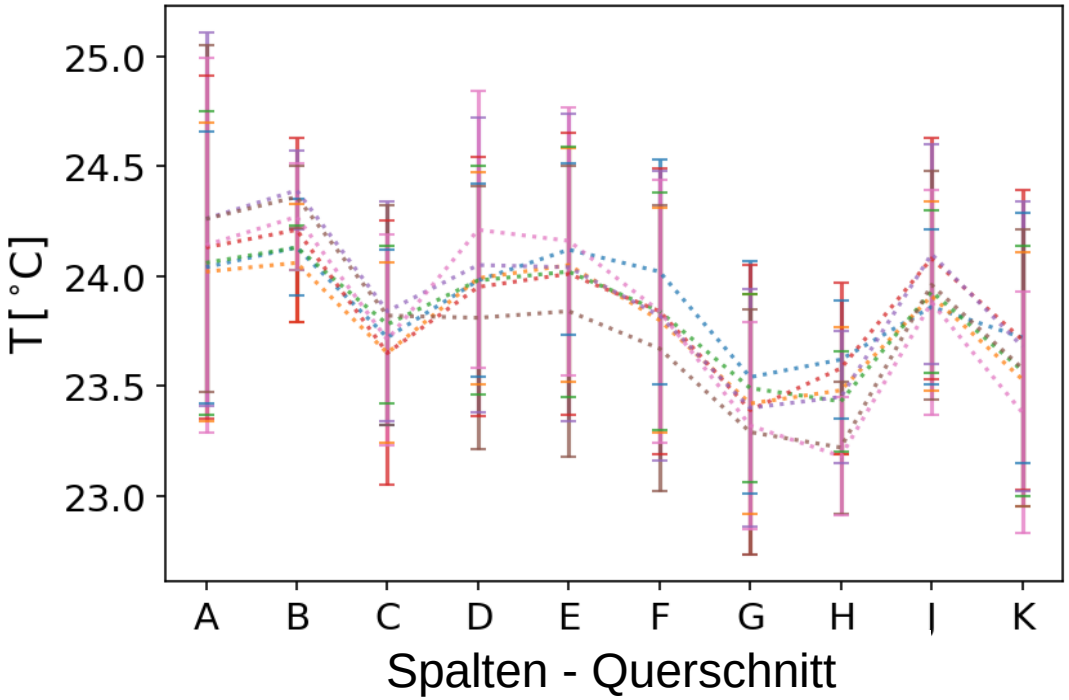
Referenz

	3-4-3		
T_{cab} [°C]	23,0	23,1	23,1
T_{in} [°C]	16,3	17,6	19,3
T_{cab}-T_{in} [K]	6,7	5,1	3,8
T_{out} [°C]	20,5	20,8	21,1
P_{TM} [kW]	8,2		
PAX [-]	100		
(Q_V) [m³/s]	0,6	0,8	1,0

Temperaturen auf Brusthöhe

QV / PAX [l/s]	3-4-3			4-5-4			4-6-4
	6	8	10	6.2	7.7	9.2	7.1
$\Delta T_{Reihen}^{max-min}$ [K]	1,7	1,8	1,7	2,4	2,2	2,1	2,1





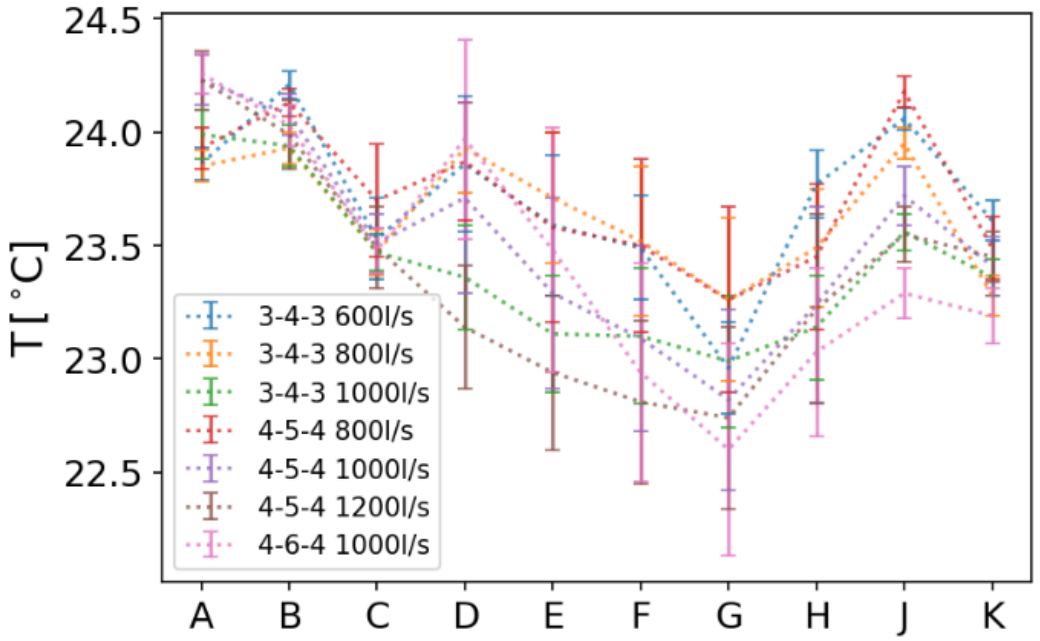
- Keine große Unterschiede zwischen den einzelnen Fällen
- Größte Unterschiede in Längsrichtung = 2,4 K
  → verursacht durch Reihe 1
  → **<u>Alle Fälle als gut bewertet</u>**

- Niedrigere Temperaturen Fenster (A / K) Gang (C / H)
  → Verglichen zu mittlere Sitze (B / E / F / I)

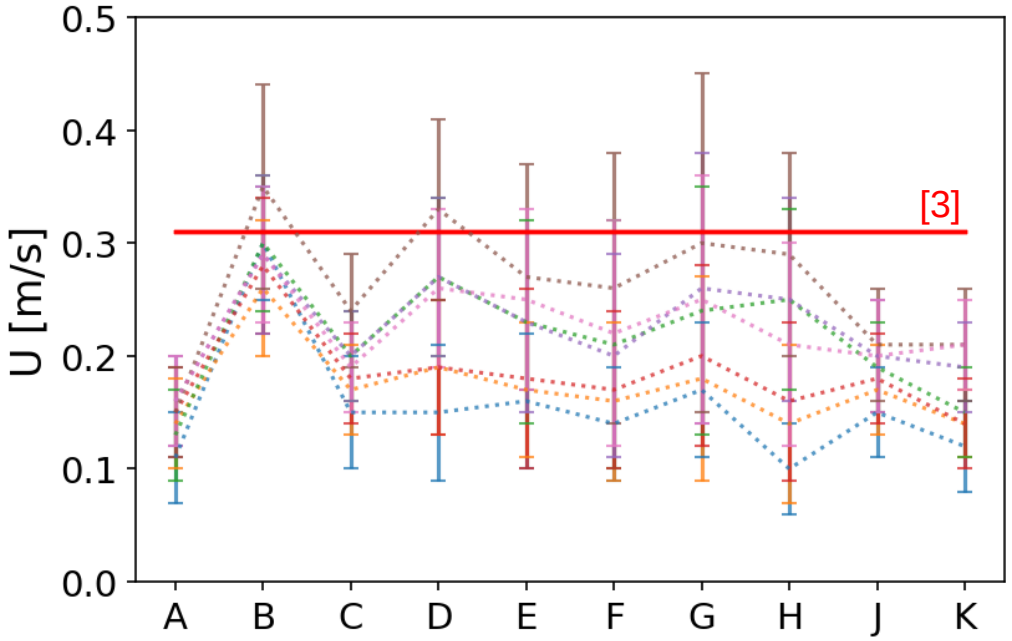
- Maximale gemittelte Temperaturunterschied steigt mit steigendem Volumenstrom / Sitzplatzdichte
  <u>→ Alle Fälle als gut bewertet</u>

Temperaturen und Geschwindigkeiten am Kopf

QV / PAX [l/s]	3-4-3			4-5-4			4-6-4
	6	8	10	6.2	7.7	9.2	7.1
U_h^{mean} [m/s]	0,16	0,17	0,22	0,18	0,23	0,26	0,22
U_h^{std} [m/s]	0,05	0,06	0,07	0,06	0,07	0,08	0,07
$U_h^{max-min}$ [m/s]	0,20	0,12	0,17	0,14	0,13	0,20	0,13



Spalten - Querschnitt



Spalten - Querschnitt

- Keine große Unterschiede zwischen den einzelnen Fällen
- Maximale Sitzunterschiede 0,7 K – 1,7 K
  → Alle Fälle als gut bewertet
- Temperaturabfall von 6D zu 6G

- Keine mittleren Geschwindigkeiten > 0,31 m/s [3]
  → Ausgenommen 4-5-4 1200 l/s
- Unterschiede A – B / Rest nahezu konstant

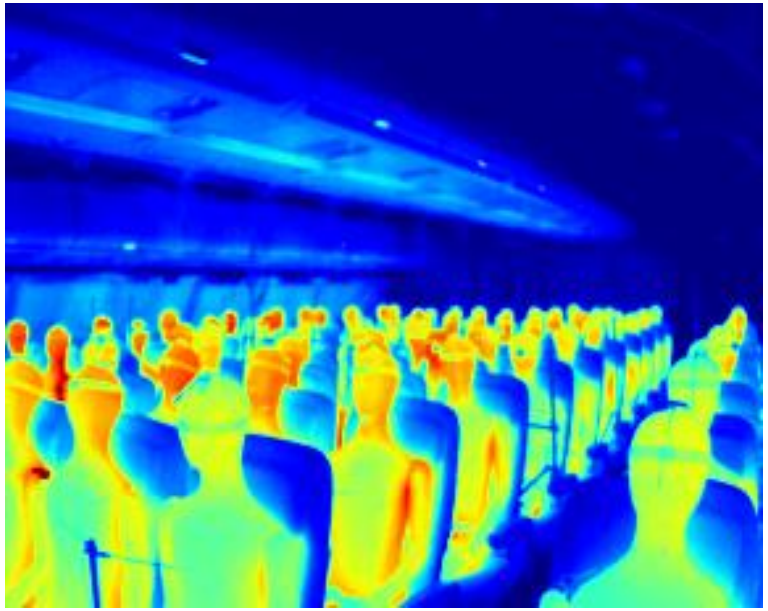
- Q_V niedrig → kleine Geschwindigkeiten
- Q_V hoch → höheren Geschwindigkeiten

[3] ASHRAE 2001

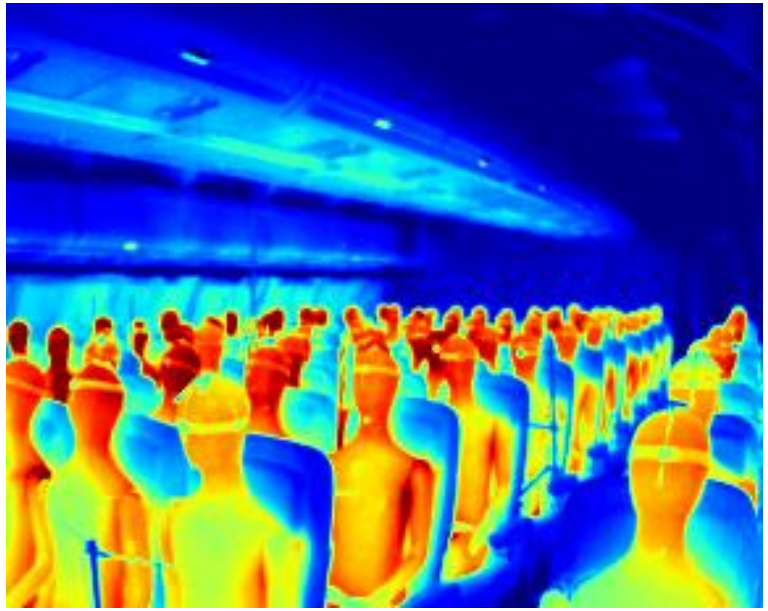
Arcadia

Oberflächentemperatur

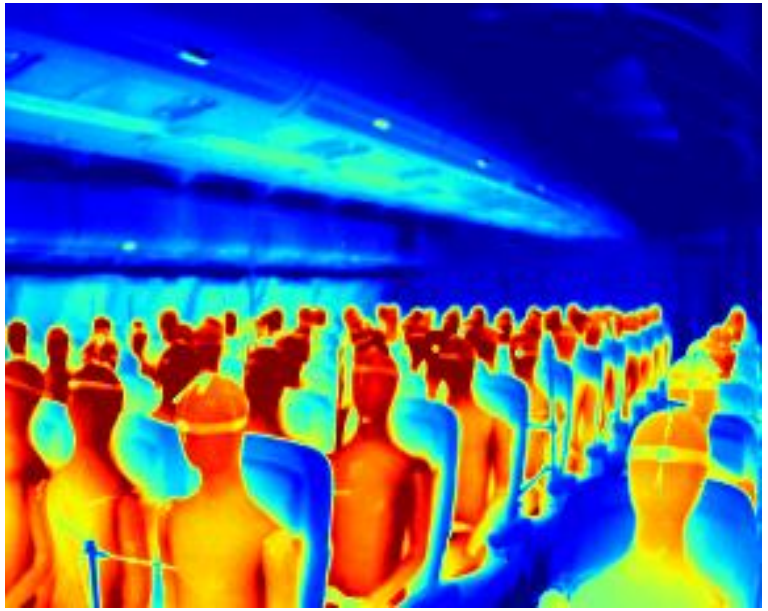
3-4-3 1000 l/s
P_{TM} = 8,2 kW

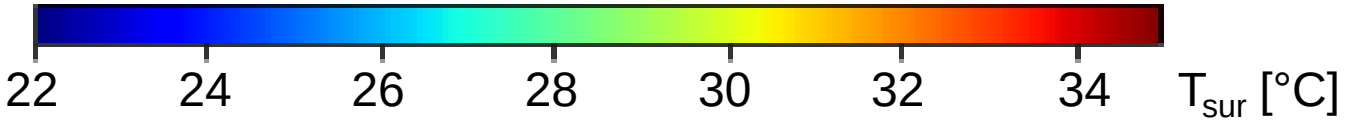


4-5-4 1000 l/s
P_{TM} = 10,7 kW



4-6-4 1000 l/s
P_{TM} = 11,5 kW





- Homogene Temperaturversteilung in Längsrichtung
- Nur leichter Temperaturanstieg trotz steigender Heizleistungen
- Steigende Heizleistungen ersichtlich in Oberflächentemperaturen der thermischen Menschmodelle

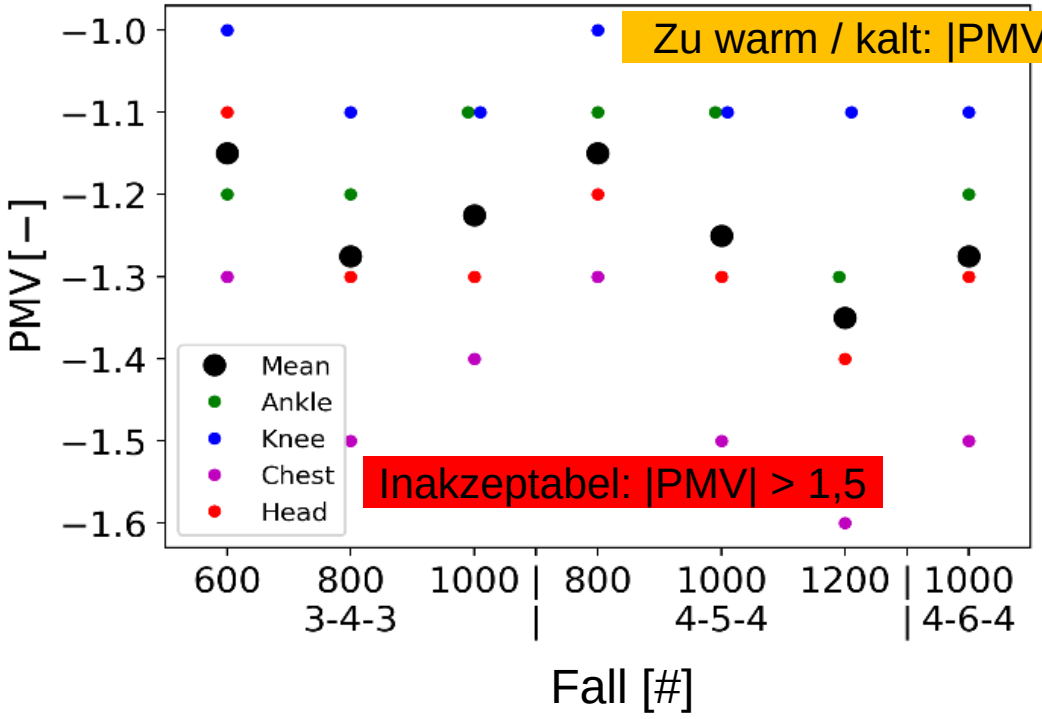
Thermischer Komfort auf Sitzplatz 6J

PMV und PPD

Komfortabel: |PMV| < 0,5

Warm / kühl aber komfortabel: 0,5 < |PMV| < 0,8

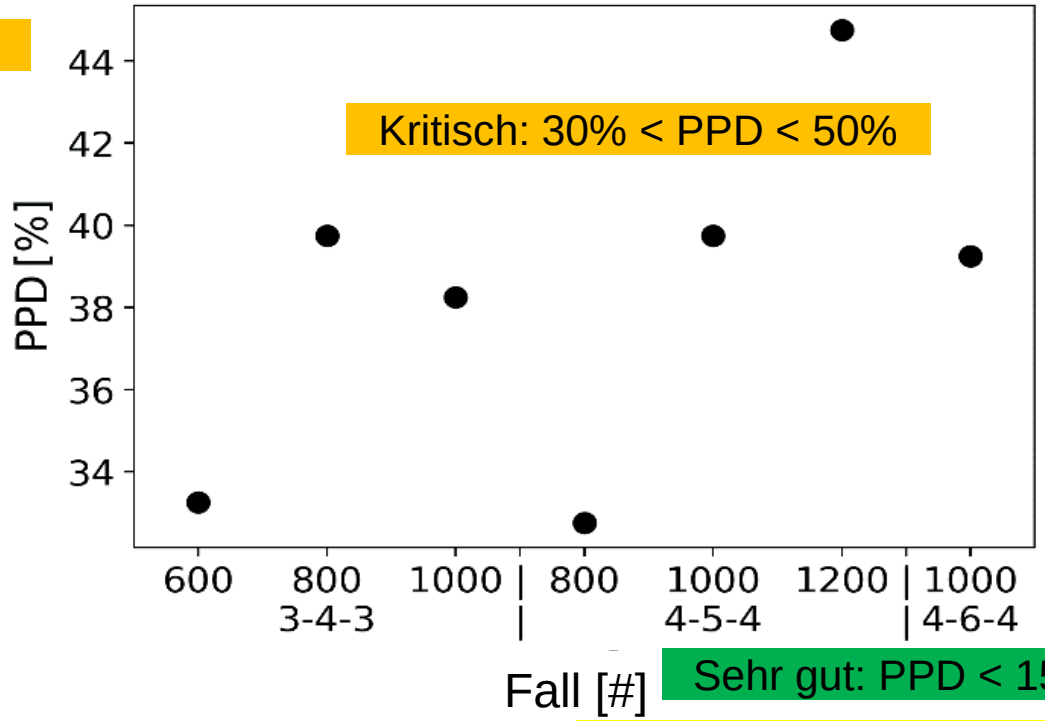
Zu warm / kalt: |PMV| > 0,8



Inakzeptabel: |PMV| > 1,5

Inakzeptabel: PPD > 50%

Kritisch: 30% < PPD < 50%



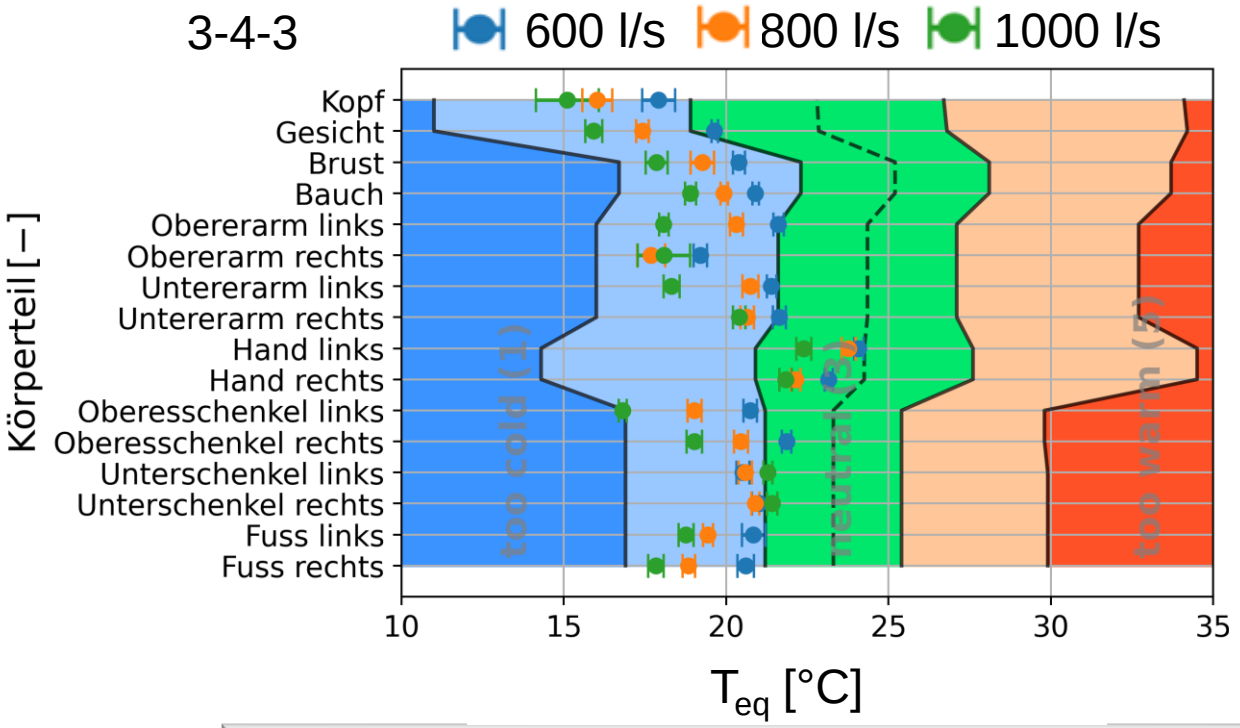
Sehr gut: PPD < 15%

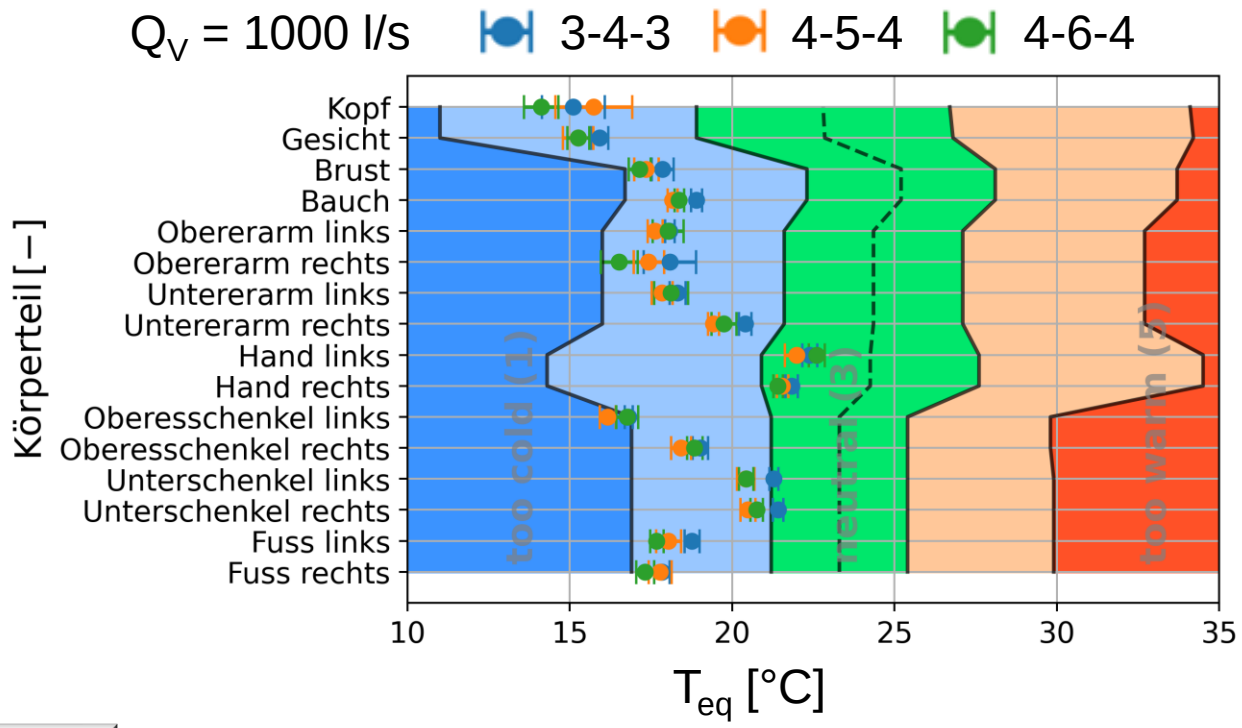
Akzeptabel: 15% < PPD < 30%

- PMV < -1 für alle Fälle sowie Körperpositionen
  → T_{cab} = 23°C zu niedrig
- Niedrigste Werte vor der Brust
- 4-5-4 Trend PMV besser mit vermindertem Q_V

- Hoher Grad an Unzufriedenheit (32% - 45%)
- Niedrig bei kleinem Q_V bei T_{cab} = konstant
  → **<u>lokale Luftstrom Hauptantreiber</u>**

Thermische Komfort im Gang
Äquivalenttemperatur





- Alle Werte zu niedrig (Ausnahme Hände)
- Trend – höherer Q_V → Abnahme T_{eq}
- Ähnliche Schwankungen für alle Fälle
- **<u>Angenehmere Bedingungen bei niedrigem Q_V</u>**

- Geringe Auswirkungen der Sitzkonfiguration
- Kein klarer Trend
- **<u>Keine Auswirkung auf den Gangbereich</u>**

Energierelevante Parameterbewertung

	3-4-3			4-5-4			4-6-4
QV / PAX [l/s]	6	8	10	6,2	7,7	9,2	7,1
P_{TM} [kW]	8.2			10.7			11.5
HRE [-]	0,31	0,29	0,24	0,33	0,31	0,30	0,32

$$H = \rho \cdot c_P \cdot Q_V \cdot (T_{out} - T_{in})$$

$$HRE = \frac{1}{2} \cdot \frac{T_{out} - T_{in}}{T_{cab} - T_{in}}$$

HRE = Wärmeaustragseffizienz (Heat Removal Efficiency)

- Perfekte Durchmischung ($T_{cab} = T_{out}$) → HRE = 0,5
  - MV → HRE ~ 0,4 [5]
  - CDV → HRE ~ 0,9 [5]
- In dieser Studie maximal 0,33
  $T_{out} < T_{cab}$
  → Erzeugung von Kurzschlussströmen
  (Luft verlässt die Kabine bevor sie durch die inneren Wärmelasten erwärmt wird)

H = Wärmeenergie abgeführt durch den Luftstrom

- Trend, es wird mehr Wärme durch die Klimaanlage abtransportiert bei:
  - Kleinerem Volumenstrom (Q_V)
  - Höherem Wärmeeintrag (P_{TM})
- **Geringerer Energiebedarf** zur Vorkonditionierung der Luft
- starke Temperaturgradienten (Innenflächen) erhöhte Volumenströme
  → **komfortkritische Zustände**

[5] Bosbach 2013

Zusammenfassung und Ausblick

Experimentelle Untersuchung von erhöhten Heizleistungen in Langstreckenflugzeugen

- Mischlüftung (Mixing Ventilation - MV)
- Vergleich Referenzfall (3-4-3 / Q_V = 1000 l/s) mit:
  - erhöhter Sitzplatzdichte
  - angepasstem Volumenstrom

Ergebnisse

- Höhere Sitzdichte + höherer Volumenstrom
  → kritisch wegen Zugluft
- niedrigerer Volumenstrom (pro PAX) vielversprechend
  → da weniger Energiebedarf
  → komforttechnisch besser.

Ausblick

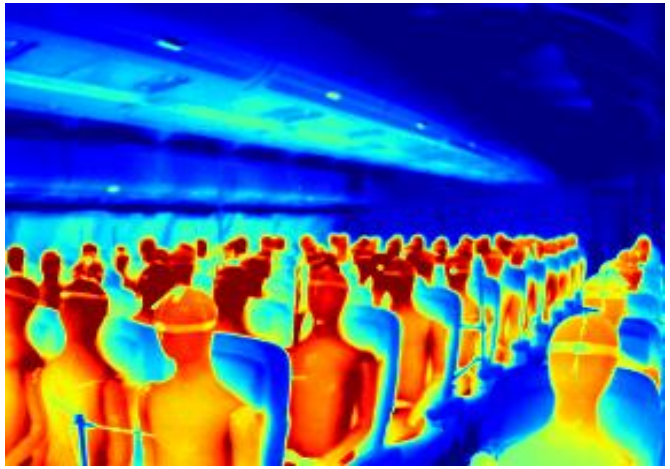
- Bewertung der Luftqualität bei Fällen mit niedrigerem Volumenstrom
- Untersuchung alternativer Belüftungskonzepte
  - Numerisch
  - Experimentell

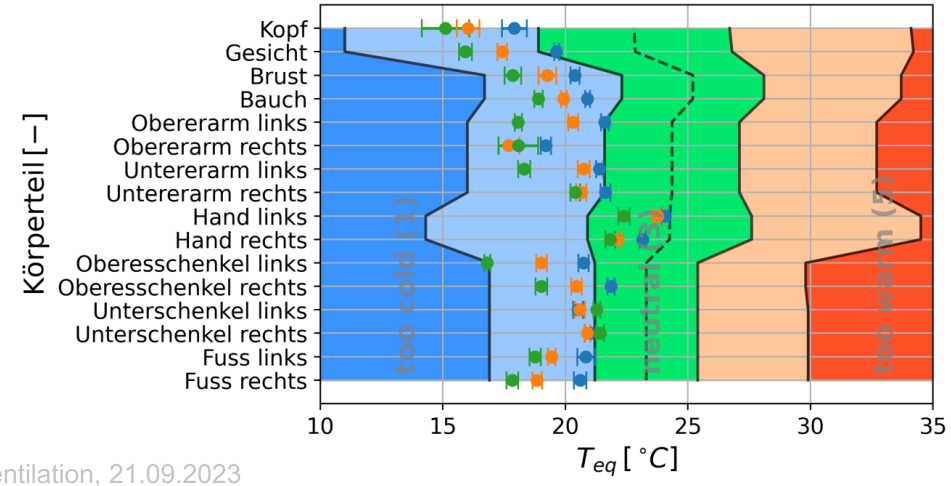
Arcadia

Automated and Reconfigurable Cabin Development Process in Aircraft design

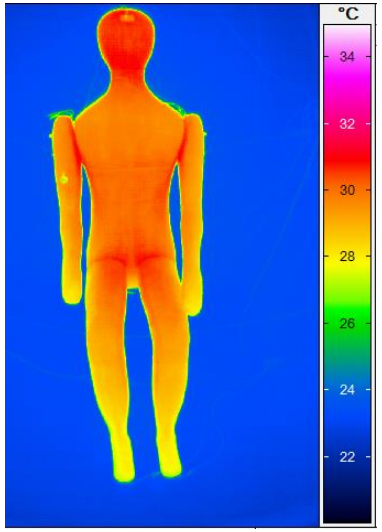
Vielen Dank

Tobias Dehne
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
tobias.dehne@dlr.de
+49 551 709-2953





Messaufbau - Thermische Menschmodelle (TM)



Simulation von thermischen Lasten

- Konstante Wärmestromdichte (am Kopf erhöht)
- Individuell steuerbar im Bereich von 0…150W
- Realistische Oberflächentemperaturen und Auftriebskräfte
- Anpassung der thermischen Menschmodelle
  → menschlichen Stoffwechsel [1]
  T_{cab} = 23 °C → P_{TM} = 82.0 W

[1] Railways applications; EN Standard 13129:2016