SmartTex Netzwerk

Empa
Materials Science and Technology

# Charakterisierung und Kalibration von Wärmeflusssensoren für physiologische Messungen

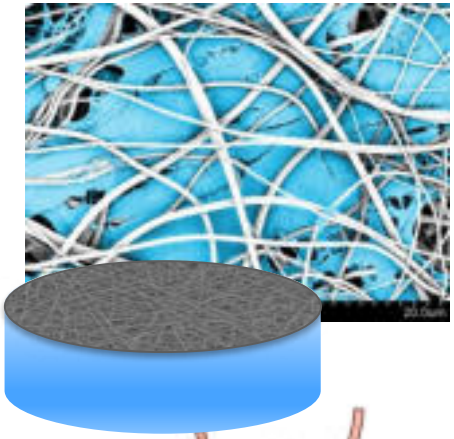
Yuki Nagae, Martin Camenzind, Pierrine Zeller
Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology

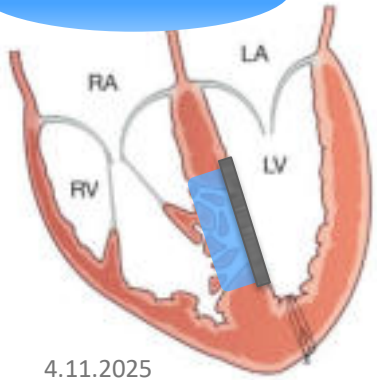
# Übersicht

- Empa - das Materialforschungsinstitut des ETH-Bereichs
- Wärmeflusssensoren
- Physiologie und Wärmehaushalt
- Kommerzielle Sensoren
- Testaufbau Empa
- Resultate
- Schlussfolgerungen und nächste Schritte

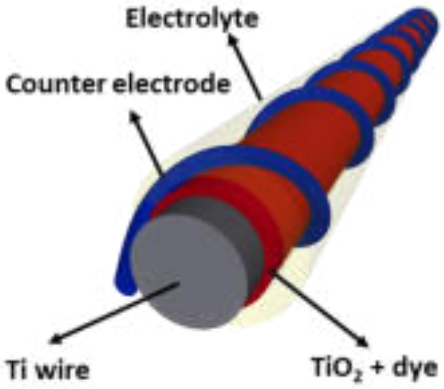
# Empa – Lab for Biomimetic Membranes and Textiles

## Medizinische Textilien

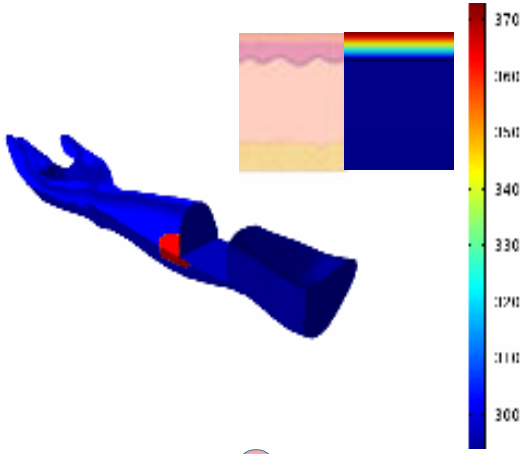


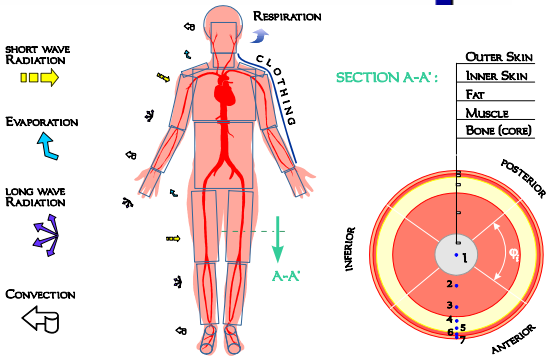



## Wearables und Biosensing




## Digital Health Solutions



# Flexible Wärmeflusssensoren

- Aktuelle Wärmeflusssensoren
  - Verschiedene Ansätze für flexible Wärmeflusssensoren werden in der Literatur beschrieben
  - Es gibt auch folienbasierte, dünne Sensoren
  - Bis jetzt gibt es keine textilbasierten, kommerziellen Produkte
- Anwendungen
  - Gebäudetechnik, Überwachung von Motoren
  - Physiologische Messungen, Energiebilanz, Wärmemanagement
  - Regelung/Kontrolle von Heizsystemen, z.B. Autositze
- Arten HF Sensoren
  - Differenzielle Wärmeflussmethode
  - Transverser Seebeck-Effekt
  - Kalorimetrische Methode

Quelle: Hukseflux (www.hukseflux.com)

# Kommerzielle Wärmeflussensoren

- Captec
  - Heat flux sensor
  - Radiant flux sensor

**Captec (cu1)**
(40mm× $40mm$ ×0.4mm)

**Captec (HF B/C)**
(40mm× $10mm$ ×0.4mm)

**Captec (RF1/2)**
(40mm× $10mm$ ×0.4mm)

- Huskeflux
  - Normal
  - Gold
  - Black

**Hukseflux** - (50mm× $50mm$ ×0.4mm)

Normal

Gold

Black

- Calera

**Calera** - (44mm× $28mm$ × 8.2mm)

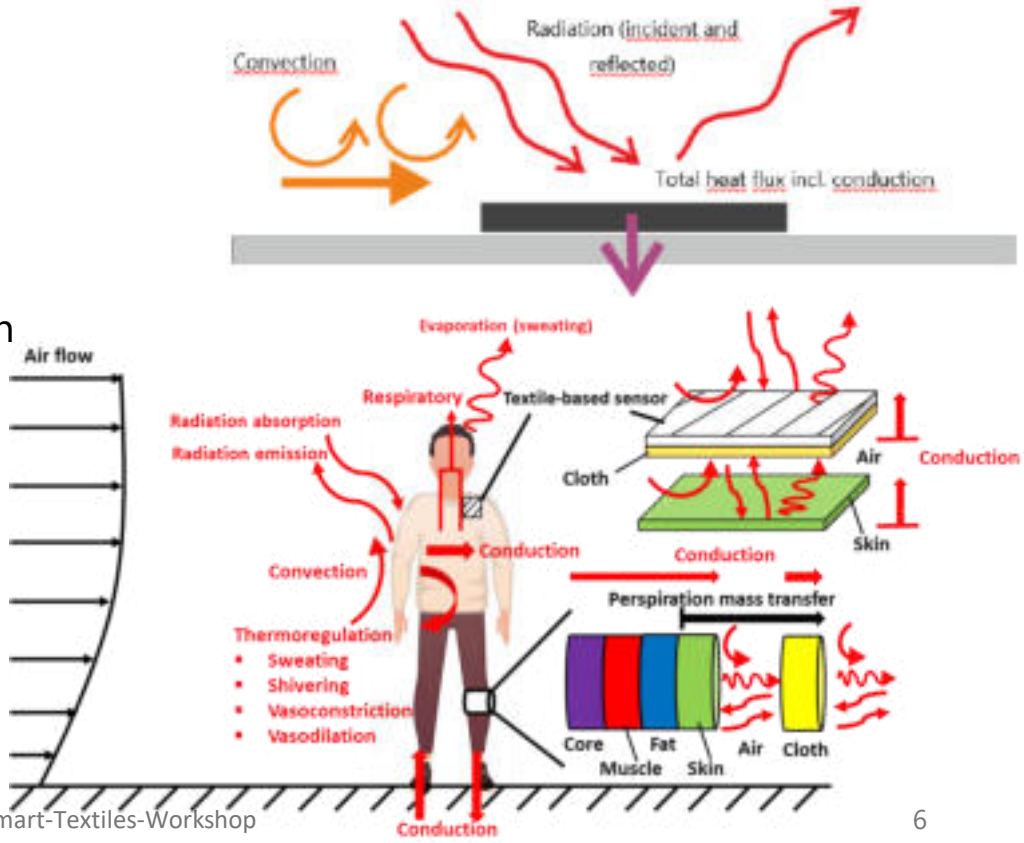
**Folienfühler oder Metallplättchen**

- Flexibilität, Kontakt Oberfläche
- Grösse/Volumen
- Oberflächenbeschaffenheit
- Elektronik/Stromversorgung nötig
- Calera: Logger mit Batterie

# Wärmeaustauschmechanismen

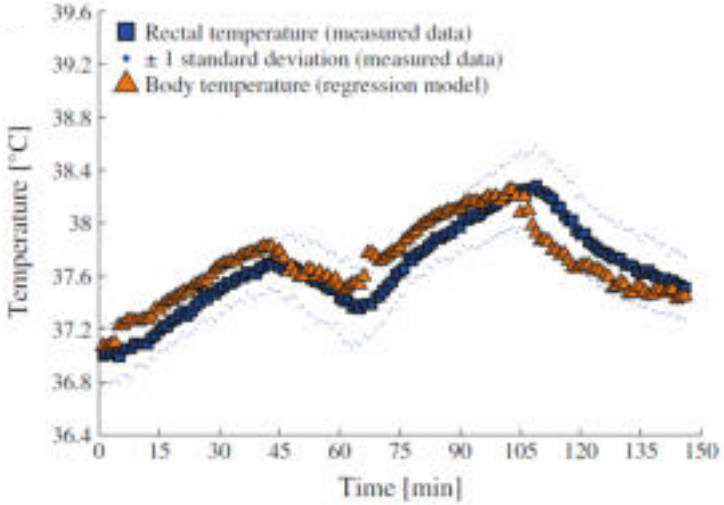
- Wärme kann über folgende physikalische Mechanismen übertragen werden
  - Wärmeleitung (Konduktion)
  - Strahlung
  - Konvektion

- Physiologische Messungen oft ein Mix aller Mechanismen
  - Wärmeverlust abhängig von Isolation
  - Luftschichten in Bekleidung
    - Konvektion
    - Strahlungsaustausch



# Vorhersage der Körperkerntemperatur

- Die Körperkerntemperatur ist eine wichtige Grösse für den thermischen Komfort und die Leistungsfähigkeit
- Die nichtinvasive Messung ist schwierig und oft ungenau
- Die Berechnung basierend nur auf Temperaturmessungen ist weniger genau als zusammen mit Wärmefluss
- Wärmeflussmessung in textilen Schichten ist weniger abhängig von der Platzierung als bei Temperatursensoren



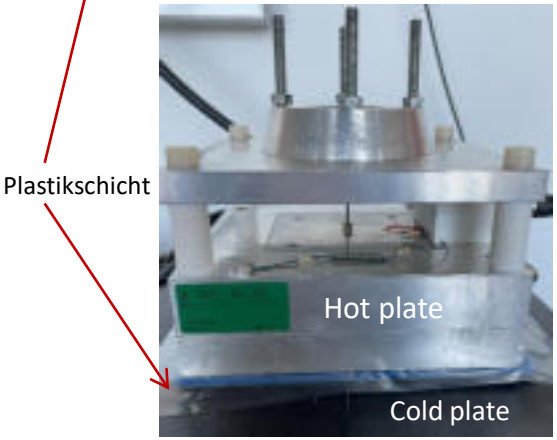

Niedermann et al., *Int. J. Biometeorol*, 2014

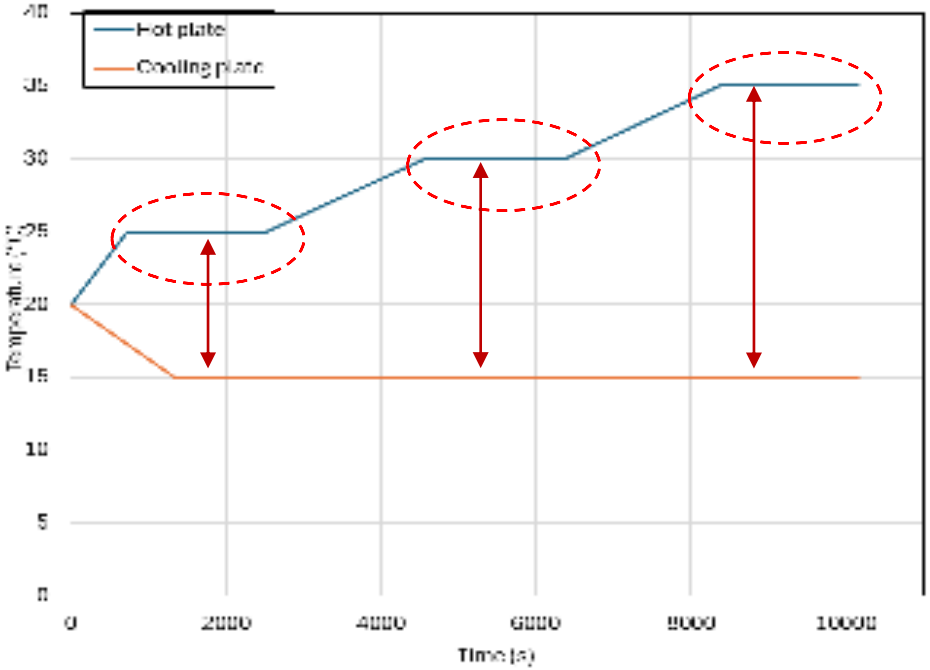
# Testaufbau Konduktion - Plattenkalorimeter

Messprotokoll
«warme» Platte (°C)/»kühle» Platte(°C)
25/15°C - 30/15°C - 35/15 °C

Datenauswertung

## Messsystem “Kalcos”

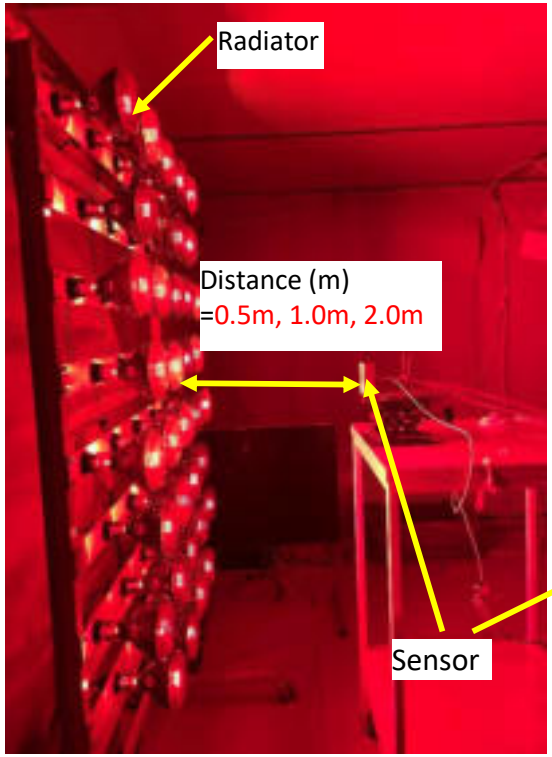


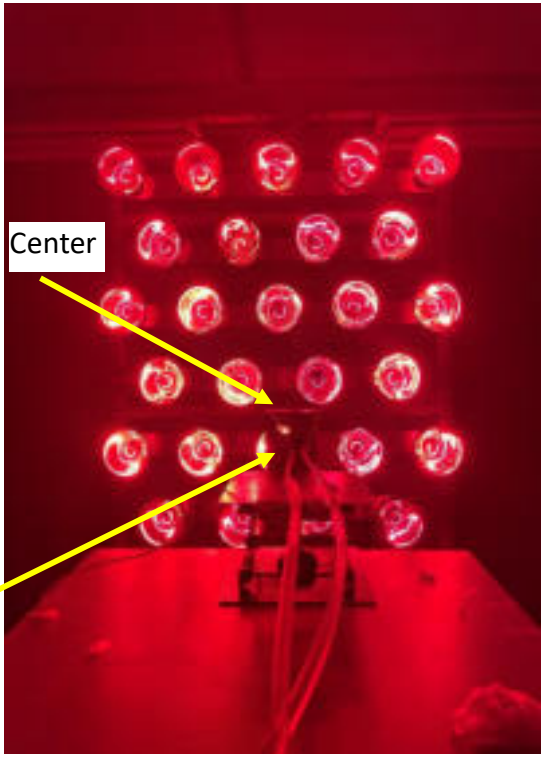




Messung mit Sensor und Schaumstoff: Wärmefluss über Temperaturdiff. und Materialeigenschaften

# Testaufbau Strahlungshitze

Lampenpanel (27 x Siccatherm mit je 150W)



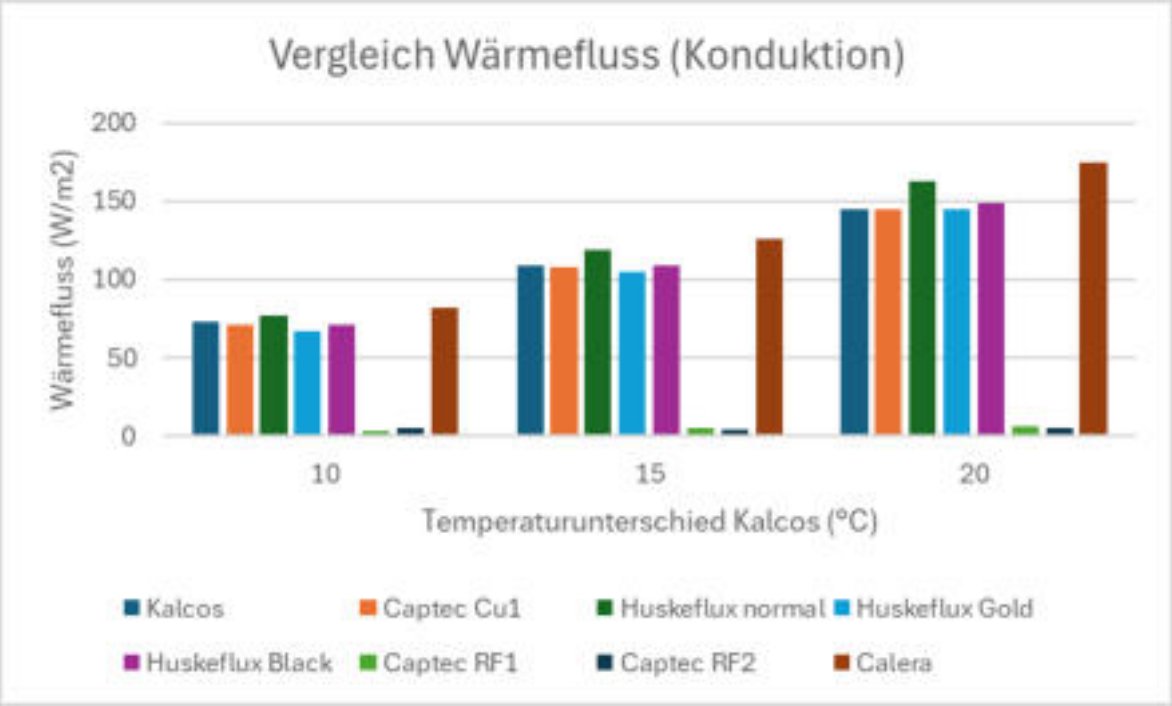

Definition Wärmestrom (Strahlung)

- Abstand Lampenpanel zum Sensor
- Anzahl der aktiven Lampen

- Referenz
  - Rückgeführter, wassergekühlter Schmidt-Boelter Sensor

# Resultate Konduktion (Plattenkalorimeter)

Messung zusammen m. Schaumstoff (d=5mm, $\lambda = 0.036$)



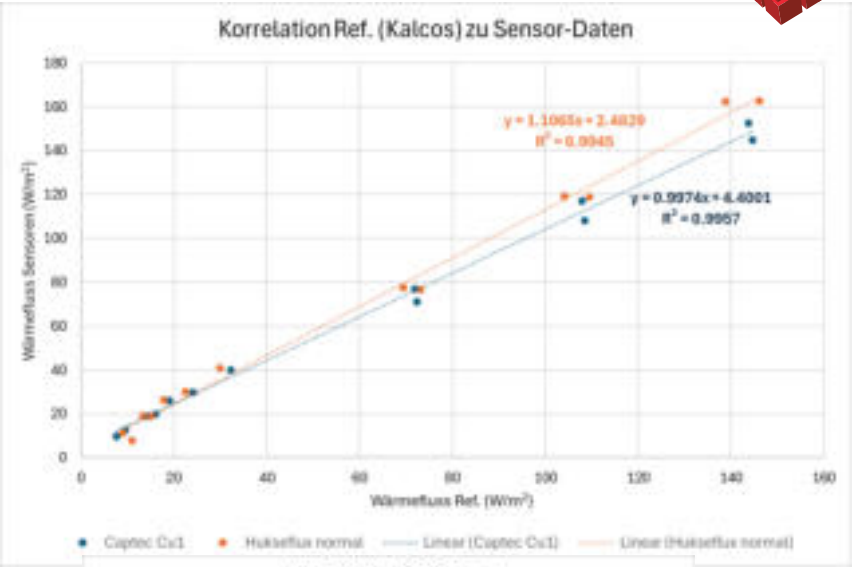

- Werte nach Stabilisierung (max. CV = 0.014)

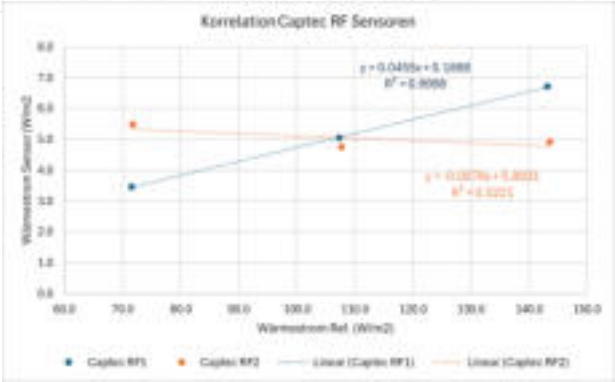
- Sensordaten vs Kalcos (Referenz)
- Captec Radiant HF Sensoren sind nicht geeignet für Konduktion
- Korrelation der meisten Sensoren zur Referenz > 0.9

# Kalibrationsfaktor (ausgewählte Sensoren)

- Kalibration mit dem Plattenkalorimeter Kalcos
- Variation Wärmefluss mittels Temperaturdifferenz der Platten und therm. Eigenschaften des Schaums
- Auswertung für Captec und Huskeflux Sensoren
  - Gute Korrelation ($R^2$ > 0.99)
  - Variation/kleine Unterschiede je nach Material
  - Steigung nahe bei 1 und kleiner Offset
    => Umrechnungswerte der Hersteller gut
- Auswertung für Captec RF Sensoren
  - Abhängigkeit zu Wärmestrom bedingt vorhanden
  - Umrechnungsfaktor deutlich anders (Faktor 20)

=> Leichte Abhängigkeit von Materialeigenschaften wird weiter untersucht (COMSOL Simulation)

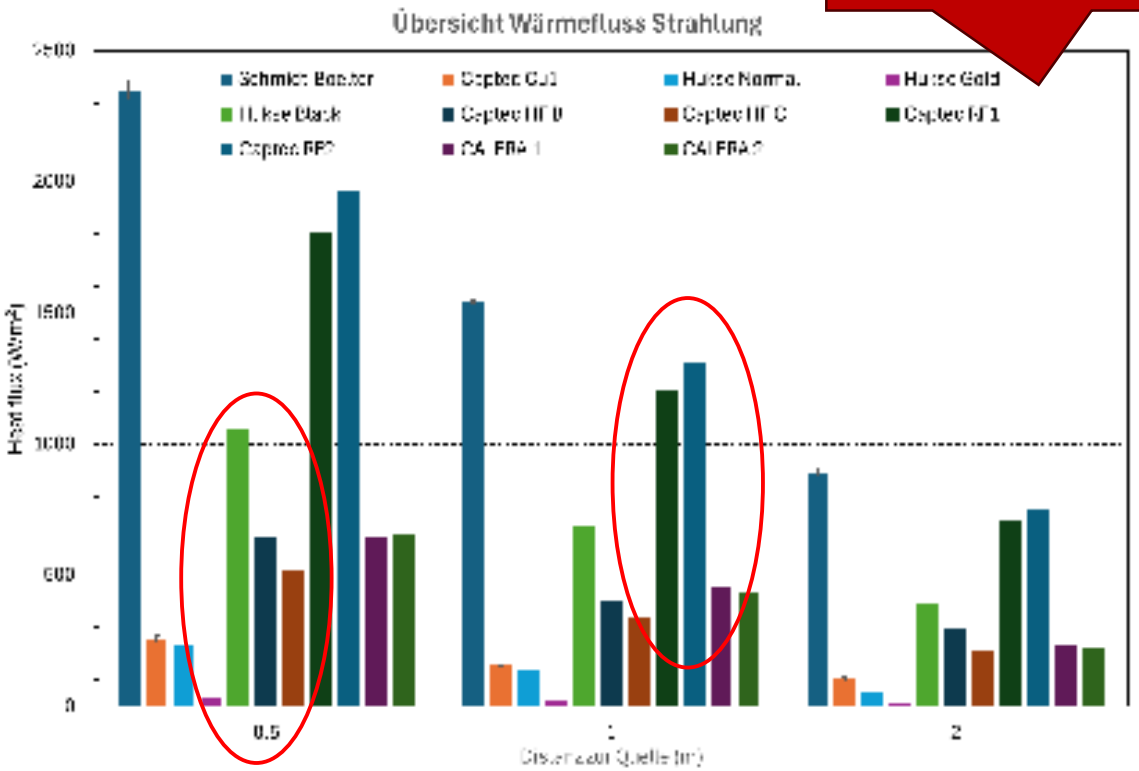


# Resultate Strahlungshitze

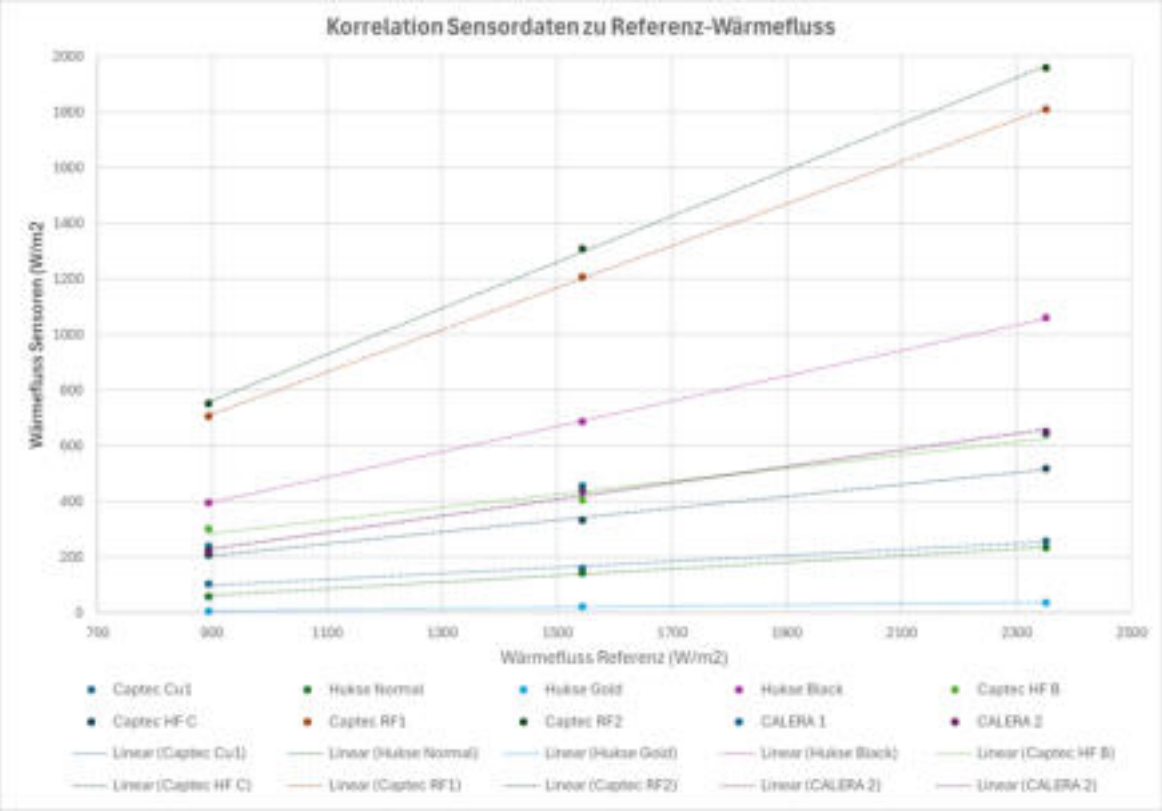
Mittelwert aus 3 Messungen

Werte nach Stabilisierung (max. CV=0.14)
Emissivität beeinflusst Messwert




- Kein Sensor zeigt den korrekten Wert
- Captec RF beste Werte
- Oberfläche Hukseflux relevant
- Abnahme des Wärmestroms mit zunehmender Distanz
- Kein Material hinter dem Sensor

# Kalibrationsfaktor (Strahlungshitze)

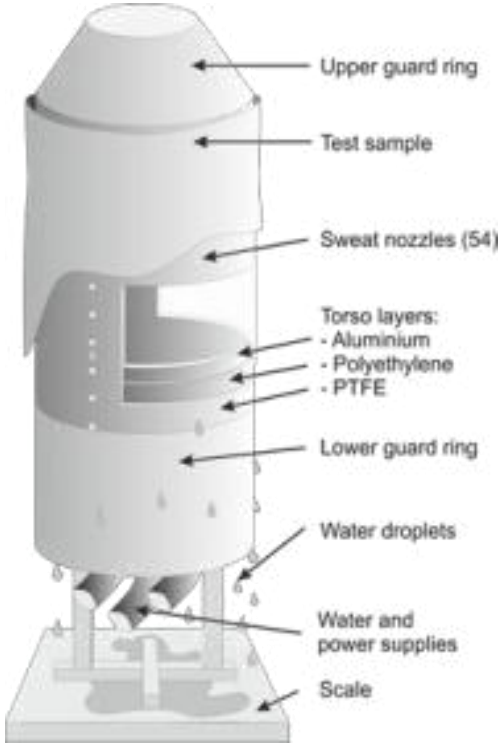


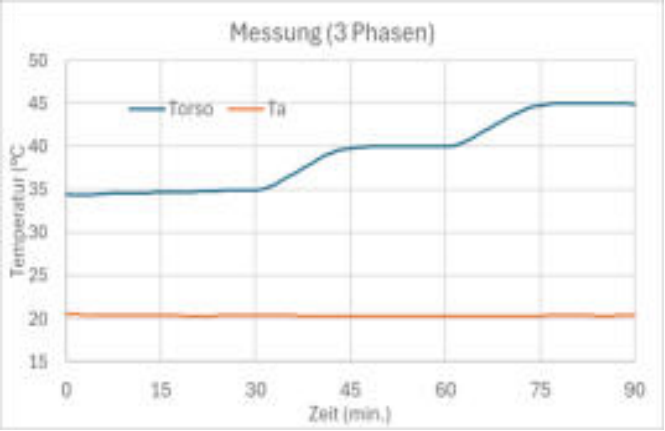

| | R2 | slope | intercept |
|---|---|---|---|
| Captec cu1 | 0.9931 | 9.33 | -23.75 |
| Hukse Normal | 0.9987 | 8.31 | 389.22 |
| Hukse Gold | 0.9942 | 48.53 | 546.36 |
| Hukse Black | 0.9999 | 2.20 | 26.18 |
| Captec HF B | 0.9754 | 4.14 | -261.76 |
| Captec HF C | 0.9978 | 4.68 | -58.24 |
| Captec RF1 | 0.9999 | 1.32 | -43.87 |
| Captec RF2 | 0.9997 | 1.21 | -21.98 |
| CALERA 1 | 0.9905 | 3.57 | 3.78 |
| CALERA 2 | 0.9955 | 3.37 | 126.83 |

- Kalibrationsfaktoren unterschiedlich zu konduktiver Wärmeübertragung
- Nicht alle Sensoren gleich gut geeignet für Strahlung

# Tests mit Sensoren und einem physiologischen Manikin

Torso-Messsystem: Simulation des menschlichen Rumpfs






- Einfluss textile Schichten und Sensorbefestigung
- Lokaler versus globaler Wärmestrom

- 3 Temperaturstufen (35°/40°/45°C)
- Aussentemperatur 20°C

2 x CALERA Sensoren
(44mm× $28mmm$ × 8.2mm)

1 2

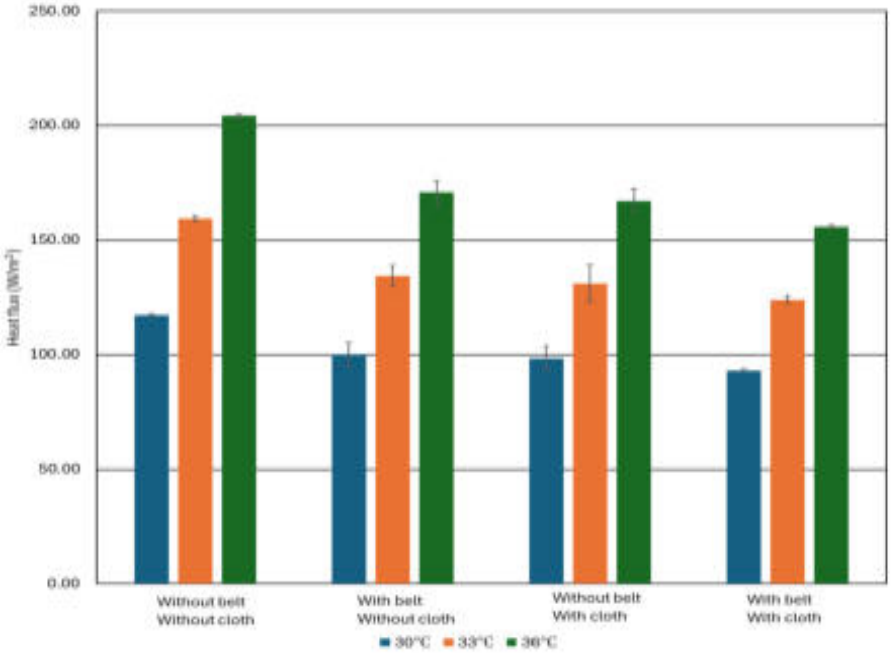
# Resultate Torso-Messungen

- Textile Schichten (Wärmeisolation) reduzieren den gemessenen Wärmestrom
- Der Gurt (Befestigung Sensor) beeinflusst die Sensormessung (Torso kaum)
- Temperaturmessung des Sensors ist tiefer als die des Manikins

## Herausforderung

- Befestigung ohne Beeinflussung der Messung
- Dicke und Strahlungsdurchlässigkeit der textile Schichten

Nur Sensor | Sensor m. Shirt | Sensor m. Gurt | Sensor mit Shirt/Gurt



# Schlussfolgerungen

- Testaufbauten und Referenzsensoren funktionieren
  - Konduktion mit Plattenkalorimeter «Kalcos»
  - Strahlungshitze mit Lampenpanel
- Sensorkonzept/kommerzielle Sensoren
  - Sensordimension (Fläche, Dicke) -> Messbereich/Empfindlichkeit, Flexibilität
  - Messumgebung, textile Schichten -> Sensor als Störelement
  - Oberflächeneigenschaften (Farbe, Deckschicht) -> Strahlungshitze/Wärmeleitung
  - Physiologische Eigenschaften -> Wasserdampfdurchlässigkeit
- Untersuchte Sensoren
  - Die meisten Sensoren eignen sich für konduktive oder Strahlungs-Wärmeübertragung
  - Abgleich (Kalibration) für jeweilige Anwendung ist wichtig
  - Wenn lokal zusätzliche textile Schichten verwendet werden, muss deren Einfluss korrigiert werden
  - Für Probandenversuche sind kompakte Logger eine gute Lösung

# Nächste Schritte

- Optimaler Sensor für physiologische Messungen
  - Grösse/Dicke, Oberflächen- und thermische Eigenschaften anpassbar
  - Flexibilität, Atmungsaktivität
  - => Textiler Sensor
- Simulation der Wärmeübertragung mit COMSOL zum besseren Verständnis und Quantifizierung aller Effekte
- Entwicklung eines textilen Wärmeflusssensors
  - Hohe Flexibilität
  - Grösse/Dicke skalierbar
  - Emissivität kann über textile Parameter verändert werden

# Empa – The Place where Innovation Starts

+41 58 765 73 42
martin.camenzind@empa.ch

empa.ch/BioMemTex