



Stadtklimaprojekt Stuttgart - Räumliche Verteilung der Wärmebelastung

Irmela Schlegel, Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung, DWD Freiburg

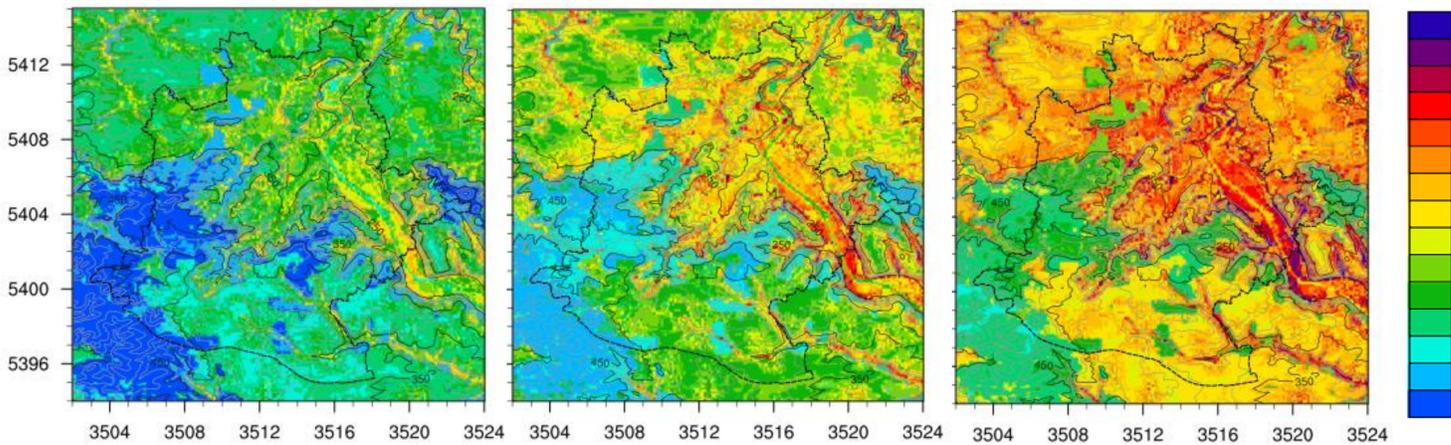


Abb. 1: Mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung (Tagesmaximum der Gefühlten Temperatur $\geq 32^\circ\text{C}$) für den Zeitraum 1971–2000 (links) und für den Zeitraum 2031–2060 das 25. Perzentil des Multi-Modell Ensembles (Mitte) und das 75. Perzentil (rechts). Die Achsenmarkieren die Gaus-Krüger Koordinaten des 22x21km großen Auswertebereichs (Schlegel et al., 2017).

Die klimatischen Verhältnisse in der Landeshauptstadt Stuttgart und die daraus resultierenden thermischen Belastungssituationen wurden im Rahmen einer Kooperation zwischen der Landeshauptstadt Stuttgart und dem Deutschen Wetterdienst (DWD) untersucht. Der Schwerpunkt lag bei der Ermittlung der räumlichen Verteilung der Wärmebelastung (anhand der Gefühlten Temperatur, GT) für Menschen bei sommerlichen Strahlungswetterlagen. Ziel der Kooperation war die Schaffung einer, auf hoch auflösenden Computersimulationen basierenden Datengrundlage, für eine dem Klimawandel angepasste Stadtplanung in Stuttgart, die mit detaillierten Klimamessungen bezüglich ihrer Qualität untersucht und validiert wurde.

Daten

Datengrundlage für die Studie sind die langjährigen Messstationen des DWD im Raum Stuttgart auf dem Schnarrenberg, am Flughafen in Echterdingen und die Station der Landeshauptstadt Stuttgart am Schwabenzentrum. Zusätzlich wurden in den Sommermonaten 2013 und 2014 vom DWD Messkampagnen mit temporären Messungen an drei Stationen (Tallage, Hanglage und außerhalb des Talkessels) und Profilmessungen durchgeführt, um die thermischen Strukturen in der Stadt und dem nahen Umland zu erfassen.

Methode

Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 (3-dimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell) des DWD wurde speziell zur Untersuchung stadt- und geländeklimatologischer Fragestellungen entwickelt (Sievers und Zdankowski, 1986; Sievers, 1990, 1995). Die Quader-

methode (Früh et al., 2011a, b) wurde als Verfahren für das dynamisch-statistische Downscaling von regionalen Klimadaten mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 weiterentwickelt. Die Zunahme an Wärmebelastungstagen wurde auf Basis eines 17 regionale Klimaprojektionen umfassenden Multi-Modell Ensembles für das SRES Emissionsszenario A1B berechnet und statistisch ausgewertet.

Ergebnisse der Messdatenanalyse

Die Analyse der langjährigen und temporären Stationsdaten zeigt deutliche Unterschiede des lokalen Klimas, für die die jeweiligen Stationen repräsentativ sind. Dies ist auch im Auftreten der thermischen Belastungsstufen zu erkennen (Abb. 3). An der Umlandstation in Echterdingen treten im Durchschnitt weniger Tage mit Wärmebelastung auf, dafür vermehrt Tage mit Kältestress, als am Schwabenzentrum. Die Anzahl der Tage pro Jahr mit starker Wärme-

Fazit

Die Ergebnisse belegen, dass die Stadt Stuttgart sich bei Eintreten des SRES Emissionsszenarios A1B auf eine deutlich erhöhte Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung einstellen muss. Im ungünstigen Fall kann sich die Anzahl an Belastungstagen bis zur Mitte des Jahrhunderts gegenüber 1971-2000 etwa verdoppeln. Zu beachten ist hierbei, dass in Tallagen insbesondere auch Industrie- und Gewerbegebiete von hoher Wärmebelastung betroffen sind und dass die bewaldeten Kuppenlagen um die Siedlungskerne als kühleres Refugium bei Hitzelagen auch zukünftig von besonderer Bedeutung sind. Durch die Kooperation der LH Stuttgart und des Deutschen Wetterdienstes stehen für Stuttgart nun neue, wertvolle Daten für die klimaresiliente Stadtplanung zur Verfügung. Das durch die Kooperation erweiterte Verfahren ermöglicht dem Deutschen Wetterdienst eine verbesserte Stadtklimaberatung und den angestrebten weiteren Ausbau von Stadtklima-Services.

Früh, B., M. Koßmann und M. Roos, 2011a: Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 237, 68 S.
Früh, B., Becker, P., Deutschländer, T., Hessel, J.D., Koßmann, M., Mieskes, I., Namyslo, J., Roos, M., Sievers, U., Steigerwald, T., Turau, H., Wienert, U., 2011b: Estimation of climate change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate projections. Journal Appl. Meteorol. and Climatol., 50, 1, 167-184.
Sievers, U., Zdankowski, W., 1986: A microscale urban climate model. Beitrag Phys. Atmosph., 59, 13-40.
Sievers, U., 1990: Dreidimensionale Simulationen in Stadtgebieten. Umweltmeteorologie, Schriftenreihe Band 15: Sitzung des Hauptausschusses II am 7. und 8. Juni in Lahnstein. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Düsseldorf. 92-105.
Sievers, U., 1995: Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen. Meteorol. Zeitschrift, N. F. 4, 3-15.
Schlegel, I., Koßmann, M., Matzarakis, A. 2017: Stadtklimatische Untersuchung der sommerlichen Wärmebelastung in Stuttgart als Grundlage zur Anpassung an den Klimawandel. Abschlussbericht. Deutscher Wetterdienst, März 2017.

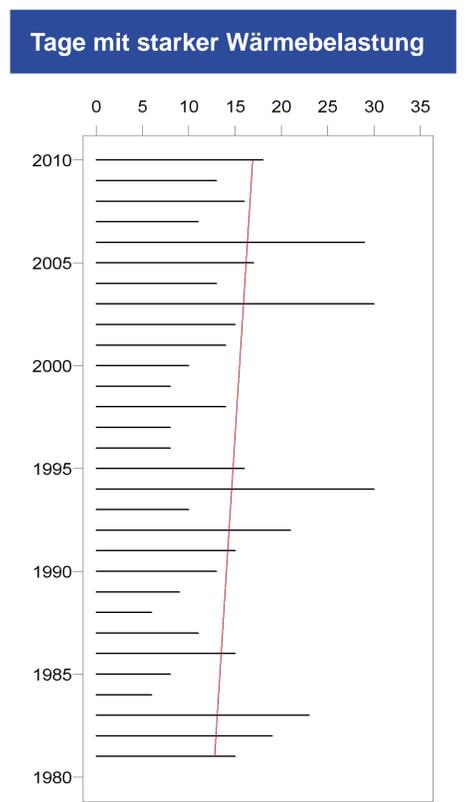


Abb. 2: Anzahl der Tage pro Jahr mit starker Wärmebelastung ($GT \geq 32, \geq 3h$) an der Station Echterdingen für die Jahre 1981-2010.

Jahr auf. Die Zunahme der Tage mit starker Wärmebelastung bis zum Zeitraum 2031-2060 wird für das 25. (Abb. 2 Mitte) und des 75. Perzentils (Abb. 2 rechts) des Ensembles angezeigt. Entsprechend dieser Perzentile ergibt sich in Stuttgart für den Projektionszeitraum 2031-2060 eine Spannweite von ca. 50 bis 70 zusätzlichen Tagen mit starker Wärmebelastung im Neckartal im Südosten des Stadtgebiets, von ca. 40 bis 60 Tagen in den warmen Bereichen des Stuttgarter Kessels, von ca. 20 bis 40 Tagen auf den freien Hochlagen der Filder und von ca. 5 bis 20 Tagen in den bewaldeten Kuppenlagen.

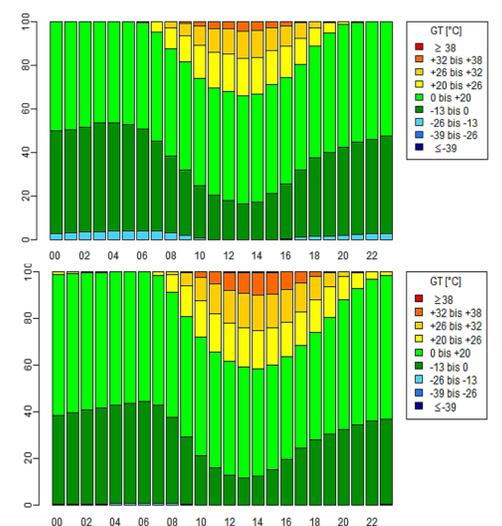


Abb. 3: Häufigkeitsdiagramm der physiologischen Belastungsklassen der Gefühlten Temperatur an der Messtation Echterdingen (oben, 1961-2010) und Schwabenzentrum (unten, 1987-2010) mit einer deutlich größeren Häufigkeit der Wärmebelastungsklassen (gelb-rot).



Stadtklimaprojekt Stuttgart - Datenerhebung: Messstationen und Profilmfahrten

Irmela Schlegel, Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung, DWD Freiburg

Die klimatischen Verhältnisse in der Landeshauptstadt Stuttgart und die daraus resultierenden thermischen Belastungssituationen wurden im Rahmen einer Kooperation zwischen der Landeshauptstadt Stuttgart und dem Deutschen Wetterdienst (DWD) untersucht. Durch die topographische Lage Stuttgarts im Kessel des Neckarbeckens ist die Verteilung der Wärmebelastung räumlich sehr variabel. Für die Quantifizierung wird eine hohe Dichte an meteorologische Messdaten benötigt, welche durch Messstationen und Profilmfahrten erhoben werden. Die Messstationen zeigen das lokale Klima ihrer Umgebung an, die mit den Profilmfahrten verbunden werden, womit hochaufgelöste Computersimulationen ein Gesamtbild über das Untersuchungsgebiet erschaffen können.

Messstationen

Das Untersuchungsgebiet der Studie umfasst das Gebiet der Landeshauptstadt Stuttgart in Baden-Württemberg und zusätzlich die Messstation des DWD am Flughafen in Stuttgart-Echterdingen. Datengrundlage sind weiterhin die langjährige Messstation des DWD auf dem Schnarrenberg und die Station der Landeshauptstadt Stuttgart am Schwabenzentrum (Abb. 3). Zusätzlich wurden in den Sommermonaten 2013 und 2014 vom DWD Messkampagnen mit temporären Messungen an drei Stationen (in Tallage auf dem Diakonissenplatz, auf der Gänsheide in Hanglage und auf dem Dornhaldenfriedhof außerhalb des Talkessels) und Profilmessungen durchgeführt, um die thermischen Strukturen in der Stadt und dem nahen Umland zu erfassen (Feigenwinter, 2013).

Profilmfahrten

Die Profilstrecken (Abb. 5, Messfahrzeug) wurden unter dem Aspekt ausgewählt, möglichst große Klimavariationen innerhalb der Stadt zu erfassen, um Bereiche mit hoher und geringerer Wärmebelastung unterscheiden zu können. Die nördliche Strecke verläuft von West nach Ost durch den Kessel und die Stadtmitte (Abb. 4 oben), die zweite Strecke ist ein Rundweg durch die südlichen Stadtgebiete (Abb. 4 unten). Beide Strecken beziehen die temporär aufgebauten Messstationen des DWD mit ein. Profilmessungen finden idealerweise früh morgens, mittags und spät abends an Tagen statt, die durch eine hohe Sonneneinstrahlung und austauscharme (windschwache) Bedingungen eine hohe Intensität der städtischen Wärmeinsel begünstigen.

Ergebnisse der Stationsdaten

Die Analyse der langjährigen und temporären Stationsdaten zeigt deutliche Unterschiede des lokalen Klimas, für die

Überblick der Messstationen

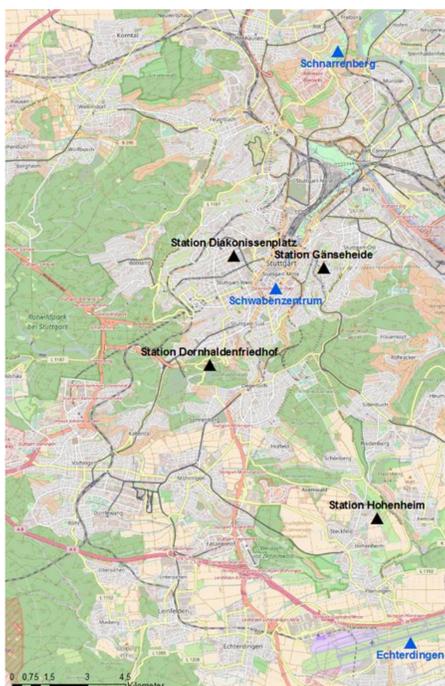


Abb. 3: Verteilung der dauerhaften (blau) und temporären (schwarz) Messstationen im Raum Stuttgart.

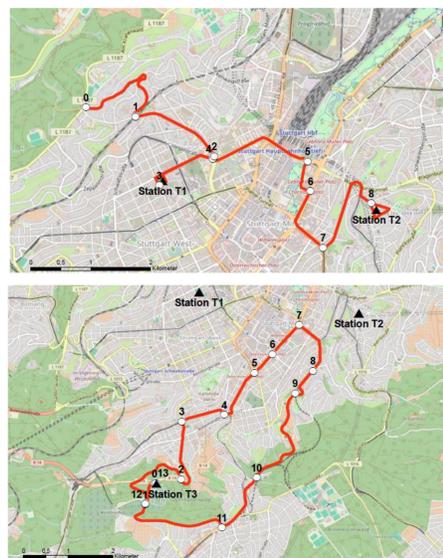


Abb. 4: Karten der Strecken für die Profilmessungen der Lufttemperatur und Luftfeuchte: die nördliche Route (oben) und der südliche Rundweg (unten). In schwarz sind die temporären Stationen „Diakonissenplatz“ (T1), „Gänsheide“ (T2) und „Dornhaldenfriedhof“ (T3) eingezeichnet.

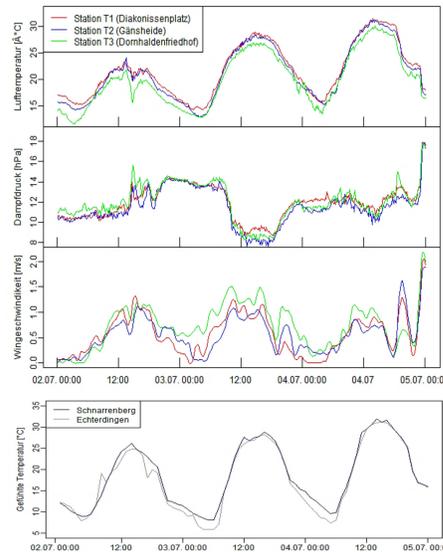


Abb. 1: Die Messergebnisse der temporären Station (oben) während der Schönwetterperiode vom 02.07. bis 04.07.2014 zeigen die Höhendifferenz und den städtischen Einfluss der Stationen auf. Unten ist die Gefühlte Temperatur an den langjährigen Stationen in diesem Zeitraum dargestellt.

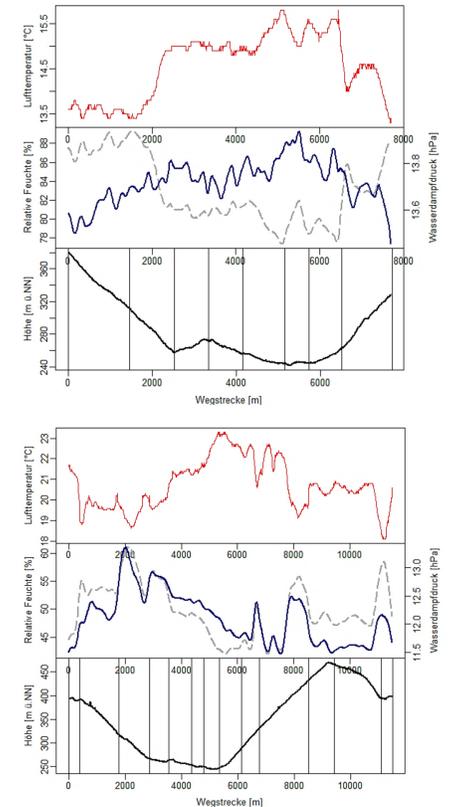


Abb. 2: Messergebnis der Profilmfahrten vom 03.07.2014. Oben: Nördlichen Strecke in der zweiten Nachthälfte (04:19-04:47 MEZ). Unten: Südlichen Strecke in der ersten Nachthälfte (05:06-05:43 MEZ).

die jeweiligen Stationen repräsentativ sind. Die drei temporären Messstationen beschreiben gut die Entwicklung der meteorologischen Bedingungen innerhalb der Schönwetterperiode. Die höchsten Werte weist fast durchgehend die Station T1 am Diakonissenplatz auf. Die Kurve der Station T2 in der Gänsheide verläuft vormittags fast analog zur Kurve von T1, nachmittags weist sie zum Teil etwas geringere Werte auf. Die Lufttemperaturwerte der Station T3 am Dornhaldenfriedhof sind durchgehend niedriger. Diese Station liegt 130m höher als T1 und 55m höher als T2 in einem teils bewaldeten, teils offenen Gelände ohne Bebauung (Schlegel et al, 217).

Ergebnisse der Profilmfahrten

Die bei den Profilmfahrten gemessene Lufttemperatur zeigt immer einen deutlichen Anstieg in der Stadtmitte im Vergleich zum Stadtrand. Die maximale Differenz der morgendlichen Profilmessung des 03.07.2014 (Abb. 2, oben) beträgt 2.5°C, welche zum Teil durch den Höhenunterschied innerhalb der Strecke als auch durch die unterschiedlich starke Abkühlung zwischen Innenstadt und Randgebiet bedingt ist (Stachniuk, 2014). Bei einem trockenadiabatischen Lufttemperaturgradienten von 1°C/100m und einem Höhenunterschied von maximal 140m lässt sich also eine höhenabhängige Temperaturdifferenz von 1.4°C erklären. Die verbleibenden 1.1°C treten durch andere Effekte wie die städtische Wärmeinsel auf. Der Anstieg des Wasserdampfdrucks in der Stadtmitte zeigt eine urbane Feuchteinsel an. Die Profilmessung der südlichen Strecke am Abend des 03.07.2014 zeigt sogar eine

Lufttemperaturdifferenz von 5.2°C (Abb. 2, unten) (Schlegel et al, 217).

Fazit

Die Ergebnisse der Profilmfahrten zeigen deutlich die sowohl höhenabhängige, als auch flächennutzungsabhängige Lufttemperaturänderung zwischen dem Kesselboden, den Hanglagen und den Hochflächen um Stuttgart. Diese Änderung betrug bei den Messungen zwischen 2.3 K und 5.2 K. Der Effekt der städtischen Wärmeinsel tritt am stärksten nach Sonnenuntergang in der ersten Nachthälfte auf.



Abb. 5: Messfahrzeug des DWD.

Feigenwinter, I., 2013: Stadtklimastudie Stuttgart – Übersicht der ersten Messdaten vom Sommer 2013. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), Freiburg.
Schlegel, I., Koßmann, M., Matzarakis, A. 2017: Stadtklimatische Untersuchung der sommerlichen Wärmebelastung in Stuttgart als Grundlage zur Anpassung an den Klimawandel. Abschlussbericht. Deutscher Wetterdienst, März 2017.
Stachniuk, E., 2014: Stadtklimamessungen Stuttgart – Auswertungen der Messdaten aus dem Sommer 2014. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), Freiburg.

Stadtklimaprojekt Stuttgart - Grundlagen

Meinolf Koßmann, Zentrales Klimabüro, DWD Offenbach

Aufgrund der städtischen Wärmeinsel führt die durch Emissionen von Treibhausgasen zu erwartende Klimaerwärmung in Städten zu besonders hoher Wärmebelastung. Um Stadtklimaprojektionen mit der benötigten räumlichen Auflösung von 100m zu berechnen, werden sogenannte Downscaling-Verfahren eingesetzt. Die Berechnungen für Stuttgart wurden auf Basis eines Multi-Modell-Ensembles von 17 regionalen Klimaprojektionen für das moderate IPCC Emissionsszenario A1B für die Zeiträume 1971-2000 und 2031-2060 durchgeführt. Für die Verfeinerung von der regionalen Skala auf die Stadtebene wurden das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 und das Klima-Michel-Modell zur Berechnung der menschlichen Wärmebelastung eingesetzt.

Vom globalen zum lokalen Klimamodell

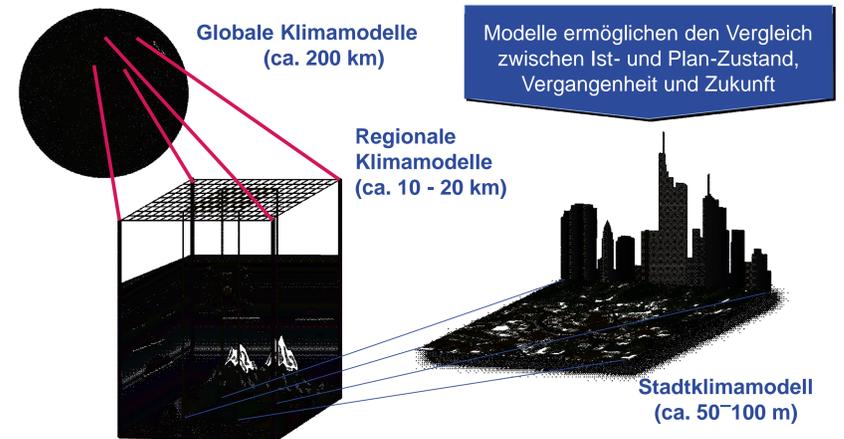


Abb. 4: Downscaling (räumliche Verfeinerung) von Klimasimulationen von der globalen über die regionale zur städtischen Skala (Quelle: DWD).

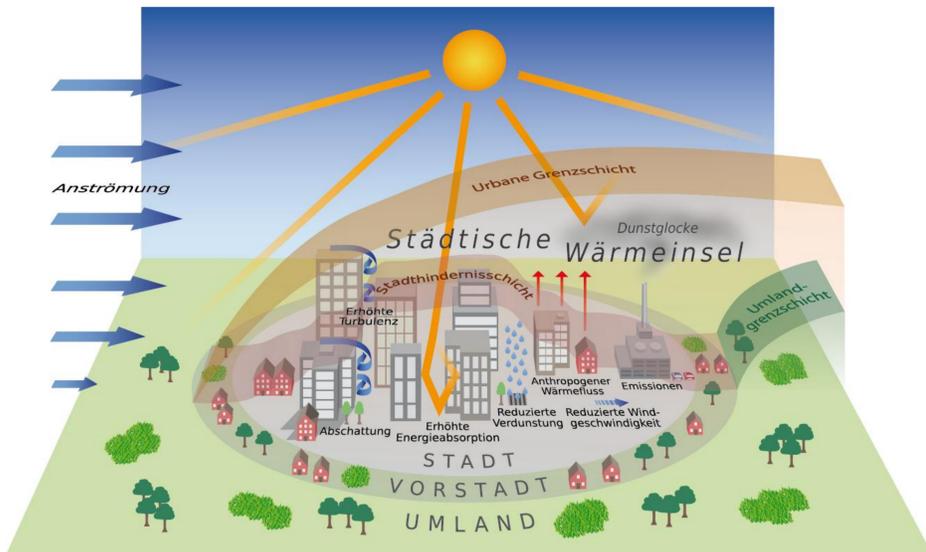


Abb. 1: Stadtklimaprozesse und Struktur der städtischen Wärmeinsel (Quelle: DWD).

Städtische Wärmeinsel

Aufgrund der dichten Bebauung und der starken Flächenversiegelung in Städten ist das Klima in Städten wärmer als im Umland. In großen Städten kann der Temperaturunterschied nachts bis zu 10°C und mehr betragen. In Stuttgart wird die Wärmeinselintensität durch den Einfluss der Geländeform (Tallage) modifiziert.

Emissionsszenarien

Emissionsszenarien klimarelevanter Substanzen berücksichtigen zukünftig mögliche ökonomische und soziale Entwicklungen. Das Szenario A1B geht von einem fortschreitenden Wirtschaftswachstum und der ausgewogenen Nutzung fossiler und nicht-fossiler Energiequellen aus. Die Weltbevölkerung kulminiert hierbei Mitte des 21. Jahrhunderts und nimmt danach ab.

Perzentile

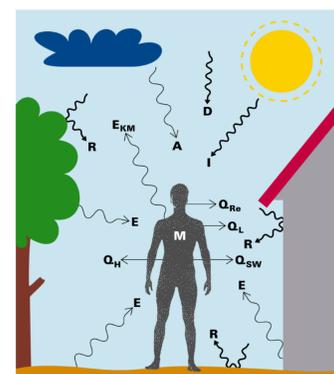
Zur Bestimmung der Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung zur Mitte dieses Jahrhunderts wurden für Stuttgart 17 Stadtklimaprojektionen berechnet. Als Grundlage für die Klimaanpassung wurden diese Projektionen nach der Intensität der Klimaänderung sortiert und gemäß empfohlener Praxis als Perzentilwerte (Prozentränge) ausgewertet. Die sich ergebende Spannbreite zwischen dem 25. und dem 75. Perzentil dient als sinnvolles Maß für die Unsicherheit der Klimaentwicklung auf die sich Stuttgart einstellen muss.

Klima-Michel-Modell

Das Klima-Michel-Modell ist ein vollständiges Wärmehaushaltsmodell für den Menschen zur Bewertung der thermischen Umgebungsbedingungen. Das Modell verknüpft das atmosphärische Milieu mit dem Energieumsatz einer Standardperson – dem Klima-Michel, und beschreibt die benötigte Anpassungsleistung an die Umgebungsbedingungen als „Gefühlte Temperatur“. Dies ermöglicht eine Vergleichbarkeit von Wetterereignissen und Klimaten in Raum und Zeit.

Klima Michel - Definition eines Norm-Menschen

- Größe 1,75 m
- Gewicht 75 kg
- Körperoberfläche 1,78 m²
- Emissionskoeffizient der Bekleidung bzw. Haut $\epsilon_p = 0.97$
- Absorptionskoeffizient für solare Strahlung $\alpha_{sk} = 0.7$
- Arbeitsleistung über dem Grundumsatz 172,5 W (-Gehen mit 4 km/h)
- Variation der Kleidung um thermischen Komfort zu erreichen



- M metabolische Rate (Energieumsatz)
- QH turbulenter Fluss fühlbarer Wärme
- QL Feuchtfluss durch Wasserdampfdiffusion
- QSW latenter Wärmefluss (Schwitzen)
- QR_e Wärmefluss durch Atmung (fühlbar & latent)
- I direkte Sonnenstrahlung
- D diffuse Sonnenstrahlung
- R reflektierte Sonnenstrahlung
- A atmosphärische Gegenstrahlung
- E Infrarotstrahlung der Umgebungsoberfläche
- EKM vom Menschen ausgehende Infrarotstrahlung

Abb. 5: Das Klima-Michel-Modell zur Berechnung der Gefühlten Temperatur (GT) als Maß für die Wärmebelastung oder den Kältestress des Menschen. Z.B.: Kälteempfinden bei GT unter 0°C, Behaglichkeitsbereich bei GT zwischen 0° und 20°C, Wärmeempfinden bei GT größer 20°C, starke Wärmebelastung bei GT größer 32°C (Quelle: DWD).

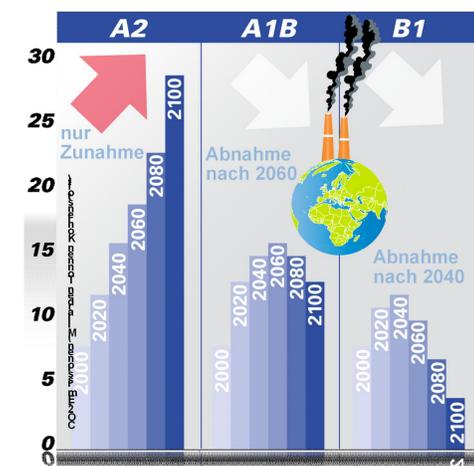


Abb. 2: Zeitlicher Verlauf von Emissionsszenarien bis 2100 (Quelle: IPCC 2007, WGI-AR4).

Emissionsszenarien beschreiben die CO₂-äquivalente Emissionen für verschiedene mögliche Varianten der zukünftigen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklung

SRES - Szenarien
(IPCC - Special Report on Emissions Scenarios)

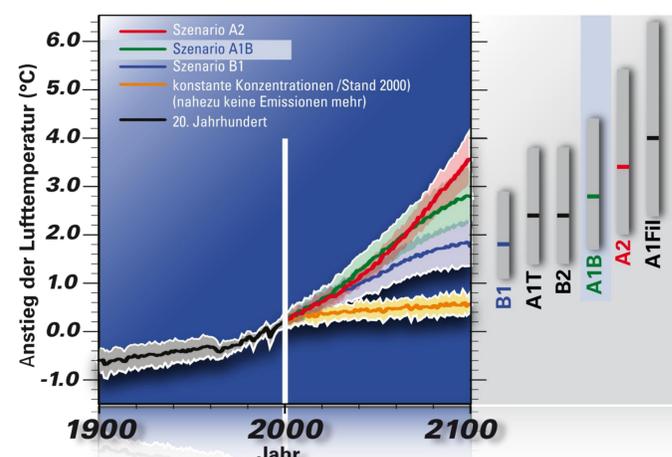


Abb. 3: Globale Klimamodelle berechnen die Veränderung der Lufttemperatur für die Emissionsszenarien (Quelle: IPCC 2007, WGI-AR4).