

## Der Klimaindex UTCI zur Simulation des thermischen Komforts in urbanen Umgebungen

Peter BRÖDE<sup>1</sup>, Eduardo L. KRÜGER<sup>2,3</sup>, Dusan FIALA<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *Leibniz-Institut für Arbeitsforschung (IfADo), Ardeystraße 67, D-44139 Dortmund*

<sup>2</sup> *Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR*

*Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 4900, 81280-340 Curitiba - PR, Brasil*

<sup>3</sup> *Karlsruher Institut für Technologie, Fachgebiet Bauphysik & Technischer Ausbau  
Englerstr. 7, D-76131 Karlsruhe*

<sup>4</sup> *ErgonSim — Comfort Energy Efficiency, Holderbuschweg 47, D-70563 Stuttgart.*

**Kurzfassung:** Vorhersagen des 'Universal Thermal Climate Index' (UTCI) zum thermischen Empfinden von Passanten wurden mit Befragungen von 2252 Fußgängern aus Curitiba, Brasilien, und Glasgow, UK verglichen. Die Prognosen stimmten im Mittel gut mit den Beobachtungen überein, wobei in Glasgow das Empfinden etwas wärmer bzw. weniger kalt war als vorhergesagt. Mit über 90% Varianzanteil dominierten interindividuelle Unterschiede den Vorhersagefehler. Alter, Geschlecht, Körperbau, Stadt-Morphologie, Klimabereich und Bekleidungsverhalten erklärten kaum Varianz, aber Region und Wetter am Vortag zeigten Effekte. Dies deutet auf einen Einfluss von Anpassung und Erwartungshaltung. Die Resultate zeigen die Validität der UTCI-Prognosen auf Populationsebene, jedoch auch Grenzen in der individuellen Modellierung des thermischen Komforts.

**Schlüsselwörter:** Klima, Thermophysiologie, Komfort, Simulation, Modell, Validierung

### 1. Einleitung

Der 'Universal Thermal Climate Index' (UTCI) bewertet die Beanspruchung durch Kälte- und Hitzebelastungen in biometeorologischen Anwendungen in Wettervorhersagen, Hitzewarnsystemen, Stadtplanung oder Klimafolgenforschung. Er basiert auf einem komplexen thermoregulatorischen Modell (Fiala et al. 2012), welches, mit einem Bekleidungsmodell (Havenith et al. 2012) gekoppelt, verschiedene Beanspruchungsgrößen bei unterschiedlichen Klimabedingungen simuliert. Der daraus in Form einer Äquivalenztemperatur entwickelte Index ermöglicht den Vergleich und die Bewertung der Wirkungen von Lufttemperatur, Luftfeuchte, Wärmestrahlung und Luftgeschwindigkeit auf den menschlichen Organismus (Bröde et al. 2012).

Frühere Vergleichsstudien belegten eine gute Übereinstimmung des UTCI mit der in experimentellen Studien ermittelten thermophysiologischen Beanspruchung bei Wärme (Kampmann et al. 2011) und mit international standardisierten Bewertungsverfahren von Kälte- und Wärmebelastungen (Bröde & Kampmann 2010). Dieser Beitrag fokussiert auf Aspekte des thermischen Komforts im urbanen Umfeld und vergleicht Vorhersagen des UTCI-Fiala Modells mit Befragungen in Curitiba, Brasilien (Krüger & Rossi 2011), und Glasgow, Großbritannien (Krüger et al. 2013).

## 2. Methoden

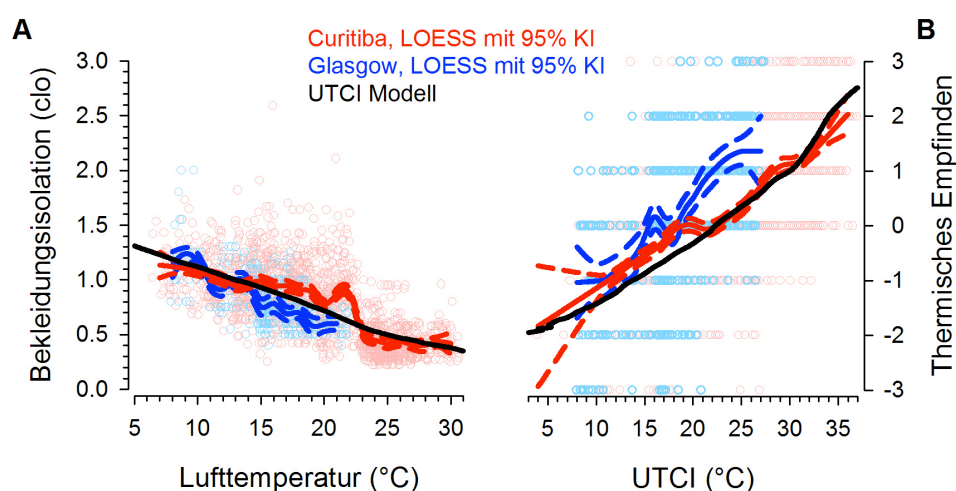
In 2252 Interviews von Passanten in Curitiba (n=1685) und Glasgow (n=567) wurden demografische Angaben sowie das thermische Empfinden (TE) auf einer standardisierten 7-stufigen Skala (-3:kalt,...,0:neutral,...,+3:heiß) nach ISO 10551 (1995) erhoben und die Isolationswerte der getragenen Bekleidung aus Standardtabellen (DIN EN ISO 9920 2009) geschätzt. Aus den parallel gemessenen Lufttemperaturen, Luftgeschwindigkeiten, relativen Luftfeuchten und mittleren Strahlungstemperaturen wurden die entsprechenden UTCI Werte (Bröde et al. 2012) und das mit dem UTCI-Fiala Modell simulierte TE (Fiala et al. 2003) berechnet.

Trends in der Bekleidungsisolation und im TE in Abhängigkeit von der Lufttemperatur bzw. UTCI wurden mit stückweise definierten Glättungspolynomen (LOESS) untersucht (Zuur et al. 2009). Aus der Differenz des simulierten zum beobachteten TE wurden der mittlere Vorhersagefehler (Bias) und root-mean-squared error (rmse) errechnet. Der Einfluss von Stadt, Alter, Geschlecht, Körperbau (Body-Mass-Index BMI), Morphologie des Befragungsorts (offener Platz, Straßenschlucht), UTCI-Klimabereich (Kälte, moderates Klima, Wärme) und Bekleidungsverhalten auf den Vorhersagefehler wurde durch Varianzkomponenten-Berechnungen mittels ANOVA ermittelt (Littell et al. 1996).

Für Glasgow wurden zusätzlich aus zurückliegenden Wetterdaten gemittelte UTCI-Werte mit unterschiedlicher Latenz zwischen einem Tag und acht Wochen vor der Befragung berechnet. Der Einfluss dieser unterschiedlich weit zurückreichenden UTCI-Werte auf den Vorhersagefehler wurde mit LOESS untersucht und die Anpassung mit Akaikes Informationskriterium (AIC) bewertet (Zuur et al. 2009).

## 3. Ergebnisse

Erwartungsgemäß nahm die Bekleidungsisolation mit zunehmender Temperatur ab (Abb. 1A), während das TE mit zunehmender Temperatur von kühl nach warm anstieg (Abb. 1B). Dabei streuten die Einzelbeobachtungen enorm.



**Abbildung 1:** Individuelle Beobachtungen in Curitiba und Glasgow mit Glättungskurven (LOESS) und 95%-Konfidenzintervall (KI) sowie Prognosen des UTCI Modells für die Isolation der getragenen Bekleidung in Relation zur Lufttemperatur (A) und für das thermische Empfinden (-3:kalt,-2:kühl,-3:etwas kühl,0:neutral,+1:etwas warm,+2:warm,+3:heiß) in Abhängigkeit von UTCI (B).

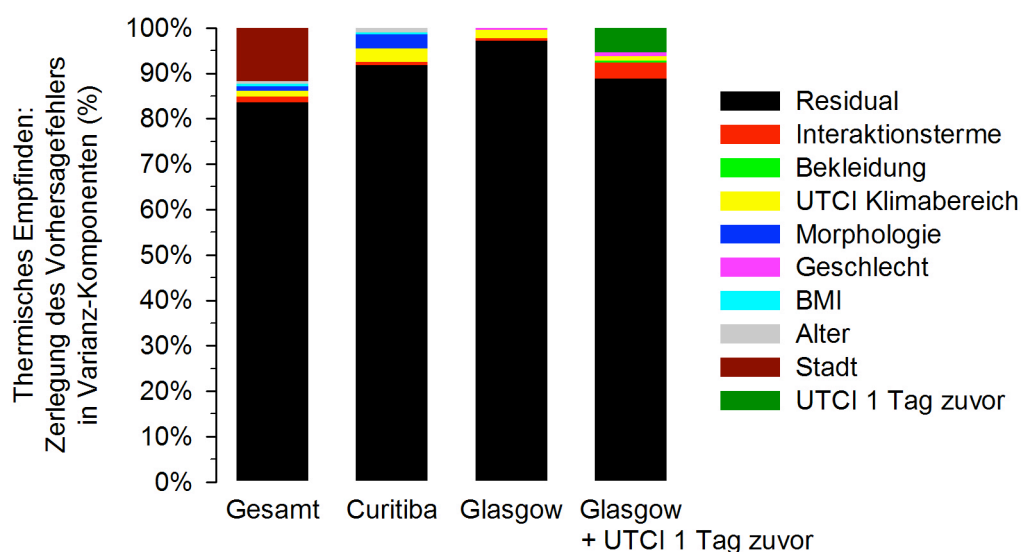
**Tabelle 1:** Anzahl der Befragten (*n*), mittlerer Vorhersagefehler (*Bias*) und root-mean-squared error (*rmse*) sowie Pearson-Korrelation (*r*) zwischen vorhergesagtem und beobachtetem thermischen Empfinden für beide Städte und die Gesamtstichprobe.

	Curitiba	Glasgow	Gesamt
<b>n</b>	1685	567	2252
<b>Bias</b>	-0,13	-0,73	-0,28
<b>rmse</b>	0,96	1,44	1,10
<b>r</b>	0,62	0,46	0,54

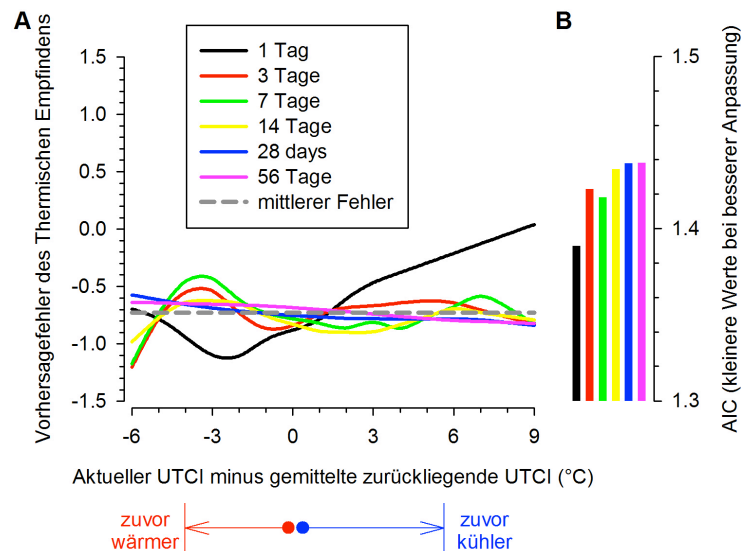
Das vorhergesagte TE stimmte in Curitiba gut mit den Beobachtungen überein mit einem vernachlässigbaren Bias (-0,13) und  $rmse < 1$ . Auch in der Gesamtstichprobe war die Übereinstimmung zufriedenstellend (Tabelle 1). In Glasgow jedoch war das beobachtete TE wärmer bzw. weniger kalt ( $Bias = -0,73$ ) als vorhergesagt bei erhöhtem  $rmse = 1,44$ . Dies zeigte sich insbesondere im Temperaturbereich von 15 bis 23 °C mit einer in Glasgow im Vergleich zu Curitiba reduzierten Bekleidungsisololation bei gleichzeitig wärmerem TE (Abb. 1).

Die in Abb. 2 dargestellte Varianzkomponenten-Analyse belegte für beide Städte keinen wesentlichen Einfluss der untersuchten Faktoren auf den Vorhersagefehler, der zu über 90% durch die inter-individuelle Residualvarianz dominiert wurde. Für die Gesamtstichprobe erklärte die Region (Stadt) etwa 12% Varianzanteil.

In der zusätzlich für Glasgow durchgeführten Analyse zur Wirkung zurückliegender Wetterbedingungen zeigte nur der UTCI-Wert vom Vortag einen systematischen Einfluss auf den Vorhersagefehler (Abb. 3A), der sich insbesondere bei vorhergehender Kälte reduzierte, während bei größerer Latenz die Kurven um den mittleren Fehler ( $Bias = -0,73$ , Tabelle 1) oszillierten und weniger gute Anpassungen lieferten (Abb. 3B). Die Berücksichtigung des Wetters vom Vortag bei der Analyse der Varianzkomponenten in Glasgow reduzierte die Residualvarianz von 97% auf 89% (Abb. 2).



**Abbildung 2:** Prozentuale Zerlegung des Vorhersagefehlers des thermischen Empfindens in Varianzkomponenten für die Gesamtstichprobe sowie getrennt für beide Städte und zusätzlich für Glasgow unter Berücksichtigung des UTCI vom Vortag.



**Abbildung 3:** Glättungskurven (LOESS) des Vorhersagefehlers in Abhängigkeit zur Differenz des aktuellen UTCI zum über verschiedene Latenzen gemittelten zurückliegenden UTCI für die Stichprobe aus Glasgow (A). Akaikes Kriterium (AIC) wurde zur Bewertung der Güte der Modellanpassung verwendet (B).

#### 4. Diskussion

Die Befragungen bestätigten das UTCI-Bekleidungsmodell und das prognostizierte Komfortempfinden. Bemerkenswert ist dabei die gute Übereinstimmung für das subtropische Curitiba, wo sich für die Simulationsrechnungen mit  $r=0,62$  eine ähnlich hohe Korrelation zwischen vorhergesagtem und beobachtetem thermischen Empfinden ergab wie für die in der Originalarbeit entwickelten empirischen Regressionsgleichungen mit  $r=0,67$  (Krüger & Rossi 2011). Dabei hat im praktischen Einsatz UTCI gegenüber empirischen Modellen den Vorteil, ohne zusätzliche Kalibrationsstudien mit ausgedehnten Befragungen auszukommen, sondern lediglich physikalische Messungen oder Simulationen der Klimagrößen zu benötigen.

Die Tatsache, dass der Vorhersagefehler von äußeren, demographischen und anthropometrischen Faktoren weitgehend unabhängig war, stützt die universelle Einsetzbarkeit des UTCI. Regionale Unterschiede wie hier zwischen Glasgow und Curitiba traten auch in früheren Studien auf (Nikolopoulou & Lykoudis 2006), was zusammen mit dem Einfluss des zurückliegenden Wetters auf eine mögliche moderierende Wirkung von Anpassung und Erwartungshaltung auf den thermischen Komfort hindeutet (Nikolopoulou & Steemers 2003).

#### 5. Schlussfolgerung

Der hier gefundene hohe Anteil der Residualvarianzen beschreibt gegenwärtige Grenzen der individuellen Modellierung des thermischen Komforts. Dagegen lieferte das UTCI-Modell auf Populationsebene, speziell für das subtropische Curitiba, akzeptable Vorhersagen des Komfortempfindens.

Dies bestätigt zusammen mit der bereits früher gezeigten guten Prognose thermophysiological Beanspruchungen durch Hitze und Kälte die universelle Validität des UTCI für den gesamten Klimabereich.

## 6. Literatur

- Bröde P, Kampmann B (2010) Vergleich des Klimaindex UTCI mit international standardisierten Verfahren zur Bewertung von Hitze- und Kältebelastungen. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg), Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten, 56. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Dortmund: GfA-Press, 667-670.
- Bröde P, Fiala D, Blazejczyk K, Holmér I, Jendritzky G, Kampmann B, Tinz B, Havenith G (2012) Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology* 56(3): 481-494.
- DIN EN ISO 9920 (2009) Ergonomie der thermischen Umgebung - Abschätzung der Wärmeisolation und des Verdunstungswiderstandes einer Bekleidungskombination. Berlin: Beuth Verlag.
- Fiala D, Lomas KJ, Stohrer M (2003) First principles modeling of thermal sensation responses in steady-state and transient conditions. *ASHRAE Transactions* 109(1): 179-186.
- Fiala D, Havenith G, Bröde P, Kampmann B, Jendritzky G (2012) UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology* 56(3): 429-441.
- Havenith G, Fiala D, Blazejczyk K, Richards M, Bröde P, Holmér I, Rintamaki H, Ben Shabat Y, Jendritzky G (2012) The UTCI-clothing model. *International Journal of Biometeorology* 56(3): 461-470.
- ISO 10551 (1995) Ergonomics of the thermal environment - Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales. Geneva: International Organisation for Standardisation.
- Kampmann B, Bröde P, Fiala D (2011) Zur Bewertung der Beanspruchung des Menschen im Klima mit unterschiedlich komplexen Modellen. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg), Mensch, Technik, Organisation - Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess, 57. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Dortmund: GfA-Press, 551-554.
- Krüger EL, Drach P, Emmanuel R, Corbella O (2013) Assessment of daytime outdoor comfort levels in and outside the urban area of Glasgow, UK. *International Journal of Biometeorology* 57(4): 521-533.
- Krüger EL, Rossi FA (2011) Effect of personal and microclimatic variables on observed thermal sensation from a field study in southern Brazil. *Building and Environment* 46(3): 690-697.
- Littell RC, Milliken GA, Stroup WW, Wolfinger RD (1996) SAS® System for Mixed Models. Cary, NC: SAS® Institute Inc.
- Nikolopoulou M, Lykoudis S (2006) Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries. *Building and Environment* 41(11): 1455-1470.
- Nikolopoulou M, Steemers K (2003) Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings* 35(1): 95-101.
- Zuur AF, Ieno EN, Walker NJ, Saveliev AA, Smith GM (2009) Things are not Always Linear; Additive Modelling. In: Zuur AF et al. (Hrsg), Mixed effects models and extensions in ecology with R. New York: Springer: 35-69.