

Fachtagung Fahrzeugklimatisierung 2020

Experimentelle Untersuchung zum thermischen Komfort im Grenzbereich des Luftzugempfindens in einer generischen Fahrzeugkabine

Dr. Andreas Westhoff und Dr. Daniel Schiepel

Technischen Akademie Esslingen, 9. und 10. Dezember 2020



German Aerospace Center (DLR)
Institute of Aerodynamics and Flow Technology
Department of Ground Vehicles (AS-BOA)
Bunsenstraße 10,
37073 Göttingen, Germany



Motivation

Zugluftempfinden



Die Zugluftempfindlichkeit im PKW unterscheidet sich im Vergleich zu Zügen, Bussen oder Flugzeugen!

Was sind die Randbedingungen bei Zugluft? / Sind die Kriterien des thermischen Komforts erfüllt? / Ist EN ISO 14505 gültig? / Alternative Beurteilungsnorm für Zugluftempfinden

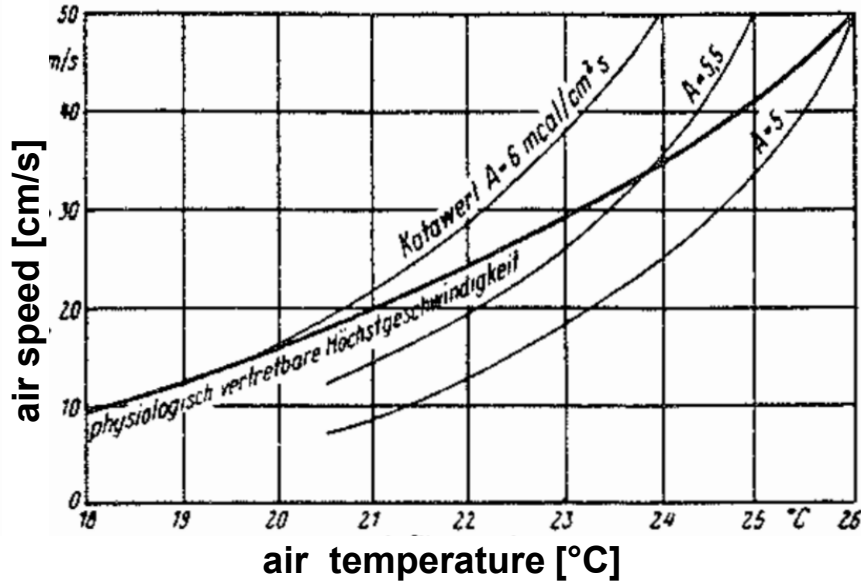


Normen und Standards

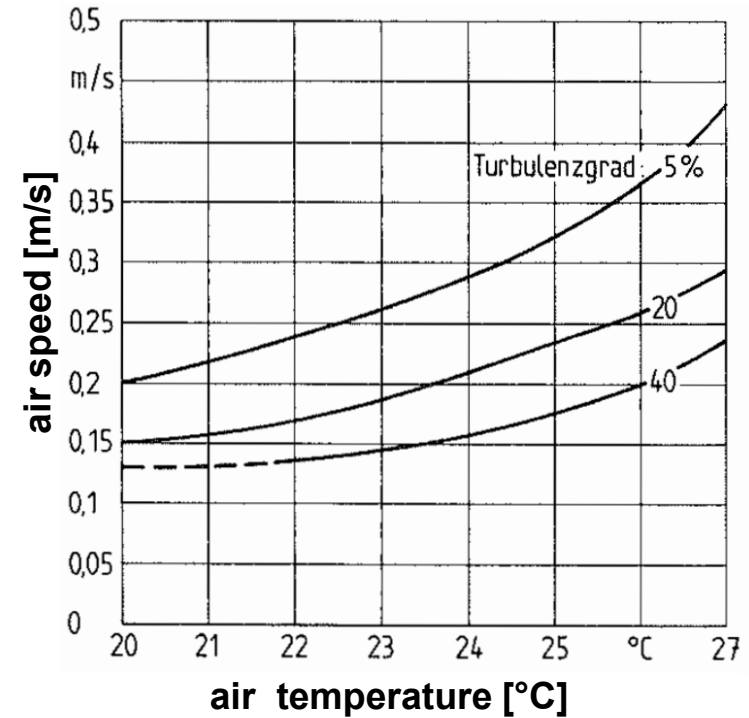
- **DIN EN 16798-3 (2017)** Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden - Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme (Ersetzt DIN1946-2)
- **EN 13129 (2016)** Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs - Behaglichkeitsparameter und Typprüfungen
- **DIN EN 14813 (2011)** Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Führerräumen - Teil 1: Behaglichkeitsparameter
- **EN ISO 14505-1 (2007)** Ergonomie der thermischen Umgebung - Beurteilung der thermischen Umgebung in Fahrzeugen - Teil 1: Grundlagen und Verfahren für die Bewertung der thermischen Belastung
- **EN ISO 14505-2 (2007)** Ergonomie der thermischen Umgebung - Beurteilung der thermischen Umgebung in Fahrzeugen - Teil 2: Bestimmung der Äquivalenttemperatur
- **EN ISO 14505-3 (2006)** Ergonomie der thermischen Umgebung - Bewertung der thermischen Umgebungen in Fahrzeugen - Teil 3: Bewertung der thermischen Behaglichkeit durch Versuchspersonen
- **EN 14750 (2006)** Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs - Teil 1: Behaglichkeitsparameter
- **DIN 1946-3 (2006)** Raumluftechnik - Teil 3: Klimatisierung von Personenkraftwagen und Lastkraftwagen



Normen zum thermischen Komfort im PKW



DIN 1946-3 (1962/2006)



DIN EN 16798-3:2017-11
(ersetzt DIN 1946-2)

**Thermische Behaglichkeit in Abhängigkeit von Turbulenz,
Luftgeschwindigkeit und Temperatur (für "niedrige
Geschwindigkeit")**



Ziele des Projektes

Charakterisierung und Validierung des thermischen Komforts bei Zugluft

- Identifizierung der Auswirkungen von Strahlungswärme und Luftströmung auf die Zugluftempfindlichkeit bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen
- Bestimmung der Komfortschwellen für den Luftzug in Abhängigkeit von Temperatur, Luftgeschwindigkeit und Turbulenz (für welche Bedingungen der Parametervariationen ist der Luftzug noch komfortabel?)
- Vergleich und Bewertung des Ergebnisses bezüglich bestehender Normen auf der Grundlage objektiver Werte sowie Probandentests (insbesondere der Nachweis, ob die EN ISO 14505 für Zugluft gültig ist)

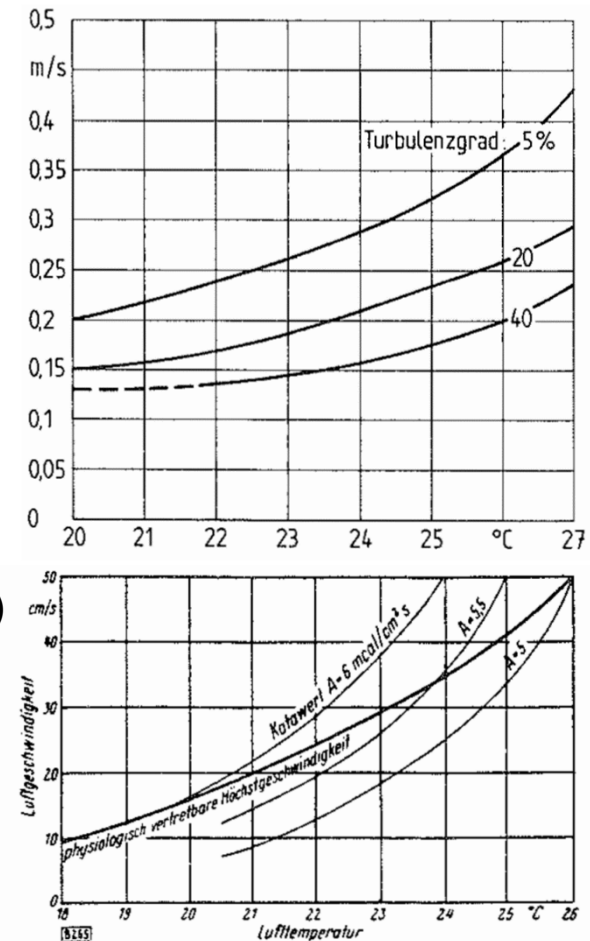
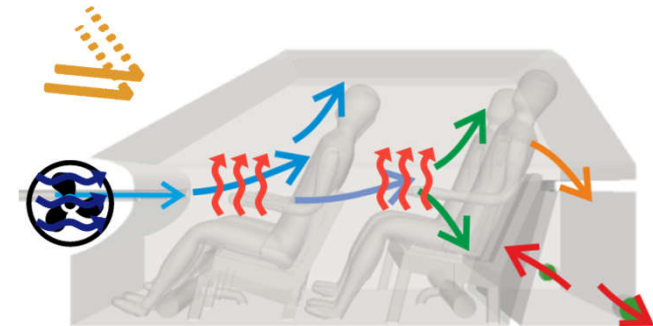
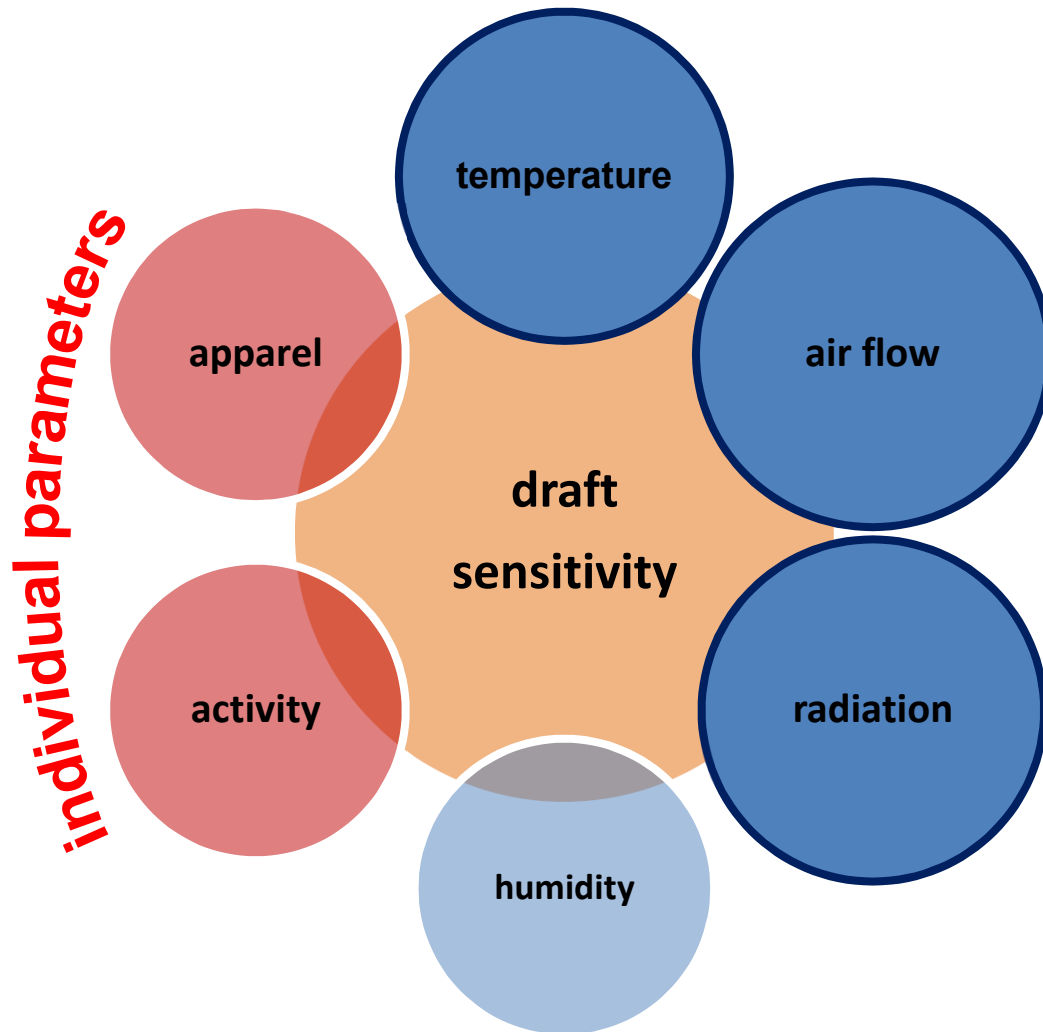



Bild 1. Zulässige Luftgeschwindigkeit beim Anblasen sitzender Personen von vorn in Abhängigkeit von der Raumlufttemperatur





Einflussfaktoren thermischer Komfort



Wärmetransportmechanismen

 Thermische Konvektion
 $\dot{Q}_{TK} = f(\Delta T, \beta_L, g, \lambda_L, \nu_L, \alpha)$

 Erzwungene Konvektion
 $\dot{Q}_{FK} = f(\vec{u}, \lambda_L, \nu_L, \alpha)$

 Strahlung
 $\dot{Q}_S = \iint \sigma \epsilon(\vec{x})(T_P^4 - T_U^4) dA$



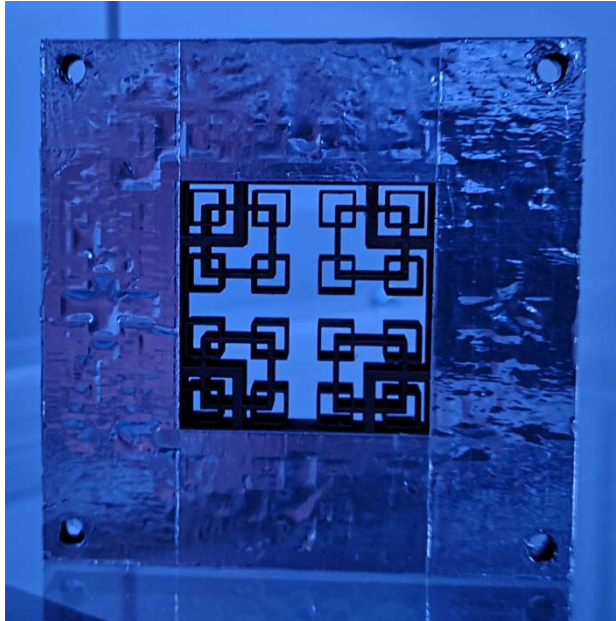
Single Person Cabin (SPC)



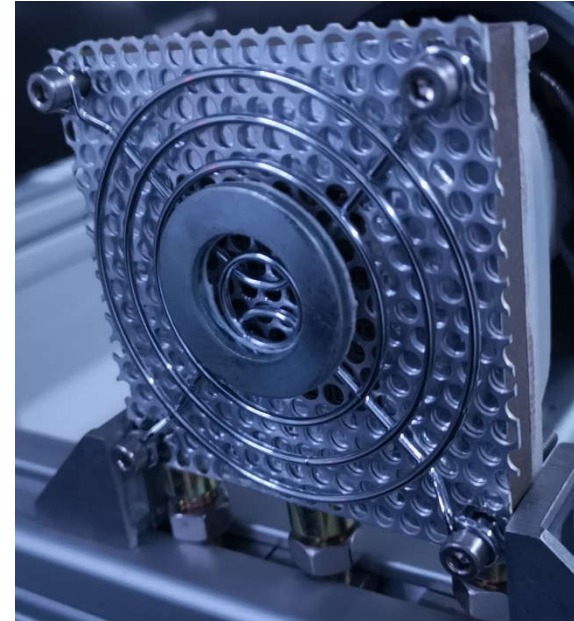
- Zwei Einströmvorrichtungen
- Volumenstrom- und temperaturgesteuerte Einströmbedingungen
- Konstante Randbedingungen (Temperatur und Feuchtigkeit) in einer Klimakammer
- Die Form des SPC ist „autoähnlich“, Vorder- und Rückseite sind offen
- Infrarot-Panel auf dem Windschutz zur Simulation der Sonneneinstrahlung
- Thermisches Menschmodell zur Simulation der Wärmeabgabe (75 W) und der Versperrung eines menschlichen Körpers



Einströmkonfigurationen



Konfiguration A
(geringere Turbulenz)

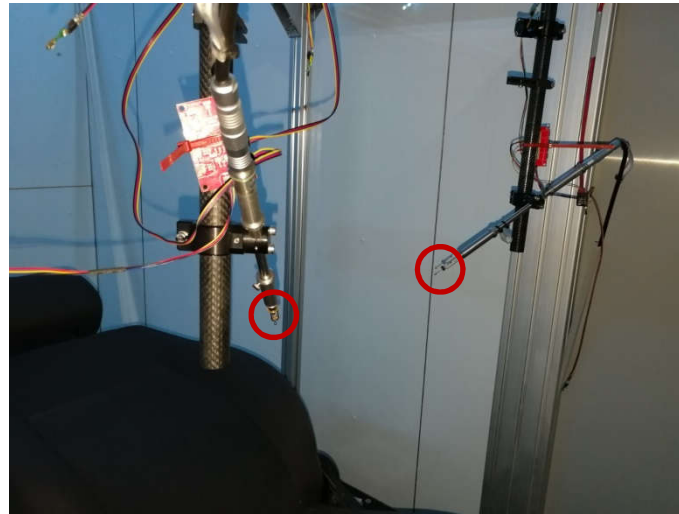
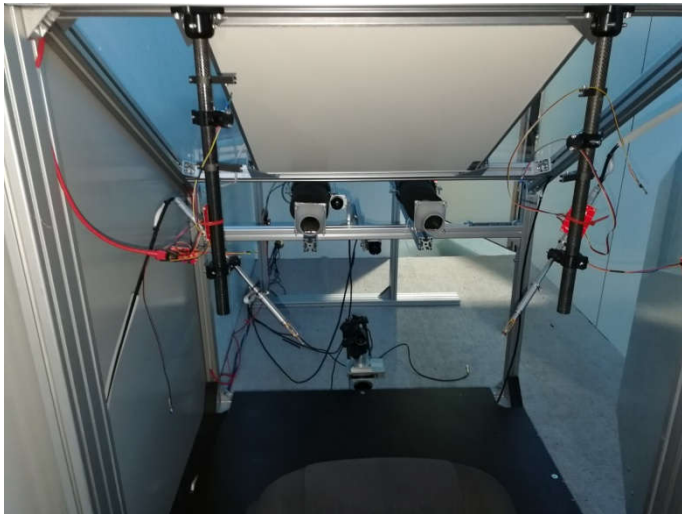


Konfiguration B
(höhere Turbulenz)

**Zwei Konfigurationen von Einströmvorrichtungen
für unterschiedliche Turbulenzintensitäten**



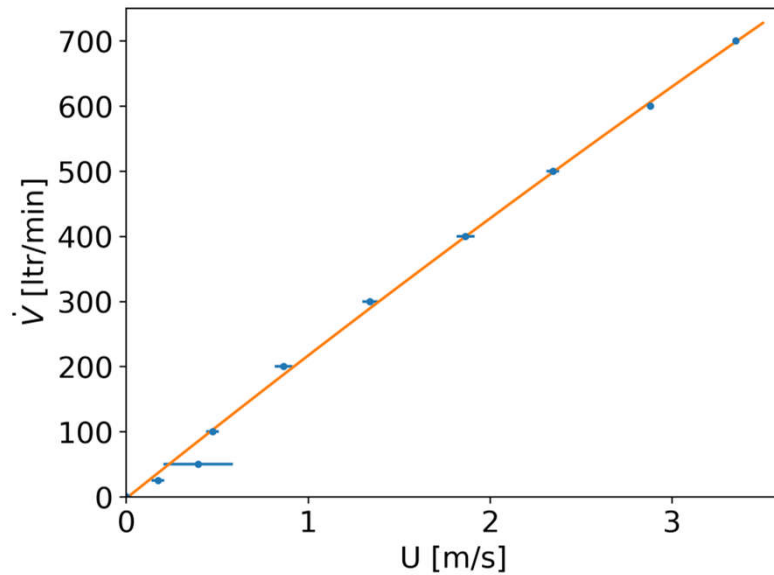
Kalibrierung und Definition der Luftströmungsbedingungen



- Horizontaler Abstand der Einströmvorrichtungen $d = 55 \text{ cm}$
- Bestimmung der Referenzgeschwindigkeit mittels Hitzdrahtanemometer (Messungen ohne Wärmepuppe/Sitz)
- Funktionale Beziehung von Volumenstrom und Geschwindigkeit an der Position des Brustkorbs
- Bestimmung des Turbulenzgrades

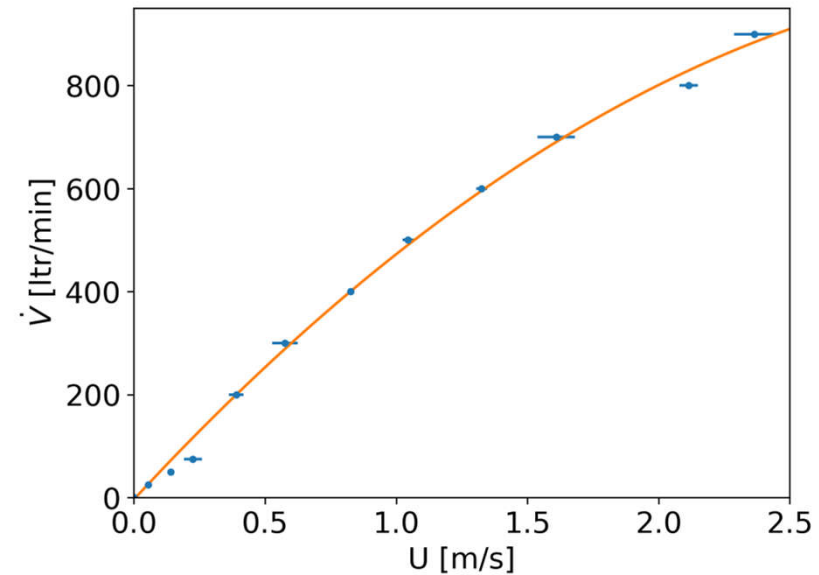


Referenzgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Volumenstrom



Konfiguration A
(geringere Turbulenz)

$$\dot{V} = -4.3 U^2 + 223.5 U - 2.4$$

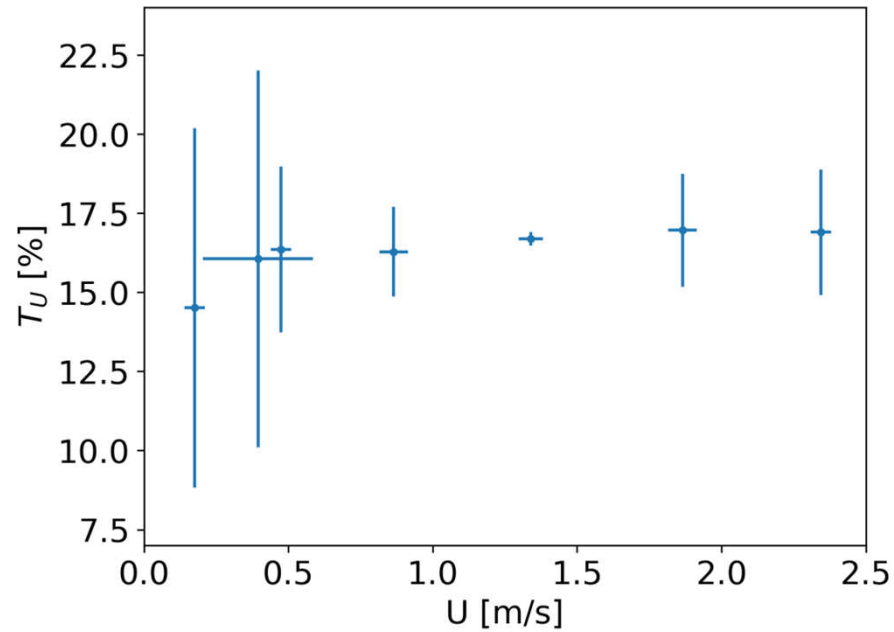


Konfiguration B
(höhere Turbulenz)

$$\dot{V} = -73.9 U^2 + 550.2 U - 3.6$$

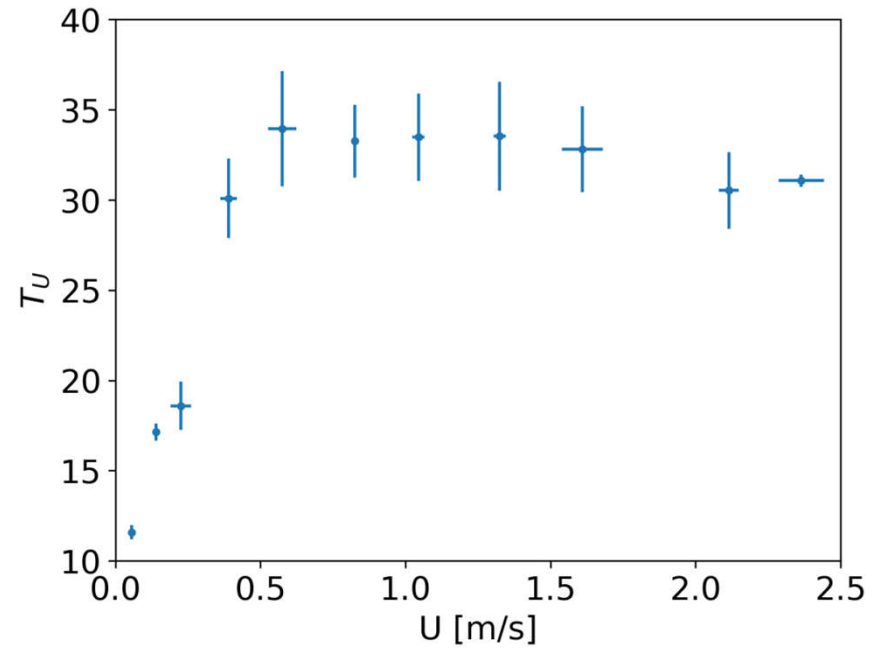


Turbulenzintensität als Funktion der Geschwindigkeit



Konfiguration A
(geringere Turbulenz)

$$T_U^A = 16.2 \pm 0.7 \%$$



Konfiguration B
(höhere Turbulenz)

$$T_U^B = 32.3 \pm 1.4 \%$$

$$T_U = \frac{1}{U} \sqrt{\frac{1}{3} (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)}$$



Messmittel Thermal Manikin (TM)



Simulation sensible Wärmeabgabe

Oberflächen Heizdraht mit einer
Realistische Versperrung eines Passagiers

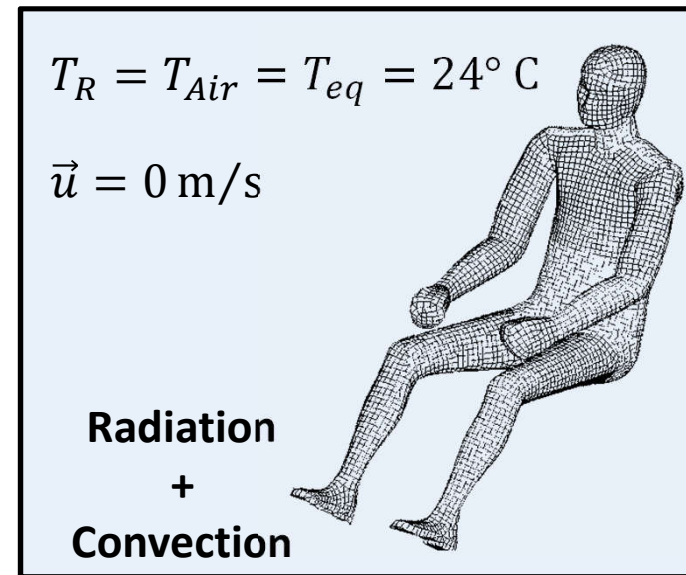
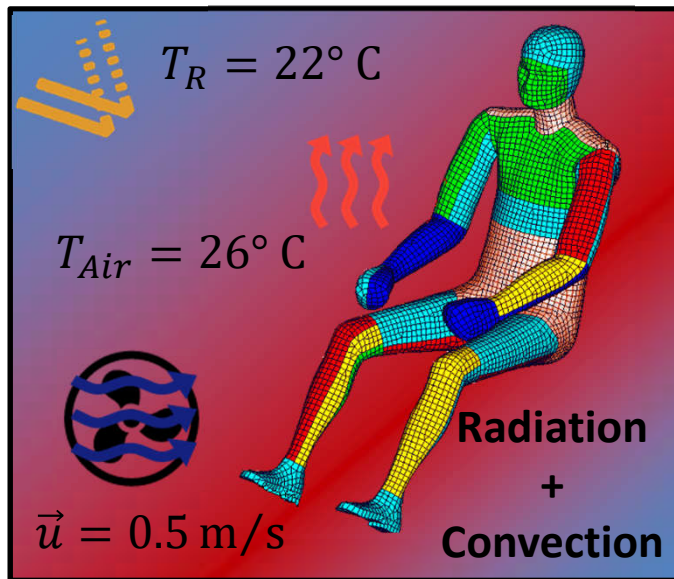
Variable Heizleistung

Äquivalenttemperatur
Thermischer Komfort

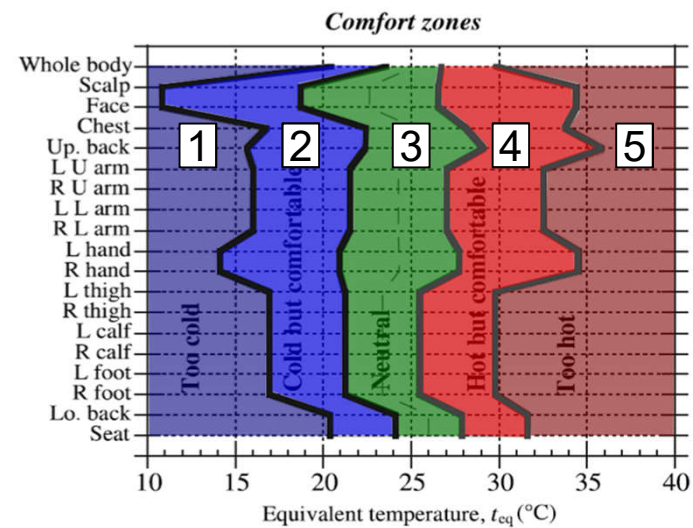
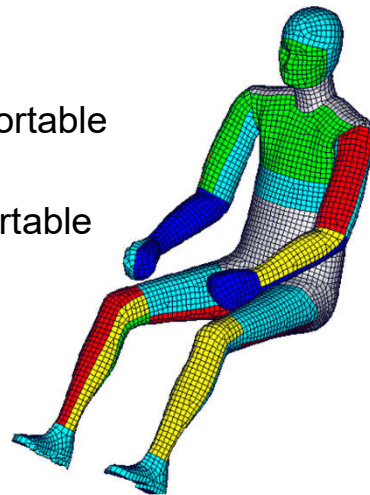
Vielseitig einsetzbar, einfache Handhabung und kosteneffizient



Thermische Behaglichkeit (EN ISO 14505)



- 1 too cold
- 2 cold but comfortable
- 3 neutral
- 4 hot but comfortable
- 5 Too hot



Kalibrierverfahren - Oberflächentemperatur

KALIBRIERBOX



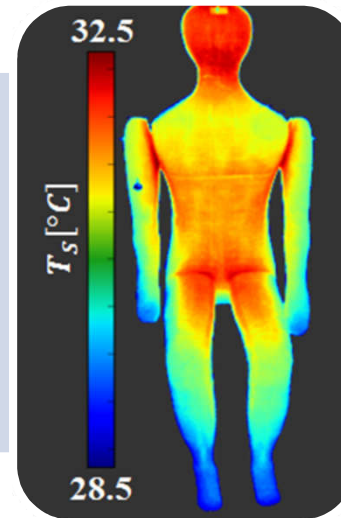
- Thermisch isoliert
- Temperaturgesteuerte Seitenwände

THERMAL MANIKIN



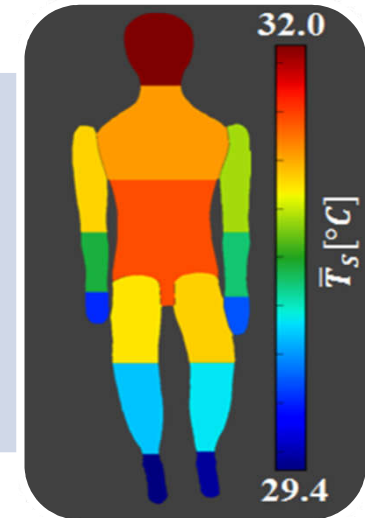
- Berührungslos platziert
- Konstante Heizleistung
- 8 omnidirektionale Geschwindigkeitssonden

OBERFLÄCHENTEMPERATUR



- IR-Thermografie
- TM-Oberflächentemperatur in Abhängigkeit von der Wandtemperatur

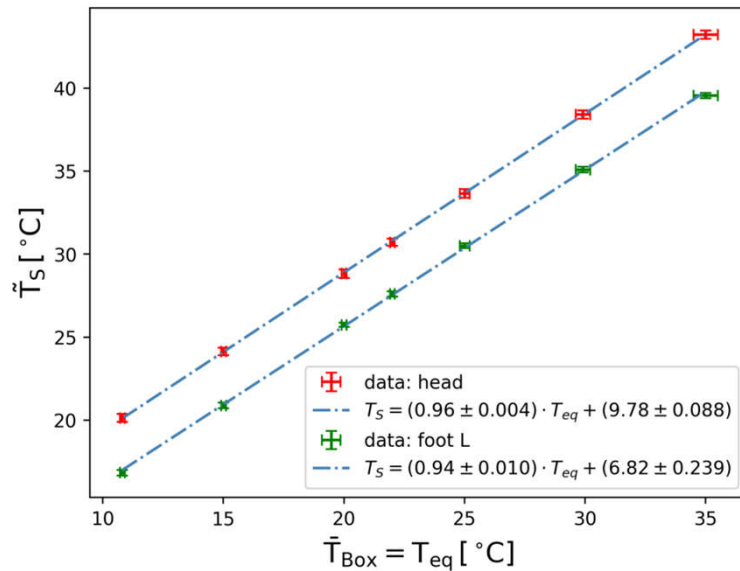
ZONENTEMPERATUR



- Unterteilung in 16 Körperzonen
- Einstellung der IR-Temperatur
- Räumliche Durchschnittstemperatur jeder Zone



Äquivalenttemperatur



body part	m: slope [-]	b: ordinate [°C]
head	0.955±0.004	9.78±0.09
chest	0.953±0.003	8.85±0.07
abdomen	0.958±0.003	8.91±0.06
upper arm L	0.965±0.003	8.36±0.07
upper arm R	0.966±0.004	8.10±0.11
lower arm L	0.971±0.001	7.66±0.04
lower arm R	0.969±0.002	7.61±0.06
hand L	0.973±0.001	6.71±0.04
hand R	0.969±0.004	6.91±0.09
upper leg L	0.959±0.002	8.44±0.06
upper leg R	0.957±0.003	8.59±0.08
lower leg L	0.945±0.004	7.74±0.10
lower leg R	0.941±0.006	7.94±0.16
foot L	0.942±0.010	6.82±0.24
foot R	0.937±0.010	6.99±0.24

Beziehung zwischen Oberflächen- und Kastentemperatur für jede Körperzone

$$\tilde{T}_S = m_{eq} \cdot T_{box} + b_{eq}$$

$$b_{eq} = \frac{\dot{q}}{h}$$

Faktoren zur Berechnung der Äquivalenttemperatur

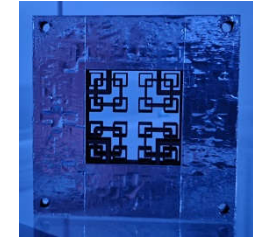
$$T_{eq} = \frac{\tilde{T}_S - b}{m}$$

Fehler beinhaltet Sensorfehler und Fehler der linearen Regression



Einfluss des Turbulenzgrads auf den thermischen Komfort





Testmatrix/Parameterraum Konfiguration A

Geschwindigkeit [m/s]	Volumenstrom [ltr/min]	Temperatur [°C]
0.25	53	17, 20, 23
0.50	108	17, 20, 23, 26
0.75	162	17, 20, 23, 26
1.00	216	17, 20, 23, 26
1.25	270	17, 20, 23, 26
1.5	323	20, 23, 26
1.75	375	20, 23, 26
2.00	428	23, 26
2.25	479	23, 26
2.50	530	23

Wärmeabgabe TM 75 Watt





Testmatrix / Parameterraum Konfiguration B

Geschwindigkeit [m/s]	Volumenstrom [ltr/min]	Temperatur [°C]
0.25	129	17, 20, 23
0.50	253	17, 20, 23, 26
0.75	367	17, 20, 23, 26, 29
1.00	473	17, 20, 23, 26, 29
1.25	569	17, 20, 23, 26, 29
1.5	655	20, 23, 26, 29
1.75	733	20, 23, 26, 29
2.00	801	20, 23, 26, 29
2.25	860	20, 23, 26, 29
2.50	910	23, 26, 29

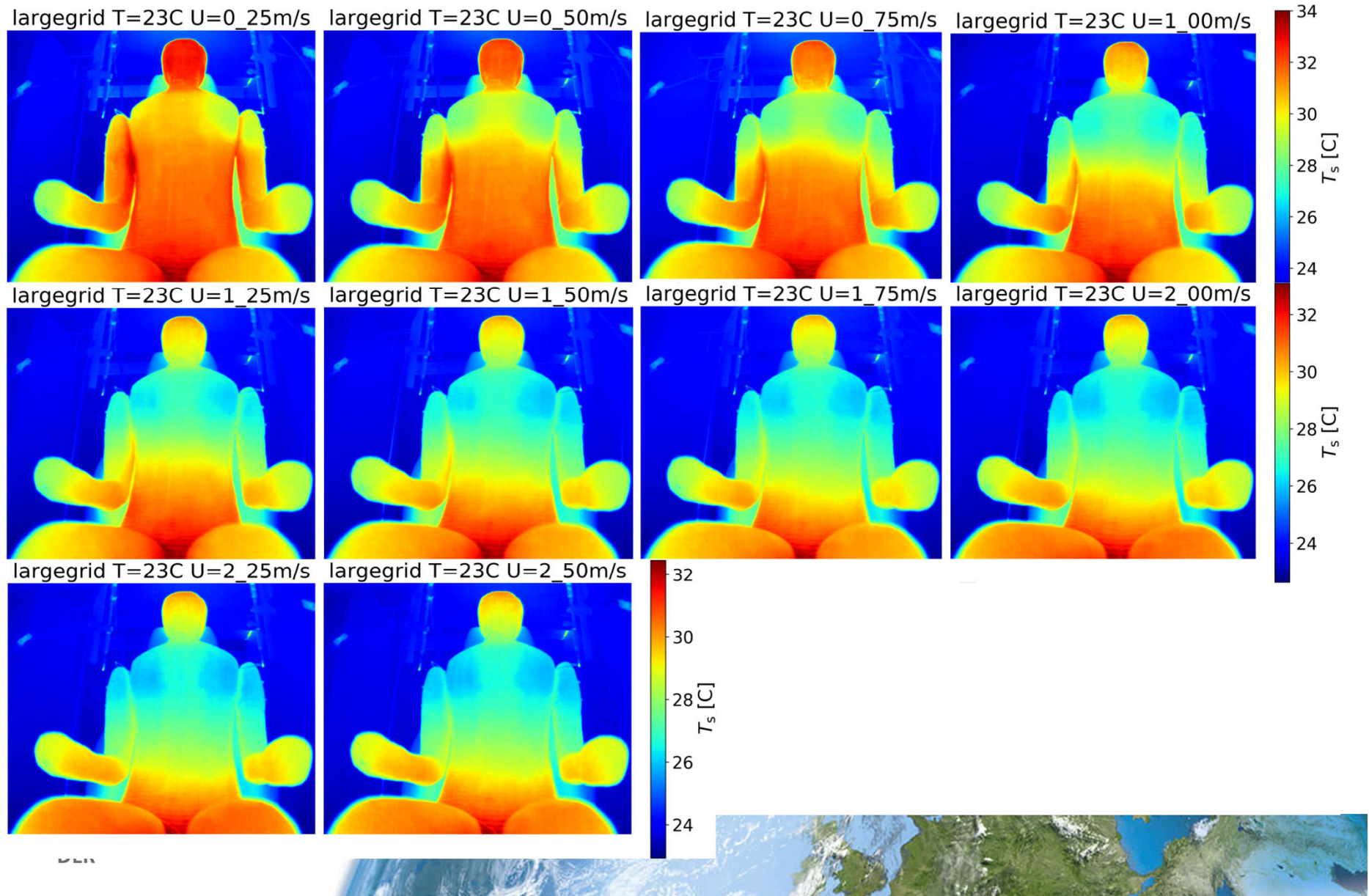
Wärmeabgabe TM 75 Watt



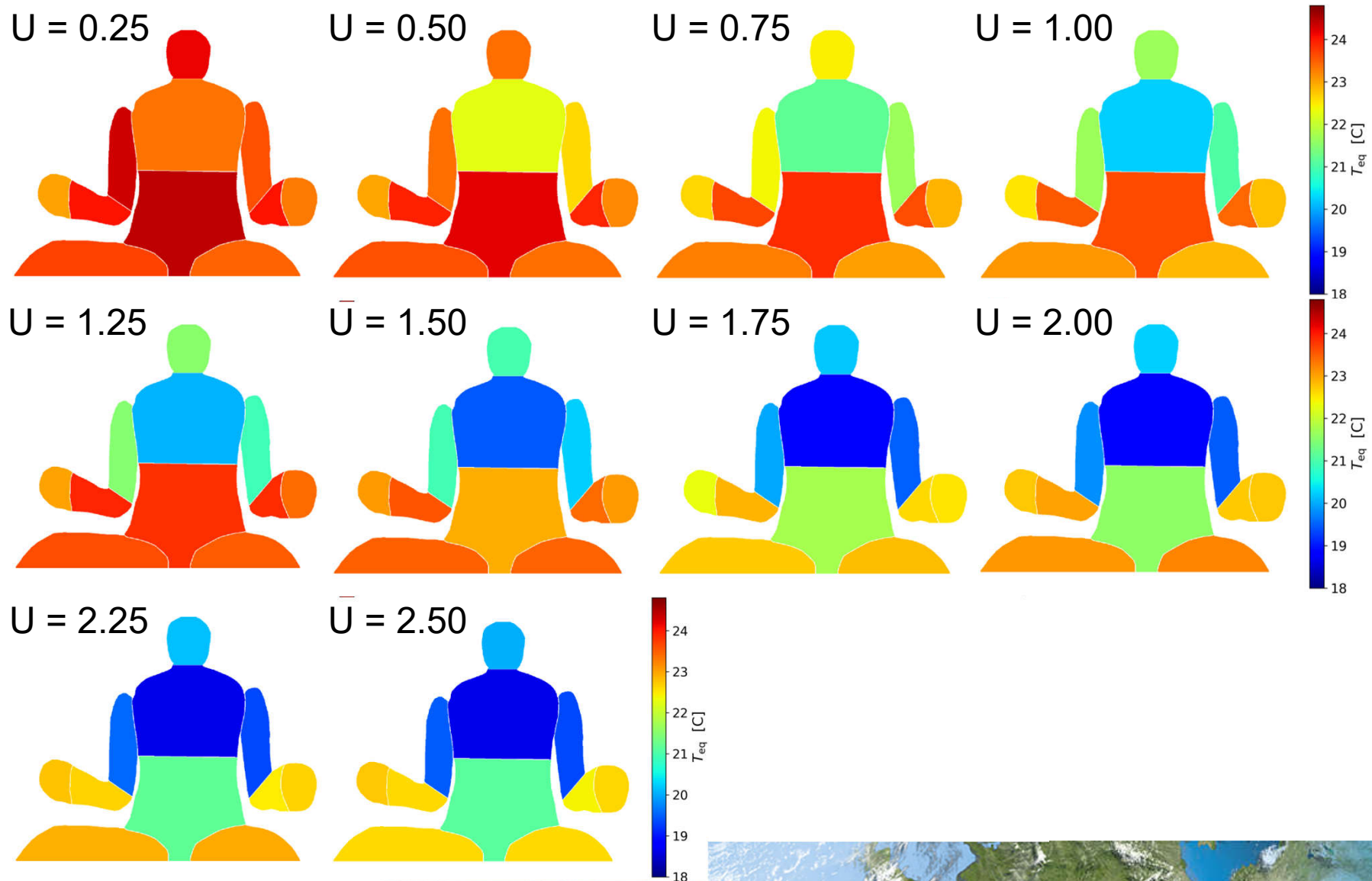
Konfiguration A | $T = 23^{\circ}\text{C}$ $U = 0,25 \text{ m/s} - 2,5 \text{ m/s}$



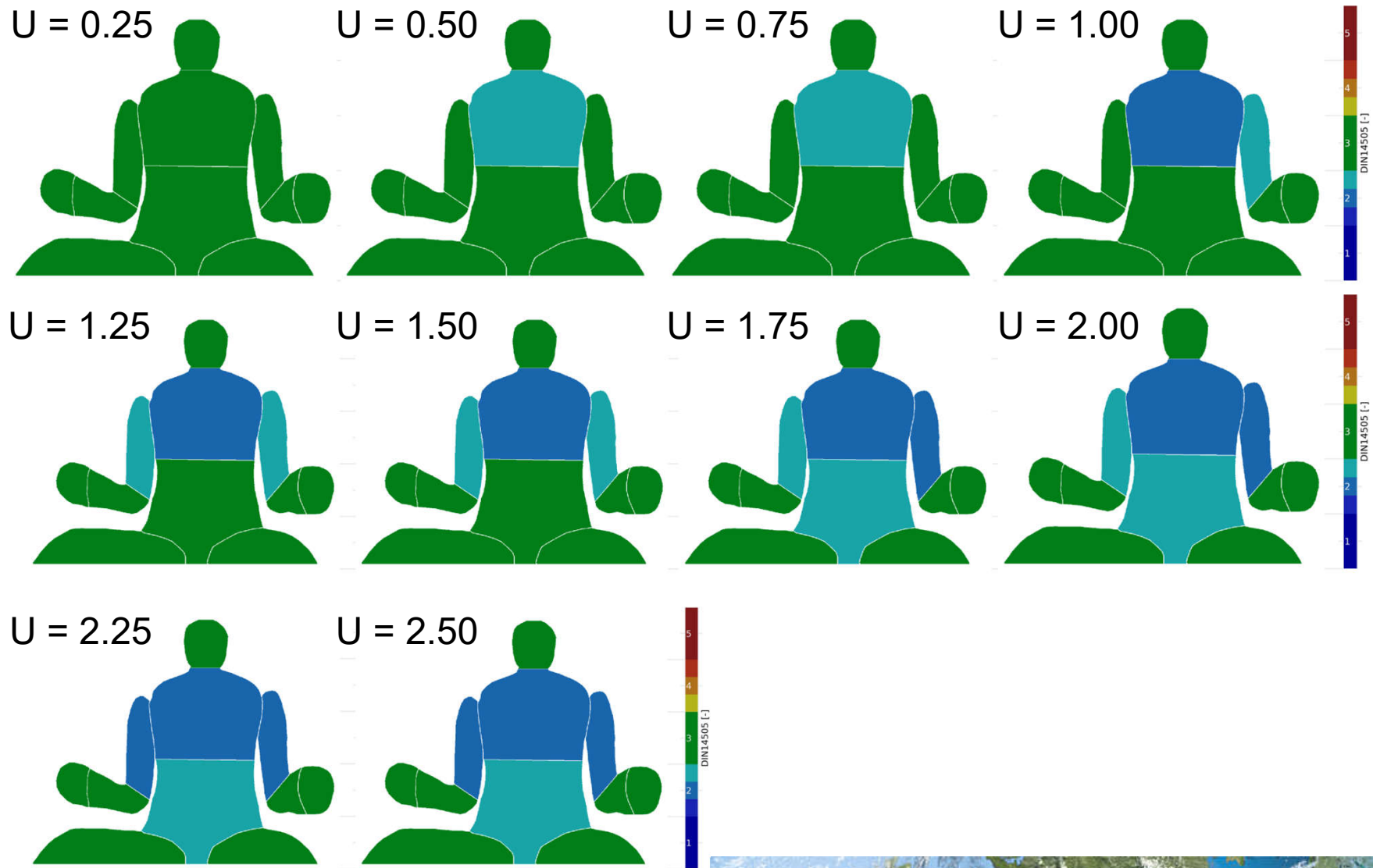
Oberflächentemperatur für die Einströmvorrichtung A | Umgebungstemperatur $T = 23^\circ\text{C}$ in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit



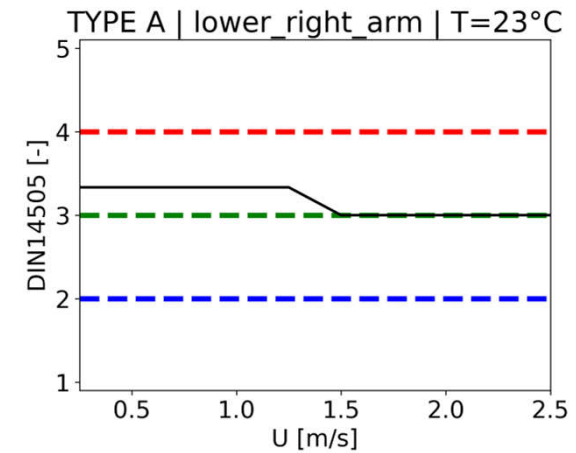
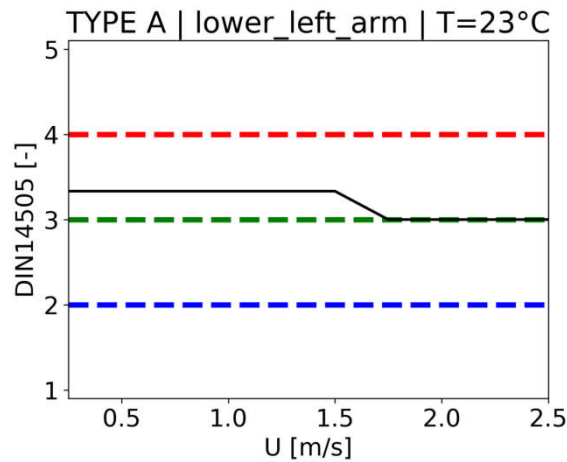
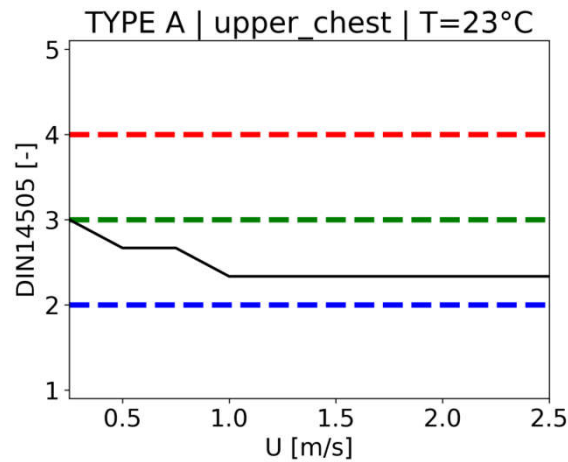
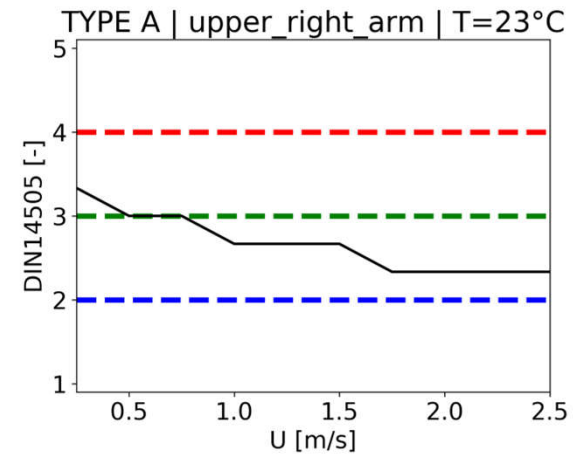
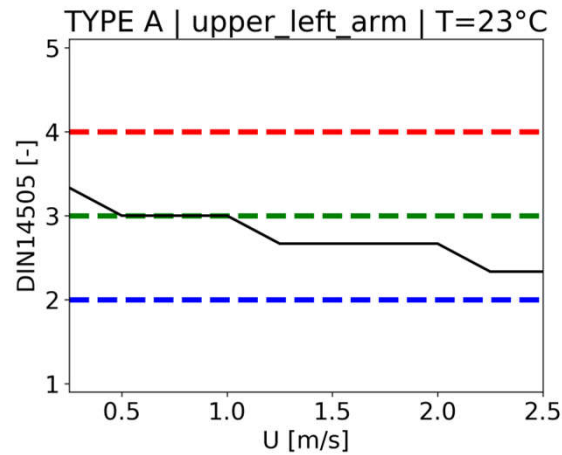
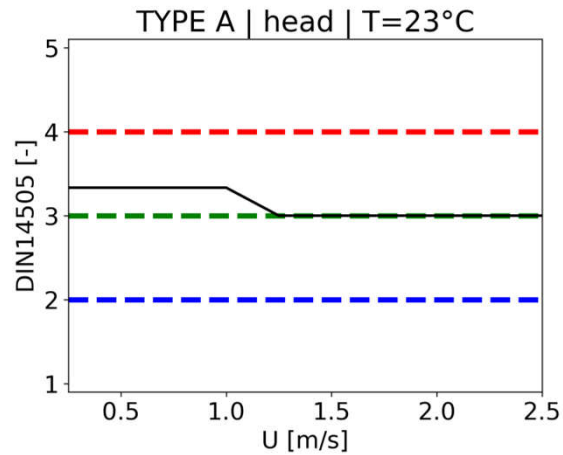
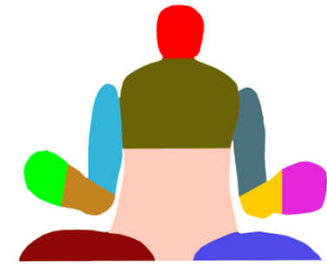
Äquivalenttemperatur für die Einströmvorrichtung A | Umgebungstemperatur $T = 23^{\circ}\text{C}$ in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit



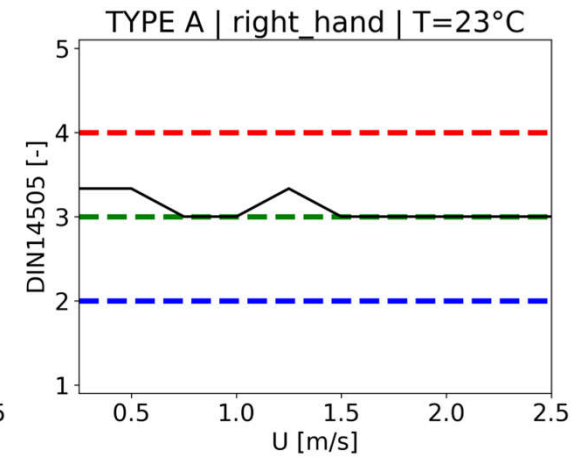
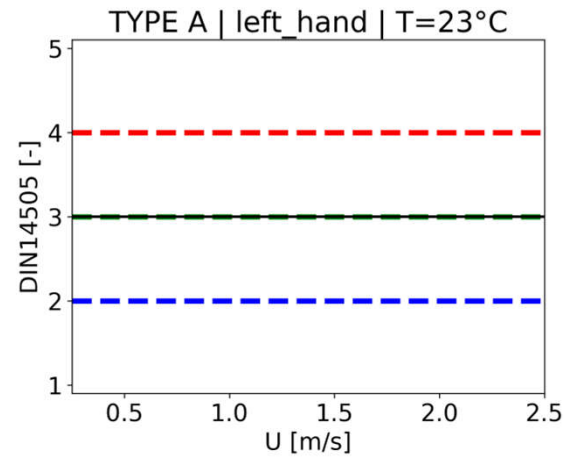
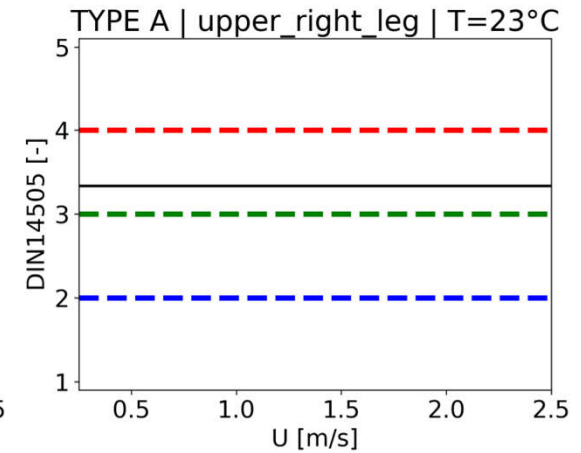
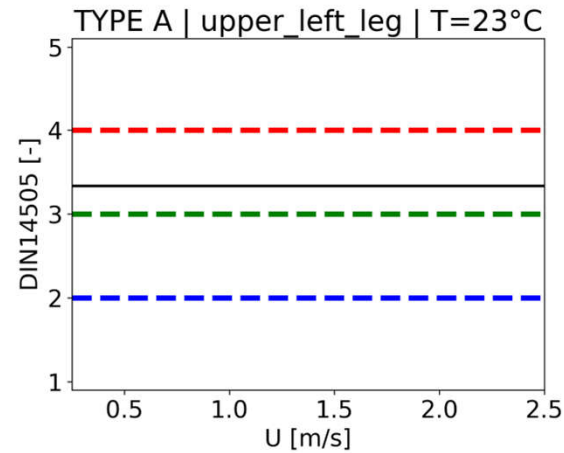
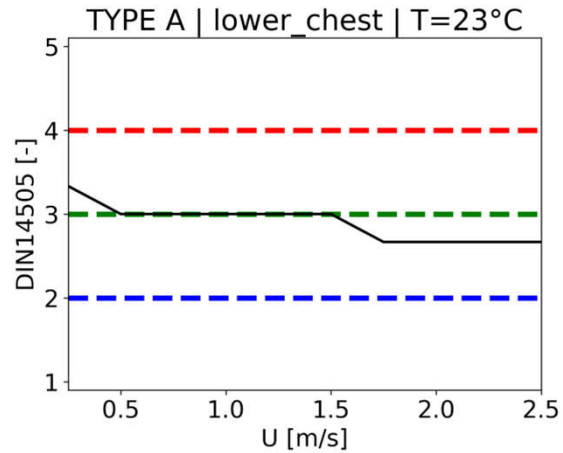
Thermischer Komfort für die Einströmvorrichtung A | Umgebungstemperatur $T = 23^{\circ}\text{C}$ in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit



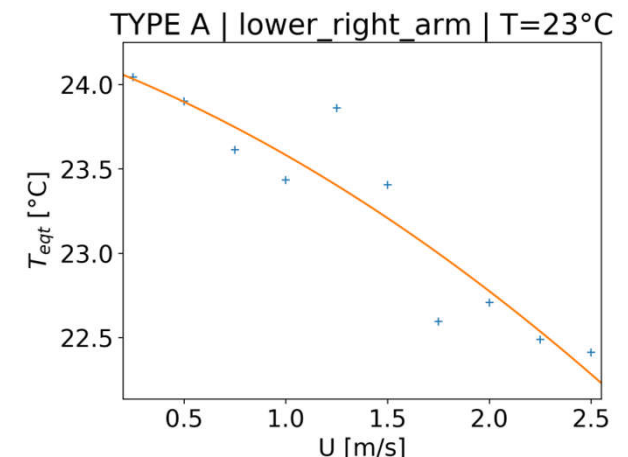
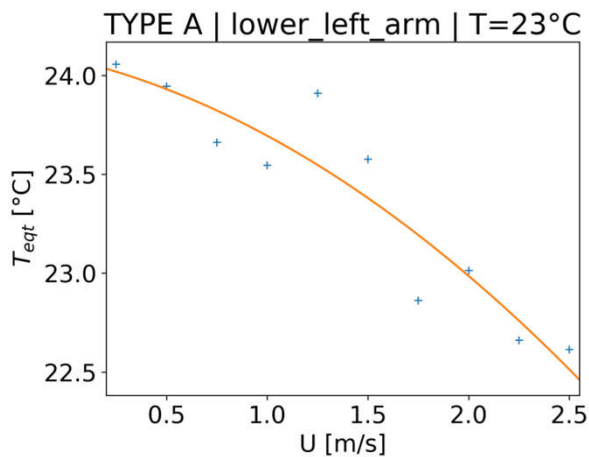
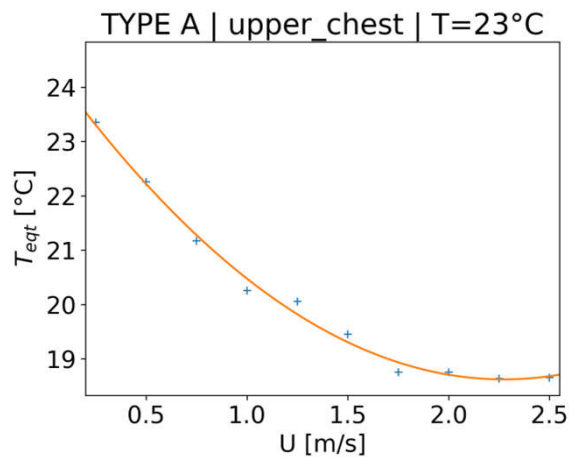
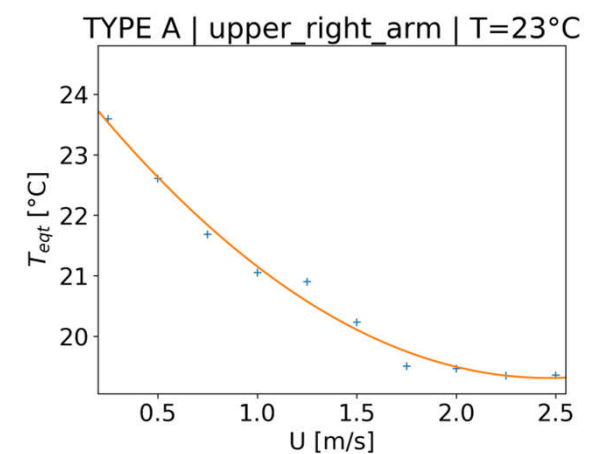
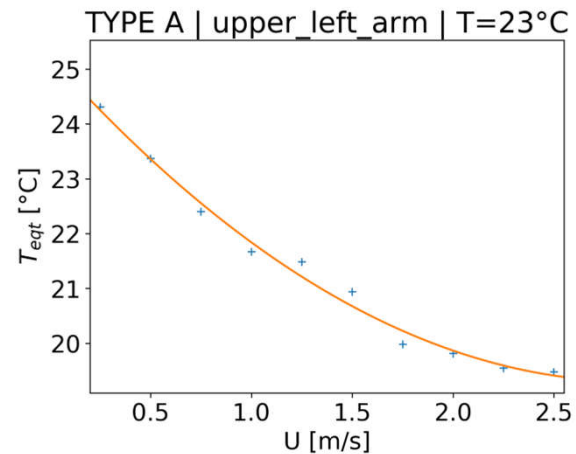
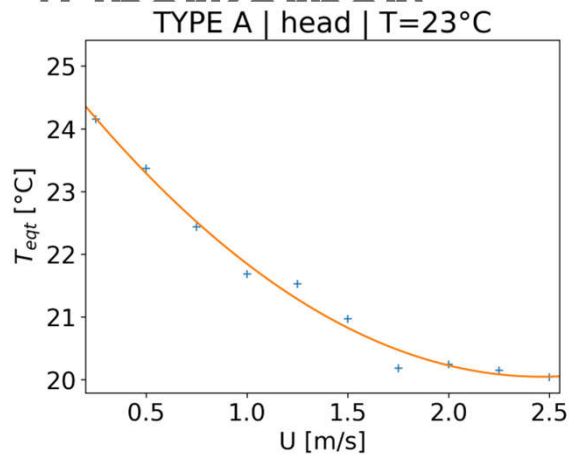
Konfiguration A – $T = 23^{\circ}\text{C}$ - Thermische Behaglichkeit als Funktion der Luftgeschwindigkeit (Oberkörper)



Konfiguration A – $T = 23^{\circ}\text{C}$ - Thermische Behaglichkeit als Funktion der Luftgeschwindigkeit (Unterkörper)



Konfiguration A – $T = 23^{\circ}\text{C}$ - EQT in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit



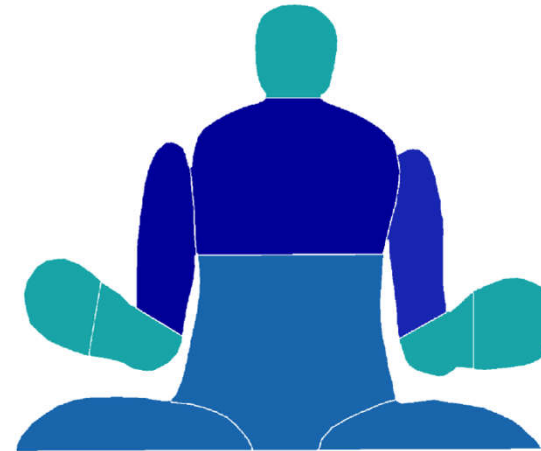
Vergleich von Konfiguration A und B | T = 20°C

U = 0.25 m/s

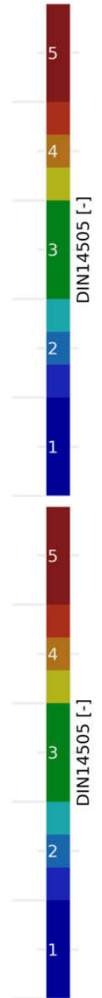
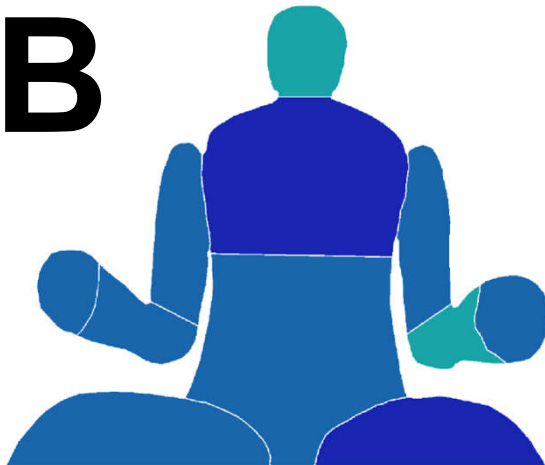
U = 0.75 m/s

U = 1.25 m/s

A



B



Vergleich von Konfiguration A und B | T = 23°C

U = 0.50 m/s

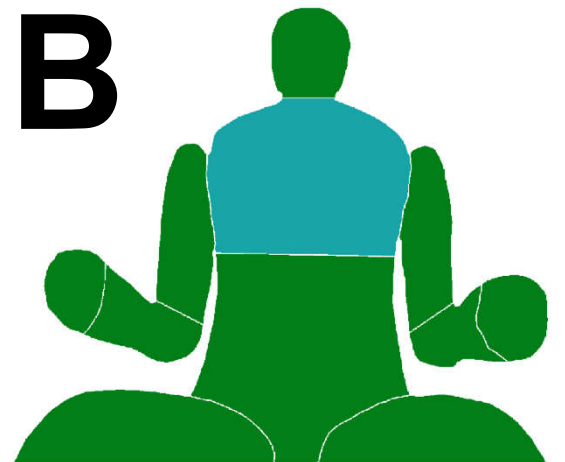
U = 1.25 m/s

U = 2.25 m/s

A



B



Vergleich von Konfiguration A und B | T = 26°C

U = 0.50 m/s

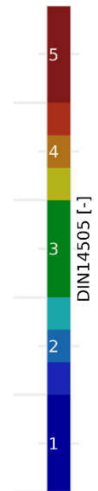
U = 1.25 m/s

U = 2.25 m/s

A



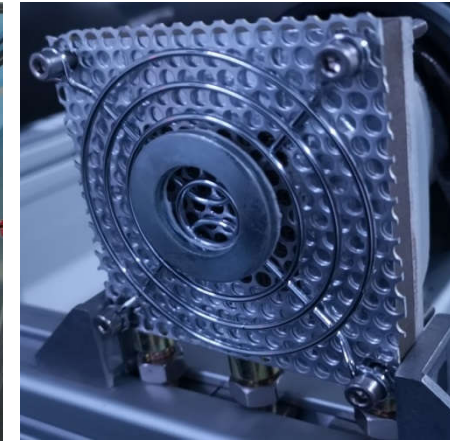
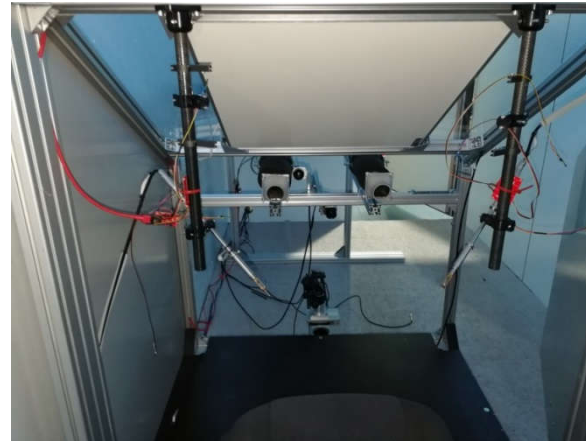
B



Einfluss der Strahlungswärme auf den thermischen Komfort



Versuchsanordnung Comfortis/Parameter



IR-Panel 0,5 m x 0,7 m

Konfiguration B

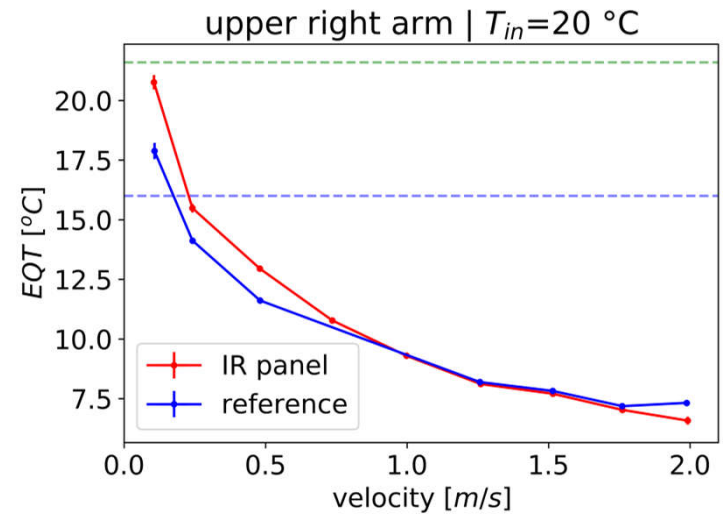
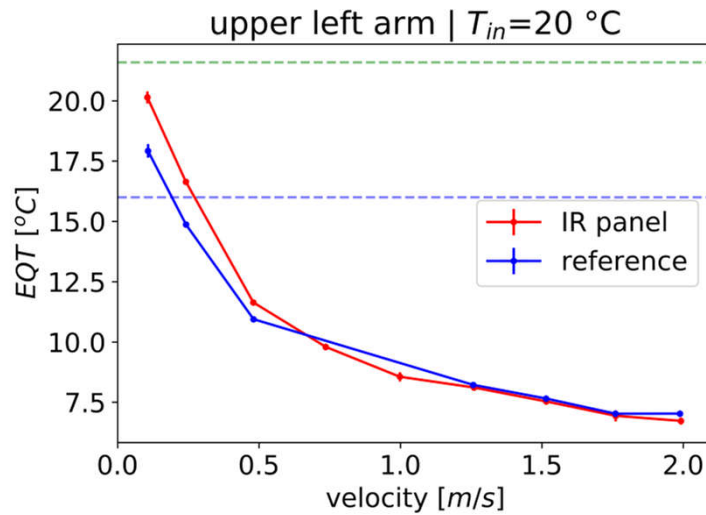
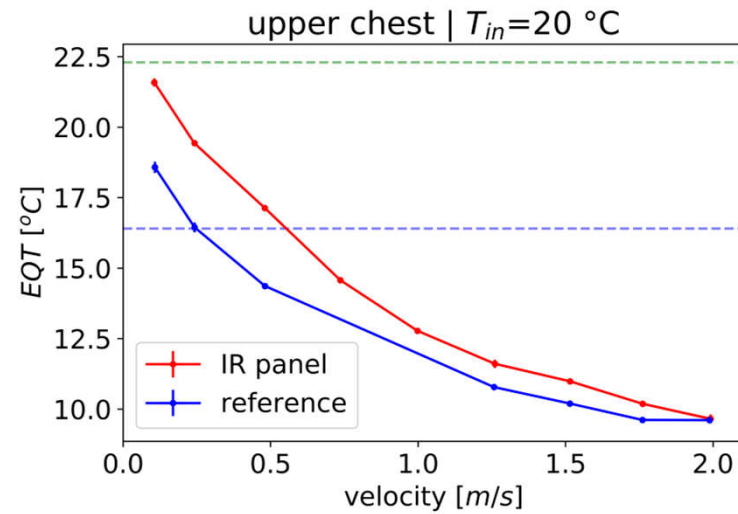
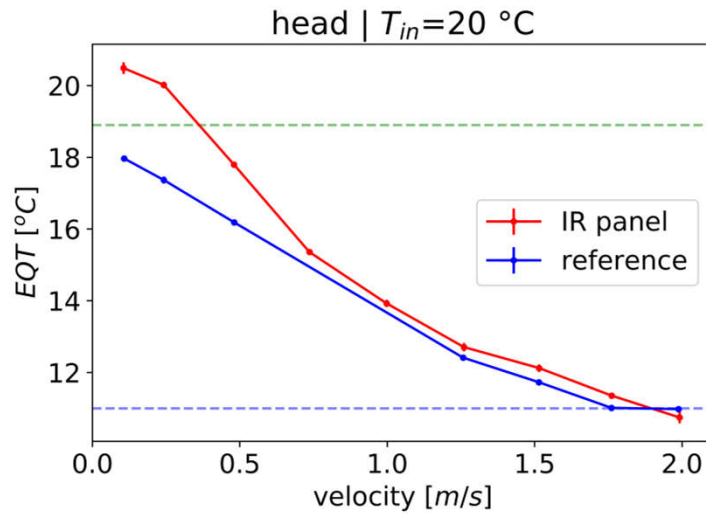
- Umgebungstemperatur 17°C und 20°C
- Einströmtemperatur 17°C, 20°C und 23°C
- IR-Panel-Strahlung 200 W/m² – 700 W/m²
- Geschwindigkeit 0,1 m/s – 2,0 m/s
- Turbulenzgrad = 32 %
- Keine Wärmeabgabe des TM



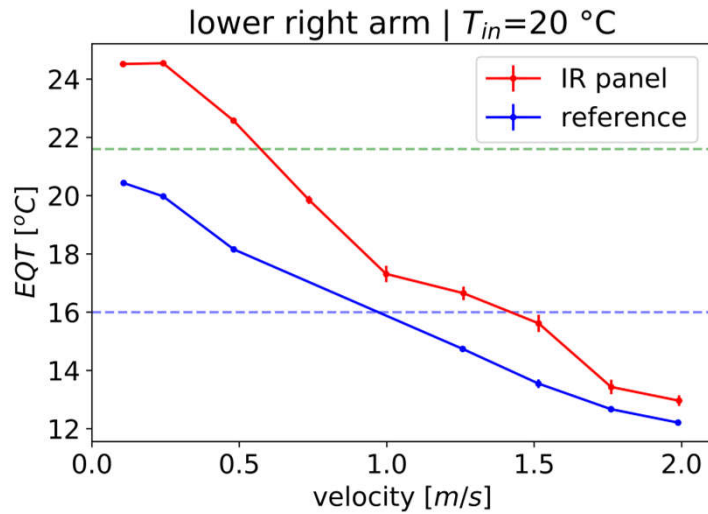
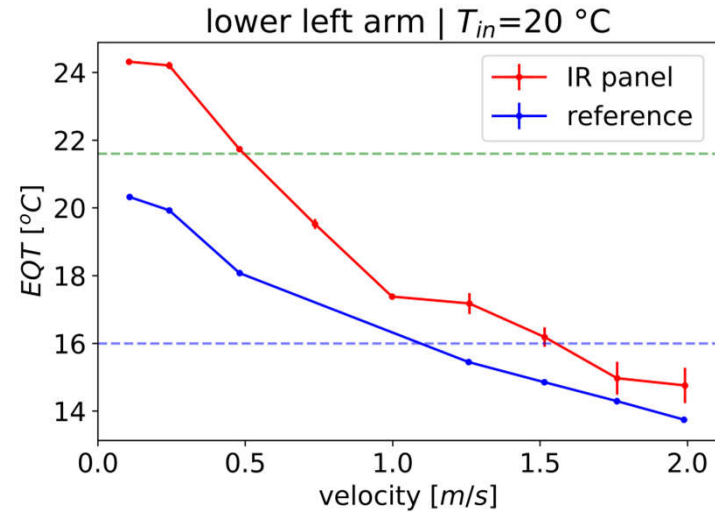
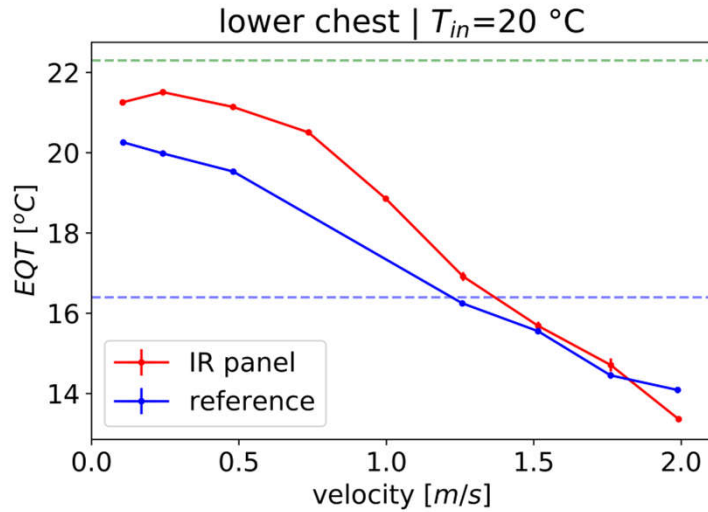
Umgebungstemperatur = 20°C
Einströmtemperatur = 20°C
IR-Panel = 200 W/m²



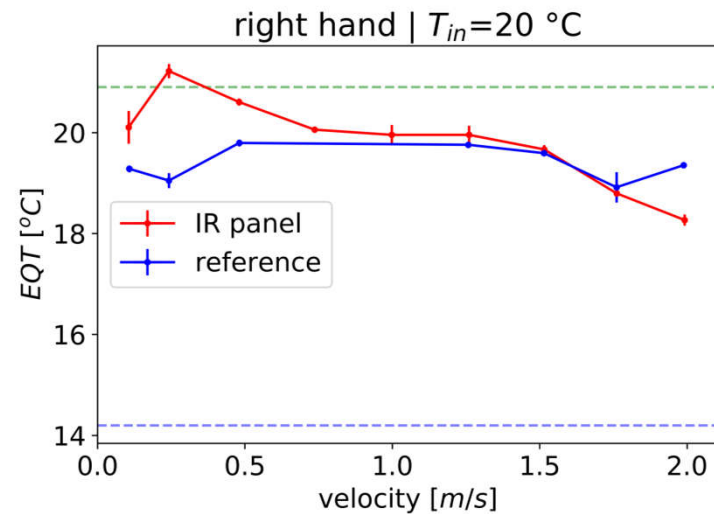
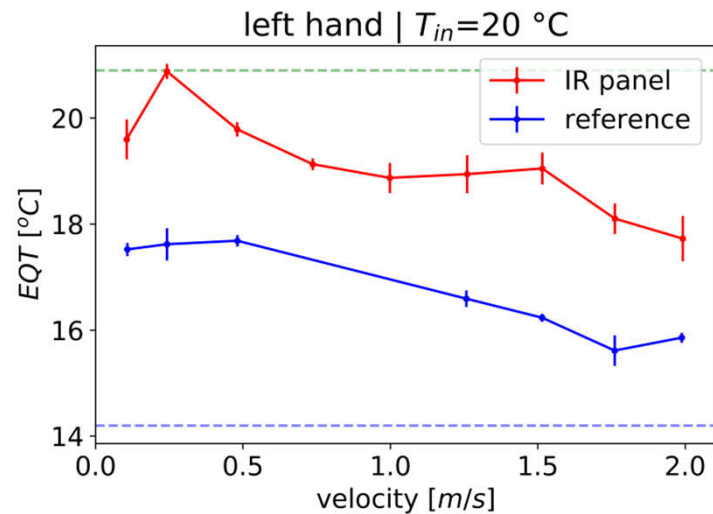
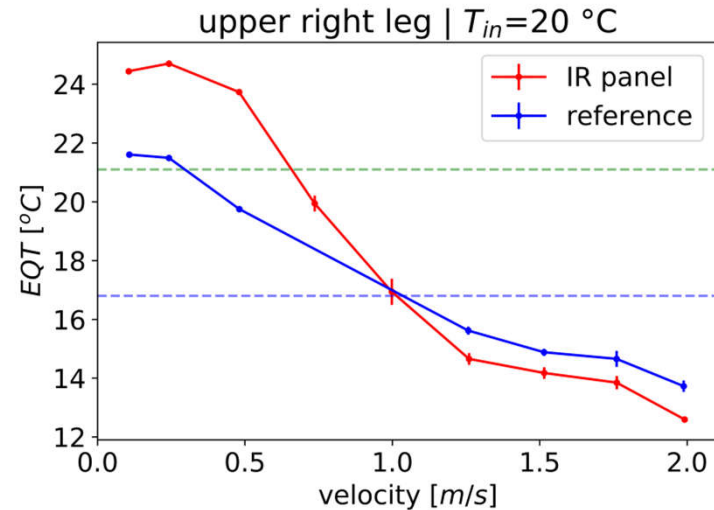
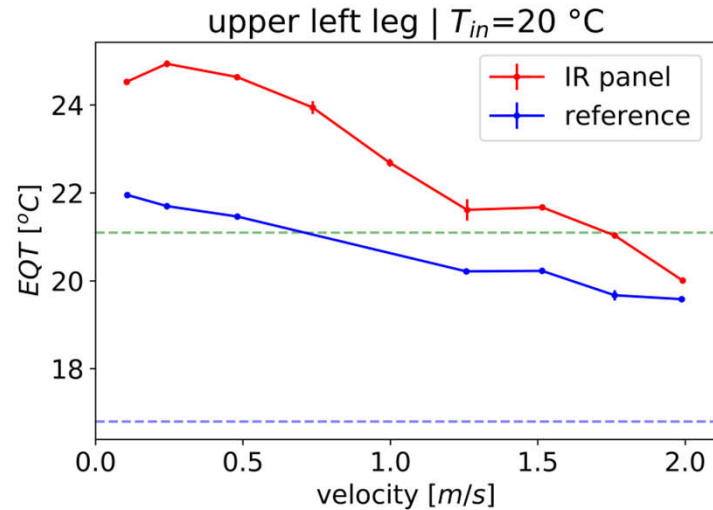
Äquivalenttemperatur als Funktion der Luftgeschwindigkeit $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$ | $T_U = 20^{\circ}\text{C}$



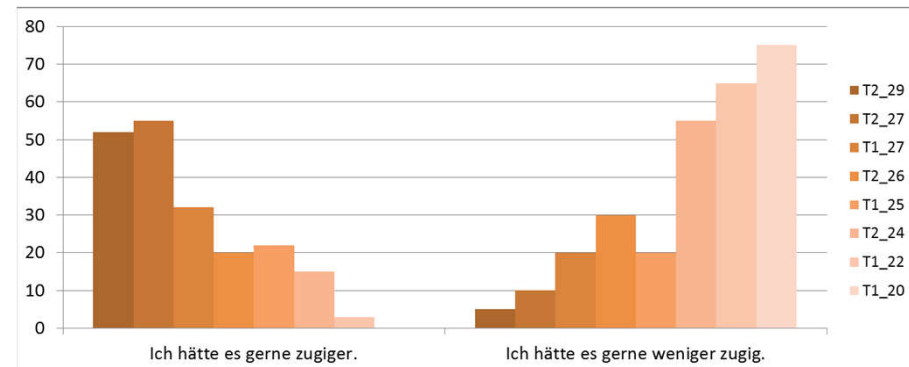
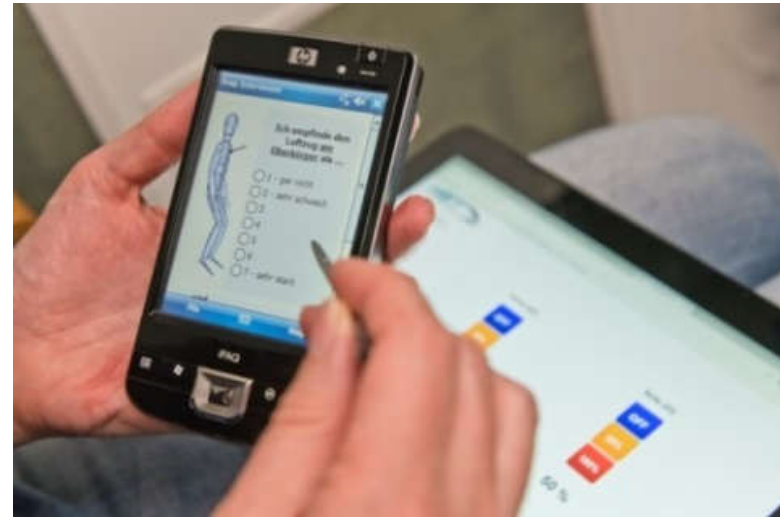
Äquivalenttemperatur als Funktion der Luftgeschwindigkeit $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$ | $T_U = 20^{\circ}\text{C}$



Äquivalenttemperatur als Funktion der Luftgeschwindigkeit $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$ | $T_U = 20^{\circ}\text{C}$



Probandenstudie



Zusammenfassung/Ausblick

- Luftgeschwindigkeiten im PKW werden häufig anders wahrgenommen
- Fragestellung: Wo liegt der Grenzbereich des Zugluftempfindens und wird Zugluft hinreichend durch die Normen abgebildet?
- Der objektive thermische Komfort bei Zugluft wurde untersucht als Funktion:
 - der Geschwindigkeit (0,1 m/s – 2,0 m/s)
 - zweier Turbulenzgrade
 - der Lufttemperatur (17°C – 29°C)
 - der Strahlungswärme
- Turbulenzgrad hat messbaren Einfluss auf den thermischen Komfort
- Steigende Geschwindigkeit führt zu deutlich geringeren Äquivalenttemperaturen
- Strahlung hat bei niedrigen Geschwindigkeiten einen deutlichen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit
- Vergleich objektiver und subjektiver thermischer Komfort



Acknowledgement

The project is founded by

**The Research Association of
Automotive Technology (FAT)**



Contact:

German Aerospace Center (DLR)
Institute of Aerodynamics and Flow Technology
Department of Ground Vehicles (AS-BOA)
Bunsenstrasse 10, 37073 Göttingen, Germany

Dr. rer. nat. Andreas Westhoff
Mail: andreas.westhoff@dlr.de
Phone: +49 (0) 551 709 2294

