

W. KUTTLER, B. HOLLÓSI, M. GUBLER

12 Stadtklimatologie im Wandel der Zeit – Einblicke aus Deutschland, Österreich und der Schweiz

Urban climatology in the course of time – insights from Germany, Austria and Switzerland

Zusammenfassung

Dieser Beitrag zeichnet die Entwicklung der wissenschaftlichen Beschäftigung mit dem Klima und der Luftqualität von Städten in kurzen, exemplarischen Zügen nach. Die Quellenlage lässt eine Analyse der etwa über 2000-jährigen Geschichte der Stadtklimaforschung zu. Es dürften wohl indische und römische Kulturen gewesen sein, die sich dem Problem der Überwärmung und insbesondere dem der Luftverschmutzung in ihren aufstrebenden städtischen Siedlungen zuerst annahmen. Zu Beginn dieses Artikels wird im Rahmen einer internationalen Gesamtschau ein kurzer Abriss dieses Teilgebiets der Umweltmeteorologie gegeben. Anschließend wird die lebhafteste Geschichte der Stadtklimaforschung für Deutschland, Österreich und die Schweiz (Akronym: D-A-CH) an zahlreichen Beispielen und Meilensteinen der Entwicklung referiert.

Summary

This article reviews the development of scientific research on climate and air quality in cities in short, exemplary sections. The literature allows for an analysis of the 2000-year history of urban climate research. Probably the Indian and Roman cultures were the first who addressed the problem of overheating and especially that of air pollution in their emerging urban settlements. At the beginning of this article, a brief outline of this branch of environmental meteorology is given as part of an overall international review. Subsequently, the lively history of urban climate research for Germany, Austria, and Switzerland (acronym: D-A-CH) will be reported using numerous examples and milestones of its development.

1 Einleitung

Städte weisen in Abhängigkeit ihres Grund- und Aufrisses, der Zuordnung und Mischung natürlicher und bebauter Flächen, ihres Versiegelungsgrades, der Emission an Abwärme und Luftbeimengungen, des vorherrschenden Witterungstyps, der topographischen Lage sowie der sozioökonomischen Verhältnisse charakteristische thermische, hygri-sche und strömungsdynamische Unterschiede im Vergleich zu ihrem ländlich geprägten Umland auf (KUTTLER und GROSS 2023, KUTTLER und WEBER 2023). Die wissenschaftliche Beschäftigung mit dem Sonderklima der Städte, dem Stadtklima, lässt sich etwa 2000 Jahre zurückverfolgen. Der nachfolgende Beitrag wird, ausgehend von einem kurzen internationalen Überblick zur Geschichte der Stadtklimatologie, wesentliche Teile ihrer Entwicklung am Beispiel der Länder Deutschland, Österreich und der Schweiz (D-A-CH) nachzeichnen.

2 Internationale Gesamtschau

2.1 Antike

Erste schriftliche Berichte zum Klima und zur Luftqualität von Städten widmeten sich vornehmlich dem Problem der bodennahen Luftverschmutzung durch Rauch, aber auch der im Vergleich zum kühleren Umland auftretenden Überwärmung. So finden sich entsprechende Arbeiten zu diesem Thema bereits in frühen indischen und römischen Quellen (YOSHINO 1990/91). Während einerseits der Schutz vor (sommerlicher) Sonnenstrahlung in Städten entsprechender geographischen Breiten als wichtig angesehen wurde, gab es andererseits zahlreiche Beschreibungen über die „Verräucherung“ der bodennahen Luftschicht durch Herdfeuer sowie durch den Rauch von Schmelzöfen und Töpfereien mit ihren niedrig gelegenen Quellhöhen. Mit dem Begriff „gravius caelum“ (lateinisch, „schwerer Him-

mel“), der auf Seneca zurückgehen soll, wurde in Rom die fast permanent vorhandene Dunstglocke über der Stadt bezeichnet, der man sich nur durch Flucht in die umliegenden Berge entziehen konnte, wo (aufgrund der Temperaturinversion) sauberere Luft vorherrschte (siehe NEUMANN 1979).

Als bahnbrechend für die damalige Zeit dürfte das Werk des römischen Architekten und Bauingenieurs Marcus Vitruvius (75–26 vor Christus) angesehen werden, der in „De Architectura libri decem“ („Zehn Bücher über Architektur“) das seinerzeitige Wissen über die Anlage und die Struktur von Städten, ergänzt durch Hinweise auf das Lokalklima und die Luftqualität, nicht nur zusammengetragen, sondern auch erste Empfehlungen zur antiken Stadtplanung gegeben hat (FENSTERBUSCH 1991).

2.2 Mittelalter

Starke Bevölkerungszunahmen der frühen urbanen Siedlungsgebiete, die überwiegend auf dem mittelalterlichen Rechtsgrundsatz „Stadtluft macht frei nach Jahr und Tag“ beruhten, verlangten nach dem Bau neuer Wohnhäuser. Die dadurch verursachten Umweltprobleme waren gravierend. Exemplarisch sei hier der englische Architekt, Gartenbauer und Tagebuchschreiber John Evelyn (1620–1706) genannt, der sich in einem Brief an König Charles II. (1661) der katastrophalen Probleme der Londoner Luftverschmutzung annahm und auf die damit verbundenen starken Gesundheitsbeeinträchtigungen der Bevölkerung hinwies. Sein Brief (Abb. 12-1) trug den Titel „Fumifugium – The Inconveniencie of the Aer and Smoak of London dissipated together with some Remedies“ (etwa „Die Unannehmlichkeiten der Luft und des Rauchs von London, die durch einige Abhilfemaßnahmen verschwanden“). Der Text war für die damalige Zeit absolut wegweisend und fand durch Veröffentlichung als Monographie später weite Verbreitung (EVELYN 1661). Grundsätzlich resultierte das Luftverunreinigungsproblem Londons daraus, dass für Koch- und Heizzwecke große Mengen an qualitativ schlechter Kohle

(mit hohem Schwefelanteil) verbrannt wurde und der dabei entstehende pestilenzartige Rauch nicht in hohen Schornsteinen abgeführt wurde, sondern meist durch Löcher in den Dächern („Rauchküchen“) der flachen Häuser abzog. Die schlechte Luftqualität wurde ferner durch die meist hohe Luftfeuchtigkeit verstärkt, bedingt durch die geographische Lage Londons im Themsetal und an der nahen Nordsee. Hierdurch bildete sich insbesondere im Herbst und Winter der berüchtigte „City Fog“. Londons Bevölkerung litt auch noch 300 Jahre später unter dieser Luftverschmutzung. Die Stadt war schließlich namensgebend für den berüchtigten schwefelsauren „London Smog“ (KUTTLER 1979a), den seinerzeit sogar der Schriftsteller Charles Dickens (1812–1870) in seinem Buch „Bleak House“ („Trostloses Haus“) literarisch verarbeitete.

2.3 Neuzeit

In den Fokus der stärker werdenden Beschäftigung mit dem Klima der Städte trat neben die Analyse der Luftverschmutzung auch die sommerliche Hitzebelastung, der die Stadtbevölkerung besonders ausgesetzt war. Von der Hitze waren beispielsweise hauptsächlich Großstädte der niederen Breiten betroffen, in denen Ärzte (z. B. in New York und Philadelphia) während heißer Sommer auf die negativen Auswirkungen des thermischen Stresses für die Stadtbewohner hinwiesen: Die Enge der Bebauung, die Höhe der Häuser und die weitflächige Versiegelung der urbanen Flächen, die sich tagsüber stärker aufheizten als naturbelassene, ließen auch nachts kaum Abkühlung zu (JANKOVIC 2013, JANKOVIC und HEBBERT 2012).

Die Neuzeit brachte nicht nur weitere Erkenntnisse in Bezug auf die städtische Hitzebelastung mit sich, sondern führte auch zu großen Entwicklungsschritten im Bereich der Messtechnik. Mithilfe verschiedener Instrumente begannen die Vermessung und Klassifizierung zahlreicher atmosphärischer Parameter, womit sich die beobachtende, rein deskriptive Wissenschaft immer stärker zu einer messenden entwickelte.

Eine erste systematische, zusammenfassende und bis dahin nicht gekannte, außerordentlich detaillierte Untersuchung über die meteorologischen und klimatischen Facetten der städtischen Atmosphäre legte schließlich der englische Apotheker Luke Howard (1772–1864) für die Stadt London vor, die zur damaligen Zeit neben Paris die größte Stadt Europas war. Howard war in Meteorologiekreisen kein Unbekannter, denn er hatte bereits 1804 eine von ihm selbst illustrierte Wolkenklassifikation veröffentlicht, die im Wesentlichen heute noch verwendet wird. Howard publizierte im Jahre 1833 in zweiter Auflage sein dreibändiges Werk (erste Auflage 1818) „The Climate of London“, dem im Laufe der Jahre weitere Auflagen folgten. Das Buch war zur damaligen Zeit aus heutiger Sicht ein Bestseller (HOWARD 1833).

Howard maß an den von ihm persönlich betreuten Stationen innerhalb und außerhalb Londons alle meteorologi-

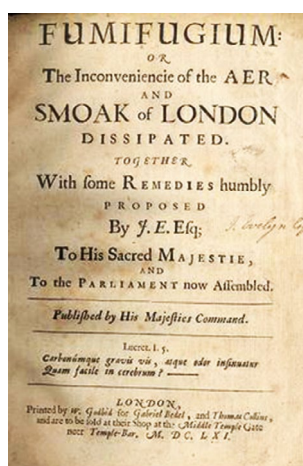


Abbildung 12-1: Titelseite der von John Evelyn verfassten Schrift „Fumifugium“ (Quelle: <https://library.ucsd.edu/speccoll/weather/b4162440.html>).

schen Elemente, sogar den Tau und die Verdunstung. Die von ihm verwendeten Messgeräte wurden in seinem Buch genauestens beschrieben.

3 Deutschland, Österreich und die Schweiz im Fokus

3.1 Beginn einer systematischen Erfassung des Stadtklimas

Während Howard aufgrund seiner zahlreichen und mehrjährig betriebenen Stadt- und Umlandstationen in der Lage war, eine nach heutigen Maßstäben „gesamstädtische Klimaanalyse“ für London vorzulegen, wurden auch in Kontinentaleuropa wichtige Einzelfallbeobachtungen durchgeführt. So standen in Wien Messungen zum Stadt- und Bioklima sowie Analysen über die Einflüsse von Witterung und Klima auf die menschliche Gesundheit im Fokus der Untersuchungen durch Carl von Littrow (1860), Joseph Frank (1843) sowie den Benediktinermönch Emerich Gabely (1864).

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts begann man darüber hinaus in einzelnen Städten Mitteleuropas, so auch in Deutschland, Österreich und der Schweiz, ein „ozonometrisches Messnetz“ aufzubauen. Die mit der Schönbein-Methode (siehe LAUSCHER 1984) ermittelten Daten wurden auf die heutzutage übliche Einheit ppb bzw. $\mu\text{g m}^{-3}$ umgerechnet und sind in Tabelle 12-1 dargestellt. Die damaligen Konzentrationen bewegten sich in den beiden

deutschen Städten zwischen 18 ppb und 22 ppb, in den drei österreichischen Städten zwischen 16 ppb und 32 ppb sowie an der Schweizer Station um 19 ppb, welche ungefähr denjenigen der heutigen Zeit entsprechen (20 ppb bis 25 ppb repräsentieren langjährige Mittelwerte an deutschen Stadtstationen von 1995 bis 2021; UBA 2022). In Bern (CH) verknüpfte überdies Rudolf Wolf zwischen 1853 und 1854 die dort gemessenen Ozondaten mit entsprechenden Mortalitätsstatistiken der Bevölkerung und stellte unter anderem fest, dass „[...] am Tage einer starken Ozonreaction, und auch an allen folgenden acht Tagen die Sterblichkeit grösser ist [...]“ (WOLF 1855, S. 15) als an Tagen mit geringerer Ozonbelastung.

Impulse zu einer zunehmend systematischen Erforschung des Stadtklimas in Kontinentaleuropa gaben zu Beginn des 20. Jahrhunderts im Wesentlichen deutsche und österreichische Wissenschaftler um Julius von Hann (A), Gustav Hellmann (D), August Schmauss (D), Wilhelm Schmidt (A) und Albert Pepler (D).

Unter ihnen hatte sich Julius von Hann, der übrigens später mit Reinhard Süring das umfangreiche „Lehrbuch der Meteorologie“ (HANN und SÜRING 1915) in mehreren Bänden verfasste und herausgab, schon früh mit den „Temperaturunterschieden zwischen Stadt und Land“ beschäftigt und berücksichtigte bei seiner Auswertung auch unterschiedliche Stationshöhen. Die Messungen der (Luft-) Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland wertete er nicht nur für Wien, sondern auch für Budapest,

Tabelle 12-1: Mittelwerte der Ozonmischungsverhältnisse (in ppb) auf Basis der Schönbein-Methode für verschiedene Städte der Jahre 1853–1900. Kalibriert und umgerechnet nach der Bojkov-Methode, 1986 (nach LISAC et al. 2010).

| Ozonometrische Stationen | Geogr. Breite ϕ (N) | Geogr. Länge λ (E) | Höhe H (in m ü. NN) | Zeitraum | Ozon (in ppb) |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|-----------|---------------|
| 1 – Emden | 54° 20' | 10° 12' | 12 | 1857–1873 | 18 |
| 2 – Lodz | 51° 44' | 19° 24' | 188 | 1855–1856 | 21 |
| 3 – Leipzig | 51° 19' | 12° 25' | 148 | 1868–1870 | 22 |
| 4 – Prag | 50° 06' | 14° 15' | 369 | 1854–1857 | 11 |
| 5 – Krakau | 50° 05' | 19° 48' | 237 | 1853–1873 | 23 |
| 6 – Paris | 49° 01' | 02° 32' | 109 | 1865–1875 | 17 |
| 7 – Straßburg | 48° 33' | 07° 38' | 154 | 1854–1864 | 23 |
| 8 – Wien | 48° 15' | 16° 22' | 209 | 1854–1873 | 16 |
| 9 – Salzburg | 47° 48' | 13° 00' | 450 | 1855–1857 | 32 |
| 10 – Bern | 46° 55' | 07° 30' | 511 | 1853–1855 | 19 |
| 11 – Szeged | 46° 15' | 20° 06' | 84 | 1855–1856 | 24 |
| 12 – Klagenfurt | 46° 39' | 14° 20' | 447 | 1854–1873 | 21 |
| 13 – Zagreb | 45° 49' | 15° 59' | 163 | 1893–1900 | 29 (Tag) |
| | | | | | 27 (Nacht) |

München, Paris und sogar Kalkutta aus. Dabei wies er auf ein prägendes Element stadtklimatischer Messungen hin, welches vielfach nicht beachtet wurde und heutzutage leider manchmal auch noch übersehen wird: Die „Temperaturüberschüsse“ der Städte sind in erster Linie nicht nur von deren Größe abhängig, sondern im Wesentlichen von „der nächsten Umgebung der Station“ (HANN 1885, S. 459). Das ist unter anderem der Grund dafür, dass einfache Korrelationen zwischen einer Stadtgröße (dargestellt zum Beispiel durch die Einwohnerzahl) und der entsprechenden städtischen Wärmeinsel (*Urban Heat Island*, UHI) nur geringe Varianzklärungen erreichen (z. B. KUTTLER 2012).

Eine erste kurze Zusammenfassung des damaligen Standes der Stadtklimaforschung erfolgte durch Wilhelm Schmidt im Jahre 1917 („Zum Einfluss großer Städte auf das Klima“). Er analysierte dazu mehrere auf das Stadtklima wirkende Faktoren, wie die künstlichen Wärmezufuhren aus technischen Prozessen an Beispielen aus London, Berlin und Wien.

Eine der grundlegenden Erkenntnisse aus den Vergleichsuntersuchungen zwischen Stadt und Umland war, dass das „artifizielle“, durch die Stadt veränderte Klima, nicht dasjenige der unbebauten Umgebung repräsentierte, also dem natürlichen Klima, entsprach. In landesklimatische Vergleiche durften deshalb die in Städten gewonnenen Daten, welche einer künstlichen Umgebung entstammten und demzufolge einem eigenen „anthropogenen“ Klimatyp zugeordnet werden mussten, nicht einfließen. So hat zum Beispiel Heinrich Wild städtische Messungen nicht in sein

Werk „Temperaturverhältnisse des russischen Reiches“ (WILD 1881) aufgenommen, da er „einen störenden Einfluss der Stadt“ vermutete, welche in den Messungen unter anderem durch die verspäteten Minima im Sommer ersichtlich waren (VALENTIN 1901).

Zahlreiche zum Teil auf langjährigen Messreihen basierende Untersuchungen zum Stadtklima wurden beispielsweise in Deutschland in Berlin (BEHRE 1908) sowie Stuttgart (KNAUSS 1901) durchgeführt. In der baden-württembergischen Landeshauptstadt, die sich durch eine komplexe Topographie auszeichnet, erkannte man, dass gerade eine Siedlung in gegliedertem Gelände einer besonderen Zuwendung durch die Stadtklimaforschung bedurfte und richtete bereits 1938 eine bis heute fortbestehende Stadtklimatologieabteilung (langjähriger Leiter war Jürgen Baumüller) ein – eine für die damalige Zeit in Deutschland absolute Seltenheit.

Ferner wurde der indirekten Erfassung stadtklimatischer, insbesondere thermischer Parameter seit Beginn des 19. Jahrhunderts zunehmende Aufmerksamkeit gewidmet. Indem man die Entwicklungsstadien von Pflanzen – auch im Vergleich zwischen Stadt und Umland – im Jahresgang miteinander verglich, machte man sich diese Daten für eine Abschätzung der städtischen Überwärmung ebenfalls zunutze. Eine lange phänologische Reihe liegt zum Beispiel seit 1808 für die Stadt Genf (CH) für die Eintrittsdaten des Blattaustriebs einer Rosskastanie vor. Im Vergleich zum Jahr 2000 haben sich die Blattaustriebe von etwa 110 Tagen nach Jahresbeginn (1808) auf unter 40 Tage reduziert. Natürlich ist das nicht nur auf die stadtklimatischen Veränderungen, sondern auch auf den globalklimatischen Einfluss zurückzuführen (DEFILA und CLOT 2001).

Phänologische Beobachtungen haben ferner in Österreich eine lange Tradition, die unter anderem auf Karl Frisch (1812–1879) zurückgeht, der den ersten Anstoß für derartige Erfassungen in die im Jahr 1851 gegründete Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG, seit 2023 Geosphere Austria) einbrachte. In Deutschland waren es vor allem Fritz Schnelle (1900–1990) sowie Franz Seyfert (1908–1986), die sich um die Einrichtung eines phänologischen Messnetzes verdient machten, das später immer stärker auch für stadtklimatische Analysen genutzt wurde.

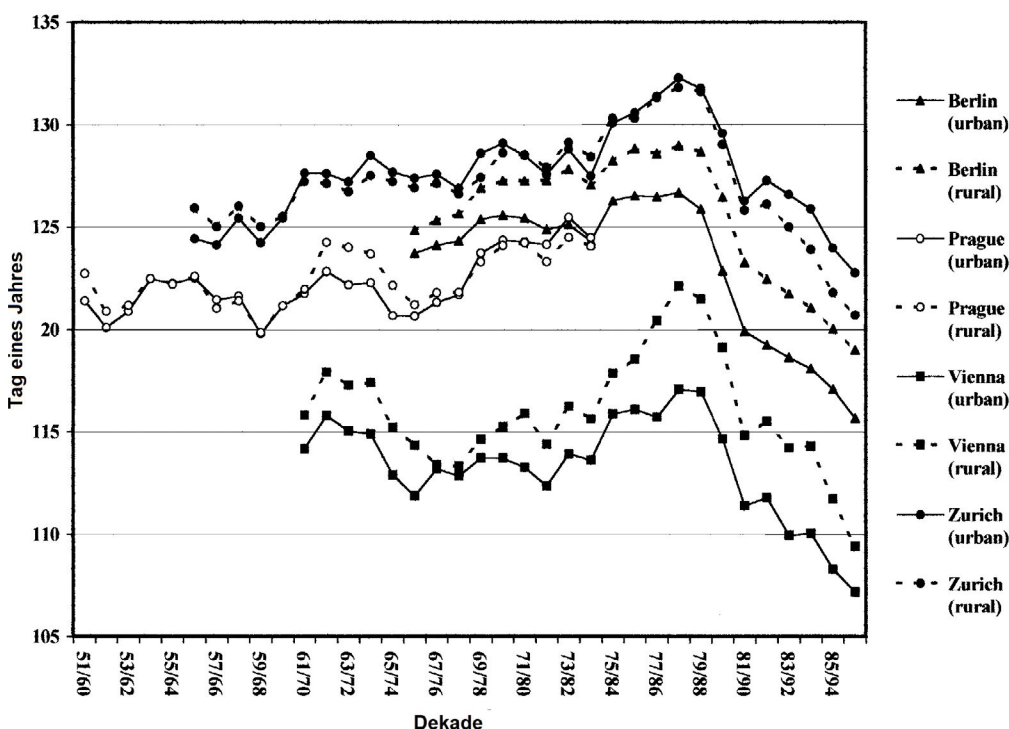


Abbildung 12-2: Beginn der Blühphase von Apfelbäumen (*Malus domestica*) in urbanen und ruralen Gebieten von Berlin, Prag, Wien und Zürich (10-jährige laufende Mittelwerte, von 1951/1960 bis 1986/1995 (aus ROETZER et al. 2000).

Abbildung 12-2 belegt (für die allerdings etwas spätere Zeitspanne 1951–1995) nicht nur die phänologischen Unterschiede zwischen Stadt und Umland, sondern auch die besonders starke Verfrühung seit den 1970er Jahren.

Auch in der Kunst wurde das Stadtklima zu jener Zeit verschiedentlich aufgegriffen. So von Adalbert Stifter in seinem Werk „Aus dem Alten Wien“, in dem er die zwischen Land und Stadt herrschenden Temperaturunterschiede auf seine Weise beschrieb:

„Nun ist es aber klar, dass die ganze Stadt nicht Anderes ist als eine große poröse Scheibe unter dem Netze der darauf niederfallenden Sonnenstrahlen; sie muss sich daher heftig erwärmen wie ein in der Sonne liegender Sandkuchen. Allein dies ist nicht alles; auch das lehrte die obige Kommission, daß von glatten weißen Wänden die strahlende Wärme mehr reflektiert werde als von dunklen, rauhen – und wo sind denn mehr lichte, glatte Wände, die die Wärme eine der andern zuwerfen, als gerade in der Stadt? (...) Dies wissen viele Hofräte und Grafen sehr gut, die imstande sind, eine nette Sommerwohnung auf dem Lande zu haben; denn während sie in der Stadt bei offenem Fenstern schlafen und fast vor Hitze umkommen, müssen sie die Fenster der Landwohnung abends schließen, sonst verkühlen sie sich. Aus dem, glaube ich, geht zur Genüge und objektiv hervor, dass in unserer Stadt ein ungleich heißeres Klima ist als auf dem umliegenden Lande, und dass auf ihr ein boshafter, erhitzter Luftberg stehe, der wieder die traurigsten Folgen nach sich zieht.“

(STIFTER 1909, S. 338).

3.2 Von der Grundlagenforschung zur praxisorientierten Anwendung

Die vorgenannten Veröffentlichungen bildeten zu Beginn des 20. Jahrhunderts auch die Grundlage dafür, die gewonnenen Erkenntnisse grundsätzlich stärker für den praxisorientierten, das heißt, stadtplanerischen Bereich einzusetzen. Maßgeblich initiiert und befördert hat diesen Zweig der angewandten Stadtklimatologie unter anderem der Meteorologe und damalige Abteilungsvorsteher des Preußischen Meteorologischen Institutes in Berlin Carl Kassner. Kassner veröffentlichte nämlich im Jahre 1910 seine wegweisende Schrift zum Thema „Die meteorologischen Grundlagen des Städtebaus“ (KASSNER 1910). In ihr stellte er den Zusammenhang zwischen Städtebau, Klima und Luftqualität her und beschrieb nicht nur, wie man in verschiedenen Klimazonen klimadäquat baut, sondern setzte sich unter stadtklimatischen Aspekten insbesondere mit den mitteleuropäischen Stadtstrukturen auseinander.

Einen Meilenstein in der Stadtklimaanalytik stellten die mobilen Messwerterfassungen mithilfe von Kraftfahrzeugen dar, die offensichtlich zuerst von Wilhelm Schmidt in Wien 1927 (SCHMIDT 1930) und dann 1929 von Albert Peppler in Karlsruhe (PEPPLER 1929) mit

dem Ziel erfolgten, die horizontale Verteilung der Lufttemperatur innerhalb und außerhalb der beiden Städte mit Quecksilberthermometern zu ermitteln. Darauf basierend wurden „flächendeckende“ Isothermenkarten für die beiden Stadtgebiete angefertigt. Neben der flächenmäßigen Untersuchung stadtklimatischer Parameter führte man in zunehmendem Maße auch vertikale Analysen der urbanen Grenzschicht durch. So erfolgten erste Messungen hierzu an hohen Türmen, zum Beispiel in Leipzig.

Temperaturmessfahrten in Wien, die Steinhauser 1932 veranlasst hatte, wurden mit denjenigen, die im Jahre 2015 auf der gleichen Messstrecke von Anton Neureiter ermittelt wurden, verglichen, und zwar unter Berücksichtigung der veränderten städtebaulichen Charakteristika. Die in den früheren Messfahrten erkennbaren Temperaturunterschiede zwischen Stadtzentrum und der (rurale Charakteristika aufweisenden) Wagramerstraße sind mittlerweile durch städtebauliche Maßnahmen ausgeglichen (Abb. 12-3).

Die über die Jahre der damaligen Zeit stark angestiegene Zahl an Veröffentlichungen zur Stadtklimatologie bereite den Boden für einen ersten zusammenfassenden wissenschaftlichen Überblick über den Stand dieser Forschungsdisziplin. Es war der Benediktinermönch Pater Albert Kratzer aus dem Kloster Ettal (D), der in seiner Dissertation (1937) zum Thema „Das Stadtklima“ über 200 Einzelveröffentlichungen verarbeitete. Die weitere stürmische Entwicklung der Stadtklimatologie zeigt sich auch daran, dass Kratzer in der zweiten Auflage seines Buches (1956) – trotz der dazwischenliegenden Kriegsjahre – bereits mehr als 560 Literaturzitate verarbeiten konnte. Kratzer widmete sich in der Neuauflage auch dezidiert dem Problem der Qualität der Stadtluft. So stellte er für zahlreiche amerikanische und deutsche Städte Schwebstaubanalysen („Kerne in der Luft“) zusammen und verglich die Staubbelastung zwischen Werktagen und Wochenenden. Ferner äußerte er die Vermutung, dass die immense Freisetzung an Staubteilchen dazu führen könnte, weltweit die Albedo von Gletscheroberflächen derart zu verringern, sodass diese verstärkt abschmelzen. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch der frühe, prognostisch zu wertende Hinweis von Plaß (zitiert in KRATZER 1956) der besagt, dass aufgrund des außerordentlich starken CO₂-Ausstoßes durch Kohleverbrennung in Städten 6 Milliarden Tonnen CO₂ zusätzlich in die Atmosphäre emittiert werden, wodurch sich die Atmosphärentemperatur in den nächsten 125 Jahren (ab 1953 gerechnet) beträchtlich erhöhen sollte. Zudem stellte Kratzer Berechnungen und Überlegungen an, welchen Anteil die anthropogene Wärmefreisetzung (damals im Wesentlichen durch Kohleverbrennung) an den natürlichen Strahlungsflüssen hat. Die von ihm zusammengetragenen Ergebnisse zeigten zum Beispiel für Wintertage, dass die künstliche Wärmeerzeugung in den damaligen Städten teilweise gleich hohe Werte wie die natürliche Wärmebilanz erreicht.

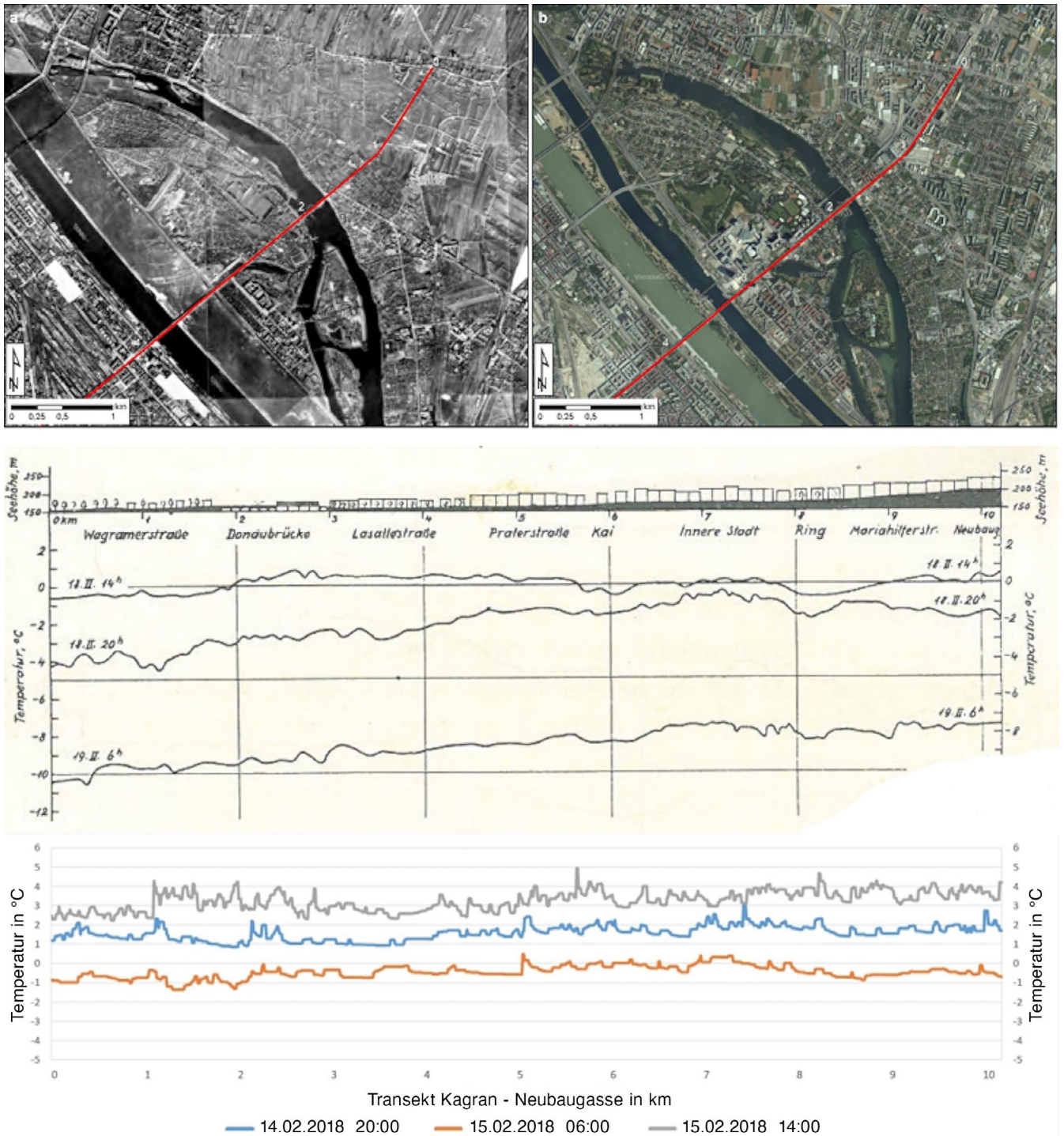


Abbildung 12-3: Vergleich der Februar-Messfahrten aus den Jahren 1932 und 2018 zwischen Wien-Kagran (Wagramerstraße) und Neubaugasse (Stadtzentrum). *Oben*: Luftbild von 1938 (*links*) und 2018 (*rechts*) mit Streckenverlauf der Profilmfahrten. *Unten*: Gegenüberstellung der Messdaten (Temperatur in °C) von Kilometer 0 bis 10 des West-Ost-Transektes in Wien (aus NEUREITER 2018).

3.3 Stadtklima und Lufthygiene

Ebenfalls wurde die Untersuchung des auf den Menschen bezogenen Bioklimas und der Luftqualität einer Stadt, heutzutage unter dem Begriff Human-Biometeorologie zusammenfasst, seit der Mitte des 20. Jahrhunderts systematisch vorangetrieben. Maßgeblich daran beteiligt war die Wiener Gruppe um Ferdinand Steinhauser, Othmar Eckel und Franz Sauberer. Durch Steinhauser wurde unter anderem 1956 die Forschungsabteilung für Luftchemie an der

ZAMG gegründet. Hier wurden neben meteorologischen Daten auch Messungen des pH-Wertes des Niederschlags, der Schneedecke sowie des CO₂- und O₃-Gehaltes der Luft vorgenommen. Im Laufe der Zeit konnte auf Daten von über 20 Messstellen im Stadtgebiet von Wien zurückgegriffen werden. Wesentliche Ergebnisse wurden in dem dreibändigen Werk zum „Klima und Bioklima von Wien“ (STEINHAUSER et al. 1955, 1957, 1959) veröffentlicht, mit dem Ziel, „eine für die Praxis bestimmte Sammlung von Ergebnissen meist langjähriger, aber auch kürzerer Beob-



Abbildung 12-4: Aerosolmessungen auf dem Donauturm in Wien im Jahre 1964 (aus HAMMERL 2005).

achtungreihen“ (STEINHAUSER et al. 1955, S. 3) vorzulegen. Teil I enthält umfangreiche Daten zu den wichtigsten meteorologischen Elementen, Teil II die Auswertungen zu den säkularen Änderungen des Klimas sowie „Sonderbearbeitungen für Zwecke der Bautechnik und der Großstadt-hygiene (STEINHAUSER et al. 1957, S. 47) wie Schlagregen, Nebel und die Verteilung des Stadtdunstes und Teil III widmet sich unter anderem der Analyse trocken und nass deponierter Luftverunreinigungen (SO₂, SO₄²⁻, CO₂, CO, O₃) sowie der Radioaktivität, des Keimgehalts der Luft und der Verbreitung von Flechten als Bioindikatoren zur Angabe der Luftqualität. Weiterhin wurde im Jahre 1962 in Österreich eine Kommission für Reinhaltung der Luft eingerichtet, die sich zum Beispiel unter lufthygienischen Gesichtspunkten mit der Stadtplanung und der Einrichtung von Industrieanlagen, aber auch mit der Standortwahl heilklimatischer Kurorte zu beschäftigen hatte. Ebenso messtechnisch wichtig wie publikumswirksam wurde 1964 eine Messstation auf der Aussichtsterrasse in 150 m Höhe des 250 m hohen Donauturms in Wien zur Messung gas- und partikelförmiger Luftinhaltsstoffe eingerichtet (Abb. 12-4). Aus den Daten wurden später Luftqualitätskriterien abgeleitet, welche die Basis für Grenz- und Richtwerte verschiedener Luftverunreinigungen bildeten (HAMMERL 2005).

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts erschienen Beiträge zur stadtklimatischen Grundlagenforschung aus der Schweiz noch selten. Das dürfte daran gelegen haben, dass es dort bis dato keine Großstädte gab. Nichtsdestotrotz kann eine Tendenz zur Diffusion stadtklimatologischer Erkenntnisse aus dem Ausland in die raumplanerische, städtebauliche und architektonische Praxis Schweizer Städte festgestellt werden. Davon zeugen insbesondere die Publikationen des Basler Architekten Fritz Lodewig, die sich beispielsweise der klimatischen und lufthygienischen Bedeutung von städtischen Grünanlagen für die Erholung und Gesundheit der Stadtbevölkerung widmeten. In diesen Schriften werden aber auch stadtklimatische Aspekte „... (die durch) Verbrennungsanlagen (Heizung, Verbrennungsmotoren usw.), durch das grosse Wärmespeichervermögen

der vielen Bauwerke, Plätze, Straßen und durch die größere Anzahl von Unterschieden zwischen Licht- und Schattenräumen (hervorgerufen werden, behandelt)“ (LODEWIG 1939, S. 105). Ebenso publizierte er in der „Schweizerischen Technischen Zeitschrift“ eine Zusammenfassung der Zweitaufgabe von Kratzers „Das Stadtklima“ (1956) und schloss diese mit einem eindringlichen Appell an Forschung und Politik in der Schweiz, entsprechende Grundlagen zu erarbeiten und in die Stadtplanung einfließen zu lassen (LODEWIG 1957).

Dem wurde in Deutschland durch die Erstellung von Stadtklimaanalysen Rechnung getragen, zum Beispiel für verschiedene Städte an Rhein und Ruhr durch den Regionalverband Ruhr, Essen (RVR; früher Siedlungsverband Ruhrkohlenbezirk, SVR, Essen). Auch in Österreich flossen stadtplanerische Aspekte, so 1976 für Salzburg, 1985 für Klagenfurt und 1982 für Graz in Stadtklimaanalysen ein. Ähnlich wie Jahrzehnte zuvor in Stuttgart, wurde beispielsweise in der Stadtverwaltung Linz (A) während der 1960er Jahre ebenfalls eine eigene Stadtklimaabteilung eingerichtet.

Etwa von den frühen 1980er Jahren an etablierte sich die Stadtklimaforschung in verstärktem Maße auch an verschiedenen Universitäten der D-A-CH-Länder durch Gründung oder Umwidmung entsprechender Institute (so in Freiburg/Breisgau, Kassel, Essen, Berlin, Hannover, Karlsruhe, Bern, Basel und Wien). Das geschah insbesondere vor dem Hintergrund eines gesteigerten Umweltbewusstseins von Bevölkerung und Politik.

Sozusagen als Fortführung der auf Initiative von Steinhauser begonnenen Arbeiten zur Stadtklimatologie, wurde in Wien das vorliegende meteorologische und lufthygienische Datenmaterial für eine „anwendungsorientierte Klimatographie“ ausgewertet. Dieser erste „Klimaatlas“ machte nicht nur Aussagen zum Stadtklima von Wien (Abb. 12-5), sondern auch zu verschiedenen human-biometeorologischen Aspekten und bestach durch seine verständliche Darstellung, was ihn äußerst beliebt bei den Nutzern, nämlich Planern, Technikern, Baustoff- und Energieexperten, machte (AUER et al. 1989).

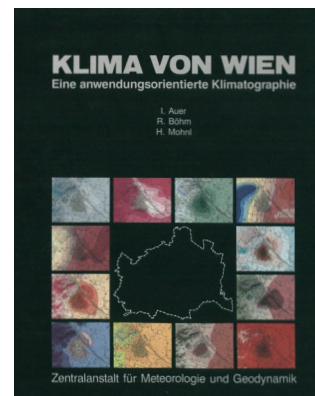


Abbildung 12-5: Deckblatt des Buches „Klima von Wien – Eine anwendungsorientierte Klimatographie“ von Ingeborg Auer, Reinhard Böhm und Hans Mohnl (aus AUER et al. 1989).

Auf internationaler Ebene wurde der Stand der Stadtklimaforschung in den 1980er Jahren in der von Helmut Landsberg publizierten Monographie „The Urban Climate“ (LANDSBERG 1981) – der Arbeit Kratzers von 1956 folgend – zusammengefasst: Hierin wurde neben der Behandlung der wichtigsten meteorologischen Elemente und ihre Beeinflussung durch große Städte auch auf den Aspekt der Stadtplanung aus meteorologischer Sicht eingegangen. Letztgenannter Faktor spielte zum Beispiel in Deutschland eine zunehmende Rolle wie entsprechende deutsche Publikationen zum Beispiel „Lufthygiene und Klima – Ein Handbuch zur Stadt- und Regionalplanung“ (SCHIRMER et al. 1993) bzw. „Stadtklima und Luftreinhaltung“ (HELBIG et al. 1999) belegen.

Vor dem Hintergrund der in einigen Industriegebieten Mitteleuropas (und auch Nordamerikas) vor allem seit der Mitte des 20. Jahrhunderts verstärkt auftretenden Smogepisoden, die überwiegend im Winterhalbjahr während austauscharmer Wetterlagen mit hohen Ruß- und SO_2 -Konzentrationen einhergingen, wurde dem Aspekt der „Immissionsklimatologie“ nicht nur in Österreich, sondern auch in Deutschland, besonders beispielsweise in der Industrieregion an Rhein und Ruhr, größere Beachtung geschenkt (KUTTLER 1979b).

Die Smogwetterlage in der ersten Dezemberwoche 1962, die sich besonders stark im Ruhrgebiet mit hohen Ruß- und SO_2 -Konzentrationen auswirkte (man beachte das Maximum in Abb. 12-6, Abb. 12-7), war mit ein ausschlaggebender Grund, dass nicht nur in Nordrhein-Westfalen, sondern in ganz Deutschland der Immissionsschutz durch Grün-



Abbildung 12-7: Smogwarntafeln weisen auf Fahrverbote während der Smoglage im Dezember 1962 im Ruhrgebiet hin (Foto: Wilhelm Kuttler).

derung entsprechend ausgerichteter Landes-, Bundes- und auch Universitätsinstitute, auf eine politisch wirksame Ebene gestellt wurde (WURZLER et al. 2023).

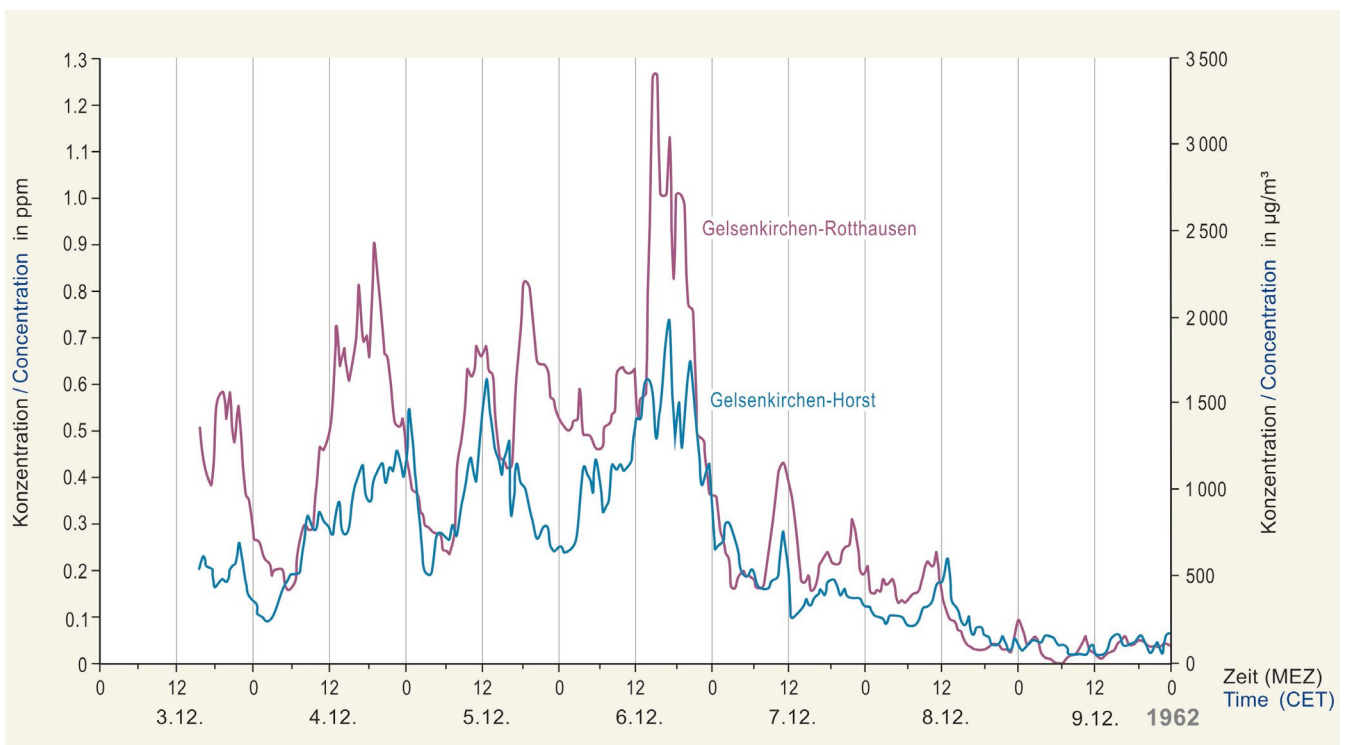


Abbildung 12-6: Stundenmittelwerte der SO_2 -Konzentrationen der Luft an zwei Messstationen im Ruhrgebiet während der Smogepisode vom 3. bis 9. Dezember 1962. Man beachte das Maxima, das in Gelsenkirchen-Rotthausen am 6.12., nachmittags, bei fast $3500 \mu\text{g m}^{-3}$ lag (aus KUTTLER et al. 2015).

Man besann sich in dieser Zeit auch dem schon seit langem bekannten indirekten Nachweis der Luftqualität durch pflanzliche Reaktionen. So wurden zum Beispiel Flechten, später aber auch höhere Pflanzen, insbesondere im Ruhrgebiet, dazu verwendet, eine räumliche Abgrenzung belasteter Luft zu ermöglichen (DOMRÖS 1966, GUDERIAN 1986).

Vor dem Hintergrund praxisorientierter Problemstellungen im Spannungsfeld zwischen Luftreinhaltung und Raumplanung, wurde auch die Schweiz ab den 1970er Jahren Schauplatz groß angelegter Stadtklimastudien. Eine der ersten und umfangreichsten stadtklimatologischen Untersuchungen dieser Zeit stellte das Forschungsprogramm KLIMUS (Klima und Lufthygiene im Raum Bern) dar. Basierend auf einem ausgedehnten Messnetz wurden von 1972 bis 1980 grundlegende Erkenntnisse zur Durchlüftungsdynamik des Aaregrabens, zur lufthygienischen Belastung durch Schwefeldioxid und Staub des Stadtgebiets, zu regionalen Windsystemen sowie zur städtischen Wärmeinsel Berns gewonnen, in Form von Klimaeignungskarten visualisiert und ausgehend von aktuellen Brennpunkten der Stadtentwicklung potentielle Ziel- und Nutzungskonflikte eruiert (MATHYS et al. 1980).

Auch wurden mehrere große Stadtklimastudien mit Fokus auf lufthygienisch-meteorologische Fragestellungen durchgeführt (WANNER 1983): In der Stadt Biel stand, neben der Untersuchung von lufthygienischen Wirkungsketten am topographisch komplexen Jura-Südfuß mittels Messdaten sowie numerischer Modelle, insbesondere die Erforschung von Auswirkungen der Luftverschmutzung (z. B. auch auf Flechten sowie Atemwegserkrankungen bei Kindern) im Zentrum (WANNER 1991 für eine Zusammenfassung). Parallel dazu erfolgten am Rheinknie Grundlagenarbeiten zu Klima und Lufthygiene im Raum Basel und wurden im Rahmen des Regio-Klima-Projektes weiter vertieft (REKLIP; PARLOW 1992, 1994, 1996; FIEDLER 1992). In der größten Schweizer Stadt, Zürich, steuerte das Geographische Institut der ETH zentrale Grundlagenarbeiten zum Verständnis der Meteorologie der städtischen Grenzschicht bei, die mittels Messungen in verschiedenen Höhen zwischen Boden- und Dachniveau sowie Modellierungen gewonnen wurden (SCHMID 1984, SCHUHMACHER 1984, ROTACH 1994). Trotz eines starken Fokus auf lufthygienische und raumplanerische Fragestellungen wurde dabei auch die Intensität der städtischen Wärmeinseln der größeren Schweizer Städte analysiert und von WANNER (1983) sowie WANNER und HERTIG (1984) zusammengefasst.

Aus methodischer Sicht bot die aufkommende Verfügbarkeit von Satellitendaten Anlass für erste fernerkundungsbasierte Stadtklimaanalysen, wie Untersuchungen zur räumlichen Ausprägung der städtischen Wärmeinseln in Deutschland, Österreich und der Schweiz (Bern, *Heat Capacity Mapping Mission* der NASA; WINIGER et al. 1982). Im Rahmen der internationalen Pilotstudie ERSCLIP (*ERS-Climate Project*) wurden zum Beispiel Satelliten-



Abbildung 12-8: Messturm auf dem Dach des ehemaligen Meteorologischen Instituts der Universität Basel, ausgestattet mit einer Vielzahl meteorologischer Messgeräte auf unterschiedlichen Höhen zur Untersuchung der vertikalen Turbulenzprozesse in der Stadthindernisschicht. Die Daten fanden unter anderem im BUBBLE-Projekt Anwendung (ROTACH et al. 2005; Foto: https://www.mcr.unibas.ch/dolueg2/projects/campaigns/BUBBLE/textpages/ov_frameset.en.htm).

daten für den Raum Basel als Grundlage für die Ableitung hochaufgelöster, stadtklimarelevanter Datensätze herangezogen (SCHERER et al. 1996, PARLOW et al. 1996), welche als Inputdaten für Stadtklima- und Bioklimamodelle sowie als Ausgangspunkt für Planungshinweiskarten verwendet wurden (PARLOW 1999). Daran anknüpfend, sowie als Ergänzung zu den Energiebilanzmessungen des REKLIP, wurden im Rahmen des Projektes BASTA (Basler Stadtklima Projekt) 1993 zur Quantifizierung vertikaler Turbulenzprozesse in der städtischen Grenzschicht entsprechende Turmmessungen vorgenommen (FEIGENWINTER et al. 1999).

Seit den 1970/80er Jahren wurde der Gesundheit der Stadtbevölkerung immer stärkere Beachtung geschenkt. Diesem human-biometeorologischen Forschungsgebiet widmeten sich nicht nur Universitäten, sondern auch entsprechende Fachvereinigungen, wie die *International Society*



Abbildung 12-9: Messwagen der Abteilung „Angewandte Klimatologie“ der Universität Duisburg-Essen zur Erfassung meteorologischer sowie gas- und partikelförmiger Luftinhaltsstoffe (Foto: Markus Nekes).

for *Biometeorology* (ISB), in zunehmendem Maße. In Deutschland waren es insbesondere Gerd Jendritzky (JENDRITZKY et al. 1979), Helmut Mayer und Peter Höppe (MAYER und HÖPPE 1987), die wegweisende Arbeiten zu körperphysiologischen Reaktionen auf den thermischen Wirkungskomplex veröffentlichten. Auf diesen bauten spätere Arbeiten zur Standardisierung von Indizes zur Wärmebelastung auf (zum Beispiel DeFREITAS und GRIGORIEVA 2015). Auch für den lufthygienischen Wirkungskomplex wurden in der Folgezeit entsprechende Standards geschaffen (beispielsweise MAYER 2006), wobei nicht nur der Analyse der gasförmigen, sondern auch der partikulären Luftinhaltsstoffe in der Stadtatmosphäre zunehmend Beachtung geschenkt wurde (WEBER et al. 2006).

Auch Einzelprojekte, wie dasjenige in Deutschland zum „Stadtklima Bayern“ (MAYER 1988) oder das kurz nach der Jahrtausendwende in der Schweiz durchgeführte *Basel Urban Boundary Layer Experiment* (BUBBLE; ROTACH et al. 2005) zur Analyse der Meteorologie der urbanen Grenzschicht führten zu einem immer besseren Verständnis vor allem der dreidimensional ablaufenden Prozesse innerhalb der Stadtatmosphäre. Bei diesem und folgenden Projekten griff man nicht nur auf mikrometeorologische Daten mehrerer Messstürme zurück (Abb. 12-8), sondern ergänzte diese mit Tracer- und Windkanalexperimenten (PLATE 1982), Vertikalsondierungen, Fernerkundungsdaten, mikro- und mesoskaligen Modellierungen (GROSS und ETLING 2003) und durch mobile Messungen mittels eines Messwagens (Abb. 12-9) (CHRISTEN 2005, ROTACH et al. 2005, EMEIS et al. 2007, FOKEN et al. 2023).

3.4 Aktualität und Ausblick

Vor dem Hintergrund des voranschreitenden anthropogenen Klimawandels und dessen Folgen, fällt der Stadtklimatologie seit Anbruch des 21. Jahrhunderts eine besondere Aufmerksamkeit, auch in gesellschaftlicher Hinsicht, zu

(MAYER und MATZARAKIS 2003; Tabelle 12-2). Einerseits sind Städte aufgrund der Bündelung wirtschaftlicher Aktivitäten für mehr als 70 % der anthropogenen Treibhausgasemissionen verantwortlich (IEA 2012, IIASA 2012), wodurch sie in den Fokus von Studien zur quantitativen Erfassung von CO₂ in der urbanen Grenzschicht (CRAWFORD und CHRISTEN 2015; KORDOWSKI und KUTTNER 2010) sowie zu dessen Reduktionsmöglichkeiten rücken (HEUSINGER und WEBER 2017). Andererseits werden die Auswirkungen des Klimawandels durch bauliche, klimatische und lufthygienische Eigenheiten von Städten verstärkt und stellen ein Risiko für die Gesundheit der Stadtbevölkerung sowie für die städtische Infrastruktur dar. Entsprechend nehmen Studien zu urbanen Anpassungsstrategien an Klimafolgen einen zunehmend bedeutenden Anteil der aktuellen Forschungs- und Publikationsfähigkeit innerhalb der Stadtklimatologie ein.

Das Thema der Klimaanpassung und zum Beispiel die Quantifizierung von Hitzereduzierungsoptionen wird zunehmend als notwendige Maßnahme wahrgenommen und liegt nicht nur im Fokus von Großstädten, sondern auch vieler wachsender Stadtgemeinden und Agglomerationen. Aufgrund der Verfügbarkeit präziser georeferenzierter Datenquellen auf lokaler, nationaler und internationaler Ebene hat sich die Erforschung der physisch-strukturellen Eigenschaften von Städten deutlich verbessert. Basierend auf Arbeiten in Deutschland, Österreich und der Schweiz sowie durch internationale Initiativen werden meist miteinander vergleichbare und hochauflösende Datensätze für städtische Gebiete generiert, welche in diversen flächennutzungsspezifischen Untersuchungen oder Rastermodelle einfließen können. Weitreichende Entwicklungen lassen die messende Stadtklimatologie immer stärker auch zu einer modellierenden und interdisziplinären Forschungsausrichtung werden.

Numerische Modelle spielen heutzutage besonders in der Stadtentwicklung bzw. Stadtplanung eine große Rolle, da mit ihrer Hilfe nicht nur räumlich hochaufgelöste und flächendeckende Informationen erstellt werden, sondern zahlreiche Szenarien in Hinblick auf die Urbanisierung, den Klimawandel sowie deren Wechselwirkungen untersucht werden können. Eine federführende Rolle spielt in Österreich Maja Žuvela-Aloise, die die ersten und zahlreichen Stadtklimaanalysen und Modellierungsstudien unter anderem zur Untersuchung der Wirksamkeit von Klimaanpassungsmaßnahmen mit dem vom Deutschen Wetterdienst entwickelten MUKLIMO_3-Modell (SIEVERS und ZDUNKOWSKI 1986) für österreichische Städte durchgeführt hat (ZUVELA-ALOISE et al. 2014, 2016, 2017). In Deutschland wurden zum Beispiel verschiedene räumlich hochauflösende numerische Modelle für die Lösung stadtklimatischer Probleme entwickelt (GROSS 2014, 2019, 2021; SCHLÜNZEN et al. 2016), wie das auf der *Large Eddy Simulation* (LES) beruhende *Parallelized LES Model for urban application* (PALM-4U; RAASCH und SCHRÖTER 2001, SCHERER et al. 2019, MARONGA et al. 2019).

Tabelle 12-2: Überblick über die Stadtklimaforschung im 20. und 21. Jahrhundert (nach YOSHINO 1990/91, OKE et al. 2017; ergänzt und verändert).

| Bezugszeitraum | Fortschritte in der Stadtklimaforschung |
|---------------------------------------|--|
| Anfang bis Mitte des 20. Jahrhunderts | <ul style="list-style-type: none"> • Überwiegend deskriptiv gehaltene Klimatographien einzelner Städte |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Neben Untersuchungen im Bereich der Luftverschmutzung vermehrte Analysen zum Thema Hitzebelastung in Städten |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Stadt-Umland-Vergleichsanalysen, vor allem im Bereich der Phänologie |
| Mitte bis Ende des 20. Jahrhunderts | <ul style="list-style-type: none"> • Stürmische Entwicklung der Stadtklimatologie, dokumentiert in zahlreichen Bibliographien z. B. durch die WMO (<i>World Meteorological Organisation</i>) |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Von der WHO (<i>World Health Organisation</i>) durchgeführte Tagungen (z. B. Brüssel 1968, <i>“Urban Climates and Building Climatology”</i>) sowie Symposien der IFHP (<i>International Federation for Housing and Planning</i>) |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Verfeinerung und Verbesserung von Messgeräten erlaubten bessere methodische Differenzierung von und stärkere analytische Herangehensweise an Stadtklimauntersuchungen |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Dreidimensionale Erfassung klimatischer und lufthygienischer Parameter in der urbanen Grenzschicht |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Verstärkte Nutzung von Fernerkundungsmethoden |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Numerische Simulationen und Windkanalanalysen |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Anfertigung von Stadtklimakarten, Einführung des Begriffes „Klimatop“ (in Deutschland); Aufkommen von Stadtklimaatlanten |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Publikation umfangreicher Bibliographien zur Stadtklimalliteratur |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Analyse stadtbedingter Niederschläge |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Qualitative und quantitative Analyse anthropogener Wärme (Industrie, Gebäudebeheizung, Kfz-Verkehr, metabolische Wärme) |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Typisierung der urbanen Wärmeinseln (Untergrund, Oberfläche, Atmosphäre) |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Verstärkte Durchführung von Stadtklimaanalysen auch in Entwicklungsländern |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Entstehung verschiedener Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI RL) im Fachbereich „Umweltmeteorologie“ |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Prozessorientierte Arbeiten zu urbanen Austauschprozessen (Flußmessungen meteorologischer und lufthygienischer Parameter mittels Eddy-Kovarianz-Methode) |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Ausweitung human-biometeorologischer Forschung; Schaffung von Indikatoren zum thermischen Wirkungskomplex (z. B. PET, pt, UTCI); Festlegung von Grenzwerten zum lufthygienischen Wirkungskomplex |

| Bezugszeitraum | Fortschritte in der Stadtklimaforschung |
|--|---|
| Ende des 20. und Anfang des 21. Jahrhunderts | <ul style="list-style-type: none"> • Stadtklima und globaler Klimawandel; Mitigations- und Adaptationsstrategien für Städte; Auswirkung der Urbanisierung |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Verstärktes Aufkommen räumlich hochauflösender numerischer Modelle für stadtmeteorologische Vorhersagen (beispielsweise das auf der <i>Large Eddy Simulation</i> (LES) beruhende Modell <i>Parallelized LES Model for urban application</i> (PALM-4U)) |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Erhöhter Bedarf an großen Rechenkapazitäten in der Modellierungsgemeinschaft, verstärkte Nutzung von effizienten Algorithmen und Techniken im Umgang mit großen Datensätzen |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung der lokalen, nationalen und internationalen Datengrundlage für Stadtklimaanalysen zur Beschreibung von räumlichen Strukturen, Formen und Mustern der Städte (z. B. <i>COPERNICUS High Resolution Layers</i>, <i>Urban Atlas</i>, <i>Local Climate Zones</i>) |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Anwendungsorientierte Forschung, interdisziplinäre Untersuchungen (z. B. Berücksichtigung sozioökonomischer Aspekte, Kosten-Nutzen-Analyse von Anpassungsmaßnahmen) |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Städteparametrisierung in operationellen numerischen Vorhersagemodellen (z. B. <i>TEB Model</i> von Masson) |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Vermehrte internationale und interdisziplinäre Zusammenarbeit |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Intensiver Austausch zwischen Experten aus Wissenschaft, Forschung und Verwaltung auf dem Gebiet der Stadtklimatologie (z. B. Kooperationen im Rahmen von Forschungsprojekten, Entwicklung des UHI-Strategieplans, Förderprogramm „Stadt der Zukunft“, Anstellung von Stadtklimatologen in Städten, Klimadirektor Wien) |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von technologischen und natürlichen Lösungen zur Reduzierung der Hitze in der Stadt (z. B. reflektierende Materialien, thermische Sanierung von Gebäuden, Schwammstadt-Prinzip, klimafitte Bäume), Umsetzung vor allem im Rahmen von Einzelstudien und Pilotprojekten |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Bedarf an Steuerungsinstrumenten sowie Grenz-, Kenn- und Zielwerte, um stadtklimatische Auswirkungen von (Städte-) Bauvorhaben und -Projekten nachvollziehbar und schlüssig abzuschätzen, bzw. Qualitäten rechtlich bindend vorzugeben |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Zunehmende Verfügbarkeit kostengünstiger und gleichzeitig qualitativ hochstehende Messtechnik (<i>Low-Cost</i>) |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Einbezug von Daten aus privaten Wetterstationen (<i>Crowdsourcing-based data</i>) |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von bodengestützten Fernerkundungsverfahren (z. B. Doppler-Wind-LIDAR, ALCs) |
| <ul style="list-style-type: none"> • Einsatz von Methoden der Künstlichen Intelligenz (z. B. neuronale Netzwerke) | |

Um die Güte von numerischen Modellen bestimmen zu können, sind räumlich und zeitlich hochaufgelöste Messdaten unverzichtbar. Qualitativ hochwertige Messungen zur Erfassung thermischer Eigenschaften von Städten sind vor allem aus finanziellen Gründen nicht realisierbar. Die Ausrüstung der Bevölkerung mit kostengünstigen Sensoren zur Beobachtung atmosphärischer Bedingungen bietet in städtischen Gebieten aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte große Potenziale und ihre Anwendbarkeit für stadtklimatische Fragestellungen wurde initiativ in Berlin etabliert (MEIER et al. 2017) und anschließend in verschiedenen

europäischen Ländern realisiert (NAPOLY et al. 2018). Bei diesen über das Internet zugänglichen Messnetzen und „Crowdsourcing-based“ Daten muss davon ausgegangen werden, dass sie nicht den Qualitätsstandards der traditionellen Messungen entsprechen. Diese können jedoch nach entsprechender Kontrolle – zum Beispiel anhand des Datenabgleichs mit offiziellen Beobachtungsstationen – vermehrt zur Analyse der aktuellen stadtklimatischen Gegebenheiten eingesetzt werden (FEICHTINGER et al. 2020, FENNER et al. 2021, HOLLÓSI et al. 2021, MEYER et al. 2021).

Beispielhaft für diese Entwicklung kann das stadtklimatologische Messnetz des Geographischen Instituts der Universität Bern aufgeführt werden, welches auf Basis von *Low-Cost*-Temperatursensoren sowie selbstgebauten Strahlungsschutzgehäusen die sommerliche Temperaturvariabilität in und um Bern festhält (GUBLER et al. 2021). Ähnliche Messnetze wurden auch in Berlin, Freiburg/Breisgau, Basel und in Zürich errichtet.

Universitätsinstitute aus den D-A-CH-Ländern widmeten sich auch maßgeblich internationalen Forschungs Kooperationen und weiteten den Untersuchungsfokus auf Städte anderer Länder aus. So beispielsweise die Forschungsgruppe um Eberhard Parlow an der Universität Basel im Kontext des Horizon 2020 Projekts *URBAN ANthropogenic heat FLUX from Earth observation Satellites* (URBAN-FLUXES), bei dem Basel als eine von mehreren Fallbeispiel-Städten fungierte (CHRYSOULAKIS et al. 2018, FEIGENWINTER et al. 2018) oder das Horizon 2020 Projekt *Integrated Climate Adaptation Service Tools for Improving Resilience Measure Efficiency* (CLARITY) mit der Beteiligung der ZAMG, in dem unter anderem neben der Pilotstadt Linz eine Stadtmodellierung für Neapel durchgeführt wurde.

An der ETH Zürich fokussierte man sich indes einerseits seit 2010 auf den Auf- und Ausbau eines multidisziplinären und internationalen Forschungszentrums in Singapur, an dem die Untersuchung und Modellierung der städtischen Wärmeinsel sowie entsprechender Minderungsmaßnahmen einen zentralen Teil der Forschungstätigkeit einnimmt (*Cooling Singapore*; siehe zum Beispiel MUGHAL et al. 2020, CHEW et al. 2021). Andererseits beschäftigte man sich auch mit Analysen großer Satellitendatensätze hinsichtlich der Kühlwirkung von grüner Infrastruktur in europäischen Städten (SCHWAAB et al. 2021). Aus diesen Entwicklungen lässt sich ein klarer Trend hin zu einer stärkeren Diversifizierung und Internationalisierung der Stadtklimaforschung ableiten.

4 Fazit

In summa zeigt der Rückblick auf die Entwicklung der Stadtklimatologie im D-A-CH-Raum, dass in den letzten rund 150 Jahren eine Vielzahl von Einzelpersonen sowie Forschungsgruppen und -institutionen grundlegende und teils wegweisende wissenschaftliche Erkenntnisse beisteuerten.

Vor dem Hintergrund einer zunehmend ausgereifteren stationären und mobilen Messtechnik, der stürmischen Weiterentwicklung numerischer und physikalischer Modellierungen, sowie der zunehmenden Nutzung von Satellitendaten, trat die angewandte Stadtklimatologie neben der Grundlagenforschung als praxisorientierte Teildisziplin auf, da die Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Meteorologie bzw. Klima, Luftqualität und Planung für die Entscheidungsträger im Städtebau eine immer be-

deutendere Rolle spielten. In Deutschland schlugen sich diese Ergebnisse nicht nur in entsprechenden Publikationen nieder (KATZSCHNER und MÜLDER 2008), sondern finden auch bis in die Gegenwart Eingang in deutsche gesetzliche Regelwerke sowie in verschiedene praxisorientierte Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI), insbesondere denen der Umweltmeteorologie (beispielsweise VDI 3785, 3787, 3789), die sich vorrangig auf die Umweltmedien „Klima und Luft“ beziehen. Klimatische und lufthygienische Aspekte sind feste Bestandteile der räumlichen Planung; der Bedarf an Planungshinweiskarten und -empfehlungen ist steigend. Heutzutage basieren die Studien vermehrt auf modellgestützten Analysen der bioklimatischen und umweltmeteorologischen Belastungen, um ein fachlich fundiertes Instrument zur vorsorgeorientierten Umweltplanung zur Verfügung zu stellen.

Mit Blick auf die Vergangenheit lässt sich erahnen, dass die Forschungsgemeinschaft in Deutschland, Österreich und der Schweiz vor dem Hintergrund einer immer stärkeren Beachtung und Relevanz stadtklimatologischer Fragestellungen auch in Zukunft eine prominente Rolle spielen wird – sowohl für lokale Betrachtungen wie auch auf dem internationalen Parkett.

Literatur

- AUER, I., BÖHM, R., MOHNL, H., 1989: Klima von Wien – Eine anwendungsorientierte Klimatographie. Magistrat der Stadt Wien (Hrsg.), *Beiträge zur Stadtforschung, Stadtentwicklung und Stadtgestaltung* **20**, 270 S.
- BEHRE, O., 1908: Das Klima von Berlin. Eine meteorologisch-hygienische Untersuchung. *Otto Sale*, Berlin, 158 S.
- CHEW, L.W, LIU, X., NORFORD, L.K., 2021: Interaction between heat wave and urban heat island: A case study in a tropical coastal city, Singapore. *Atmospheric Research* **247**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105134.
- CHRISTEN, A., 2005: Atmospheric turbulence and surface energy exchange in urban environments: results from the Basel Urban Boundary Layer Experiment (BUBBLE). Dissertation, Universität Basel, 142 S., doi: 10.5451/unibas-003631734.
- CHRYSOULAKIS, N., GRIMMOND, S., FEIGENWINTER, C. et al., 2018: Urban energy exchanges monitoring from space. *Scientific Reports* **8**, doi: 10.1038/s41598-018-29873-x.
- CRAWFORD, B., CHRISTEN, A., 2015: Spatial source attribution of measured urban eddy covariance CO₂ fluxes. *Theoretical and Applied Climatology* **119**, 733-755, doi: 10.1007/s00704-014-1124-0.
- DEFILA, C., CLOT, B., 2001: Phytopenological trends in Switzerland. *Int. J. Biometeorol.* **45**, 203-207.
- DE FREITAS, C.R., GRIGORIEVA, E.A., 2015: A comprehensive Catalogue and Classification of human thermal Climate Indices. *Int. J. Biometeorol.* **59**, 109-120.

- DOMRÖS, M., 1966: Luftverunreinigung und Stadtklima im Rheinisch-Westfälischen Industriegebiet und ihre Auswirkung auf den Flechtenbewuchs der Bäume. *Arbeiten zur Rheinischen Landeskunde* **23**.
- EMEIS, S., BAUMANN-STANZER, K., PIRINGER, M., KALLISTRATOVA, M., KOUZNETSOV, R., YUSHKOV, V., 2007: Wind and turbulence in the urban boundary layer – analysis from acoustic remote sensing data and fit to analytical relations. *Meteorol. Z.* **16**, 393-406.
- EVELYN, J., 1661: Fumifugium: Or the inconvenience of the aer and smoak of London dissipated. Published by His Majesties command, Printed by W. Godbid for Gabriel Bedel and Thomas Collins, London, 43 S.
- FEICHTINGER, M., DE WIT, R., GOLDENITS, G., KOLEJKA, T., HOLLÓSI, B., ŽUVELA-ALOISE, M., FEIGL, J., 2020: Case-study of neighborhood-scale summertime urban air temperature for the City of Vienna using crowd-sourced data. *Urban Climate* **32**, doi: 10.1016/j.uclim.2020.100597.
- FEIGENWINTER, C., VOGT, R., PARLOW, E., 1999: Vertical structure of selected turbulence characteristics above an urban canopy. *Theoretical and Applied Climatology* **62**, 51-63, doi: 10.1007/s007040050074.
- FEIGENWINTER C., VOGT, R., PARLOW, E., LINDBERG, F., MARCONCINI, M., DEL FRATE, F., CHRYSOULAKIS, N., 2018: Spatial Distribution of Sensible and Latent Heat Flux in the City of Basel (Switzerland). *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **11**, 2717-2723, doi: 10.1109/JSTARS.2018.2807815.
- FENNER, D., BECHTEL, B., DEMUZERE, M., KITTNER, J., MEIER, F., 2021: CrowdQC+ – A Quality-Control for Crowdsourced Air-Temperature Observations Enabling World-Wide Urban Climate Applications. *Frontiers in Environmental Science* **9**, doi: 10.3389/fenvs.2021.720747.
- FENSTERBUSCH, C. (Hrsg.), 1991: De architectura libri decem (Autor: Vitruvius). *Wiss. Buchgesell.*, Darmstadt, 585 S.
- FIEDLER, F., 1992: Das Regio-Klima-Projekt. Wie regeln die natürlichen Energieumsetzungen das Klima in einer Region? *KfK-Nachrichten* **24**, 125-131.
- FOKEN, T., PARLOW, E., GROSS, G., LEITL, B., 2023: Untersuchungsmethoden zum Stadtklima. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 97-114.
- GROSS, G., 2014: Observations and numerical simulations of the train-induced air flow in a subway station. *Meteorol. Z.* **10**, 535-546.
- GROSS, G., 2019: On the self-ventilation of an urban heat island. *Meteorol. Z.* **28**, 87-92.
- GROSS, G., 2021: A numerical study on the effects of natural ventilation on summer nighttime indoor temperatures in an urban area. *Meteorol. Z.* **30**, 227-236.
- GROSS, G., ETLING, C., 2003: Numerische Simulationsmodelle. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **30**, 28-38.
- GUBLER, M., CHRISTEN, A., REMUND, J., BRÖNNIMANN, S., 2021: Evaluation and application of a low-cost measurement network to study intra-urban temperature differences during summer 2018 in Bern, Switzerland. *Urban Climate* **37**, doi: 10.1016/j.uclim.2021.100817.
- GUDERIAN, R., 1986: Kriterien zur Erfassung und Bewertung von Immissionsbelastungen in terrestrischen Ökosystemen. *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie* **14**, 245-256.
- HAMMERL, C., 2005: 40 Jahre KRL – Kommission für Reinhaltung der Luft der Österreichischen Akademie der Wissenschaften 1962-2002. *Facultas Verlags- & Buchhandels AG*.
- HANN, J., 1885: Über den Temperaturunterschied zwischen Stadt und Land. *Zeitschrift der österr. Gesellschaft für Meteorologie* **20**, 457-465.
- HANN, J., SÜRING, R., 1915: Lehrbuch der Meteorologie. 3. Auflage. *Chr. H. Tauchnitz*, Leipzig.
- HELBIG, A., BAUMÜLLER, J., KERSCHGENS, M.J. (Hrsg.), 1999: Stadtklima und Luftreinhaltung. 2. A., *Springer*, Berlin, 467 S.
- HEUSINGER, J., WEBER S., 2017: Extensive green roof CO₂ exchange and its seasonal variation quantified by eddy covariance measurements. *Science of the Total Environment* **607/608**, 623-632.
- HOLLÓSI, B., ŽUVELA-ALOISE, M., OSWALD, S., KAINZ, A., SCHÖNER, W., 2021: Applying urban climate model in prediction mode – evaluation of MUKLIMO_3 model performance for Austrian cities based on the summer period of 2019. *Theoretical and Applied Climatology* **144**, 1181-1204, doi: 10.1007/s00704-021-03580-6.
- HOWARD, L., 1833: The Climate of London deduced from meteorological observation, 2nd ed., *Harvey and Darton*.
- IEA, 2012: World Energy Outlook 2012. International Energy Agency (IEA), Paris, Frankreich, Abruf am 25.04.2023, URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2012>.
- IIASA, 2012: Global Energy Assessment (GEA) 2012 – Toward a Sustainable Future. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria und Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, USA. Abruf am 21.06.2023, URL: http://assets.cambridge.org/97811070/05198/frontmatter/9781107005198_frontmatter.pdf.
- JANKOVIC, V., 2013: A historical review of urban climatology and the atmospheres of the industrialized world. *WIREs Clim. Change*, doi: 10.1002/wcc.244.
- JANKOVIC, V., HEBBERT, M., 2012: Hidden climate change-urban meteorology and the scales of real weather. *Climatic Change* **113**, 23-33.
- JENDRITZKY, G., SOENNING, W., SWANTES, H.-J., 1979: Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt- und Landschaftsplanung. *Beitrag ARL* **28**.
- KASSNER, C., 1910: Die meteorologischen Grundlagen des Städtebaus. 3. Vortragszyklus „Die meteorologischen Grundlagen des Städtebaus“; *Städtebauliche Vorträge* Band III, Heft VI, 1-26.

- KATZSCHNER, L., MÜLDER, J., 2008: Regional climatic mapping as a tool for sustainable development. *Journal of Environmental Management* **87/2**, 262-267.
- KNAUSS, D., 1901: Die Stuttgarter Stadterweiterung mit volkswirtschaftlichen, hygienischen und künstlerischen Gutachten. Stadtschultheissenamt Stuttgart 14, Nr. 132.
- KORDOWSKI, K., KUTTLER, W., 2010: Carbon dioxide fluxes over an urban park area. *Atmospheric Environment*, doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.04.039.
- KRATZER, P.A., 1937 und 1956: Das Stadtklima. 1. Auflage: 143 S., 2. Auflage: 184 S., Vieweg, Braunschweig.
- KUTTLER, W., 1979a: London-Smog und Los Angeles-Smog. *Erdkunde* **33**, 236-240.
- KUTTLER, W., 1979b: Einflussgrößen gesundheitsgefährdender Wetterlagen und deren bioklimatische Auswirkungen auf potentielle Erholungsgebiete. *Bochumer Geogr. Arbeiten* **36**, F. Schöningh Paderborn, 101 S.
- KUTTLER, W., 2012: Climate change on the urban scale – effects and counter measures in Central Europe. *Climate Change/ Book 1*, 105-146, doi: 10.5772/50867.
- KUTTLER, W., GROSS, G., 2023: Charakteristika des Stadtklimas. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 3-13.
- KUTTLER, W., MIETHKE, A., DÜTEMEYER, D., BARLAG, A.-B., 2015: Das Klima von Essen / The Climate of Essen. *Westarp Wissenschaft*, Hohenwarsleben, 249 S.
- KUTTLER, W., WEBER, S., 2023: Characteristics and phenomena of the urban climate. *Meteorol. Z. (early access article)*.
- LANDSBERG, H.E., 1981: The Urban Climate. *Academic Press*, New York, 275 S.
- LAUSCHER, F., 1984: Ozonbeobachtungen in Wien von 1853 bis 1981. Zusammenhänge zwischen Ozon und Wetterlagen. ZAMG (Hrsg.), *Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik* **284**, 29 S.
- LISAC, I., VUJNOVIC, V., MARKI, A., 2010: Ozone measurements in Zagreb, Croatia, at the end of 19th century compared to the present data. *Meteorol. Z.* **19**, 169-178.
- LODEWIG, F., 1939: Die Bedeutung der Grünanlagen dargestellt am Beispiel der Stadt Basel. *Das Werk: Architektur und Kunst* **26-4**, 105-114.
- LODEWIG, F., 1957: Das Stadtklima. *Schweizerische technische Zeitschrift* **54**, 960-961.
- MARONGA, B., GROSS, G., RAASCH, S. et al., 2019: Development of a new urban climate modell based on the modell PALM. *Meteorol. Z.*, doi:10.1127/metz/2019/0909.
- MATHYS, H., MAURER, R., MESSERLI, B., WANNER, H., WINIGER, M., 1980: Klima und Lufthygiene im Raum Bern – Resultate des Forschungsprogramms KLIMUS und ihre Anwendung in der Raumplanung. *Geographica Bernensia* **G 12**, Universität Bern, 55 S., doi: 10.4480/GB2019.G12.
- MAYER, H., 1988: Results from the Research Program “STADTKLIMA BAYERN” for Urban Planning. *Energy and Buildings* **11**, 115-121.
- MAYER, H., 2006: Indizes zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen und lufthygienischen Komponente des Klimas. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **66**, 165-174.
- MAYER, H., HÖPPE, P., 1987: Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology* **38**, 43-49.
- MAYER, H., MATZARAKIS, A., 2003: Zukunftsperspektiven der Umweltmeteorologie. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **30**, 57-66.
- MEIER, F., FENNER, D., GRASSMANN, T., OTTO, M., SCHERER, D., 2017: Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research. *Urban Climate* **19**, 170-191, doi: 10.1016/j.uclim.2017.01.006.
- MEYER, L., GUBLER, M., MEIER, F., BRÖNNIMANN, S., 2021: Intercomparison and combination of low-cost urban air temperature measurement approaches. *Meteorol. Z.* **31**, 131-148, doi: 10.1127/metz/2021/1107.
- MUGHAL, M.O., LI, X.-X., NORFORD, L.K., 2020: Urban heat island mitigation in Singapore: Evaluation using WRF/multilayer urban canopy model and local climate zones. *Urban Climate* **34**, doi: 10.1016/j.uclim.2020.100714.
- NAPOLY, A., GRASSMANN, T., MEIER, F., FENNER, D., 2018: Development and application of a statistically-based quality control for crowdsourced air temperature data. *Frontiers in Earth Science* **6**, doi: 10.3389/feart.2018.00118.
- NEUMANN, J., 1979: Air pollution in Ancient Rome. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **60**.
- NEUREITER, A., 2018: Temperaturmessfahrten Februar 1932 und 2018 – Auswirkungen geänderter Verbauung auf den Temperaturverlauf. Bachelorarbeit, Universität Wien, 44 S.
- OKE, T.R., MILLS, G., CHRISTEN, A., VOOGT, J.A., 2017: Urban Climates. *Cambridge University Press*, Cambridge, 525 S.
- PARLOW, E., 1992: REKLIP – Klimaforschung statt Meinungsmache am Oberrhein. *Regio Basiliensis* **33-2**, 71-80.
- PARLOW, E., 1994: Faktoren und Modelle für das Klima am Oberrhein. Das Regio-Klima-Projekt REKLIP. *Geographische Rundschau* **3-94**, 160-167.
- PARLOW, E., 1996: The regional climate project REKLIP – an overview. *Theoretical and Applied Climatology* **53**, 3-7.
- PARLOW, E., 1999: Stadtklimaforschung in der Schweiz. In: Stadtklima und Luftreinhaltung (VDI-Buch). HELBIG, A., BAUMÜLLER, J., KERSCHGENS, M.J. (Hrsg.), Springer, Berlin und Heidelberg, 419-425.
- PARLOW, E., SCHERER, D., BEHA, H.D., GOSSMANN, H., BRAUN, M., 1996: Urban climatological parameters derived from multisensor satellite data of ERS-1 and Landsat-TM. European Space Agency, *ESA-SP* **383**, 173-178.
- PEPPLER, A., 1929: Das Auto als Hilfsmittel der meteorologischen Forschung. *Zeitschrift für angewandte Meteorologie* **48**, 305-308.
- PLATE, E., 1982: Engineering meteorology. *Elsevier Scientific Publ.*, Amsterdam, 740 S.

- RAASCH, S., SCHRÖTER, M., 2001: PALM – A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers. *Meteorol. Z.* **10**, 363-372.
- ROETZER, T., WITTENZELLER, M., HAECKEL, H., NEKOVAR, J., 2000: Phenology in central Europe – differences and trends of spring phenophases in urban and rural area. *Int. J. Biometeorol.* **44**, 60-66.
- ROTACH, M., 1994: Determination of the zero plane displacement in an urban environment. *Boundary Layer Meteorology* **67**, 187-193.
- ROTACH, M., VOGT, R., BERNHOFER, C. et al., 2005: BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project. *Theoretical and Applied Climatology* **81**, 231-261, doi: 10.1007/s00704-004-0117-9.
- SCHERER, D., AMENT, F., EMEIS, S., FEHRENBACH, U., LEITL, B., SCHERBER, K., SCHNEIDER, C., VOGT, U., 2019: Three-Dimensional Observation of Atmospheric Processes in Cities. *Meteorol. Z.* **28**, 121-138, doi: 10.1127/metz/2019/0911.
- SCHERER, D., FEHRENBACH, U., PARLOW, E., BEHA., H.D., 1996: Determination of aggregated areal types from a Landsat-TM and ERS-1 based land-use classification for the agglomeration of Basel/ Switzerland. In: Progress in Environmental Remote Sensing Research and Applications. PARLOW, E. (Hrsg.), Rotterdam, 197-200.
- SCHIRMER, H., KUTTLER, W., LÖBEL, J., WEBER, K. (Hrsg.), 1993: Lufthygiene und Klima. *VDI-Verlag*, Düsseldorf, 507 S.
- SCHLÜNZEN, K.H., CONRADY, K., PURR, C., 2016: Typical performances of mesoscale meteorology models. *Air Pollution Modeling and its Application XXIV*, STEYN, D.G., CHAUMERLIAC, N. (Hrsg.), 447-457, doi: 10.1007/978-3-319-24478-5_72.
- SCHMID, H.P., 1984: Das horizontale Windfeld über dem Gebiet der Stadt Zürich. *Zürcher Geographische Schriften* **16**.
- SCHMIDT, W., 1930: Kleinklimatische Aufnahmen durch Temperaturfahrten. *Meteorol. Z.* **47**, 92-106.
- SCHUHMACHER, P., 1984: Windprofil über dem Stadtzentrum von Zürich. *Zürcher Geographische Schriften* **17**.
- SCHWAAB, J., MEIER, R., MUSSETTI, G., SENEVI-RATNE, S., BÜRGI, C., DAVIN, E.L., 2021: The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities. *Nature Communications* **12**, doi: 10.1038/s41467-021-26768-w.
- SIEVERS, U., ZDUNKOWSKI, W.G., 1986: A microscale urban climate model. *Beitr. Phys. Atmosph.* **59**, 13-40.
- STEINHAUSER, F., ECKEL, O., SAUBERER, F., 1955, 1957, 1959: Klima und Bioklima von Wien. Teil I (123 S.), Teil II (136 S.), Teil III (136 S.). Österr. Gesell. f. Meteorol. (Hrsg.), Wien.
- STIFTER, A., 1909: Aus dem alten Wien. Otto Erich Deutsch (Hrsg.), *Insel-Verlag*.
- UBA, 2022: Ozon-Belastung. Website des Umweltbundesamtes (UBA). Abruf am 25.04.2023, URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/ozon-belastung>.
- VALENTIN, J., 1901: Der tägliche Gang der Lufttemperatur in Österreich. *Denkschriften der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften - Mathematisch-Naturwissenschaftliche Classe* **73**. Jubelband zur Feier des fünfzigjährigen Bestandes der K. K. Centralanstalt für Meteorologie und Erdmagnetismus, Kaiserlich-Königliche Hof- und Staatsdruckerei, Wien.
- VDI, 2023: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Richtlinien zur Umweltmeteorologie, z. B. 3785, 3787, 3789. *Beuth Verlag*, Berlin.
- WANNER, H., 1983: Stadtklimatologie und Stadtklimastudien in der Schweiz. *Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft Bern*, 96-111.
- WANNER, H., 1991: Biel – Klima und Luftverschmutzung einer Schweizer Stadt. *Verlag P. Haupt*, Bern und Stuttgart.
- WANNER, H., HERTIG, J.-A., 1984: Studies of Urban Climates and Air Pollution in Switzerland. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **23**, 1614-1625.
- WEBER, S., KUTTLER, W., WEBER, K. 2006: Flow characteristics and particle mass and number concentration variability within a busy urban street canyon. *Atmospheric Environment* **40**, 7565-7578.
- WILD, H., 1881: Die Temperaturverhältnisse des Russischen Reiches. *Kaiserliche Akademie der Wissenschaften*, St. Petersburg und Leipzig.
- WINIGER, M., NEJEDLY, G., SCHWAB, Z., 1982: Satellitendaten in der Geländeklimatologie – Resultate des Projektes «Heat Capacity Mapping Mission» (HCCM). *Geographica Helvetica* **37**, 199-207.
- WOLF, R., 1855: Über den Ozongehalt der Luft und seinen Zusammenhang mit der Mortalität. Vorträge gehalten in der bernischen naturforschenden Gesellschaft, Bern.
- WURZLER, S., HEBBINGHAUS, H., ROGALLA, L., BECK, N., KLOSTERKÖTHER, A., GEIGER, J., 2023: Entwicklung der Luftqualität in der Metropolregion Rhein-Ruhr. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 51-60.
- YOSHINO, M., 1990/91: Development of urban climatology and problems today. *Energy and Buildings* **15**, 1-10.
- ŽUVELA-ALOISE, M., ANDRE, K., SCHWAIGER, H., BIRD, D. N., GALLAUN, H., 2017: Modelling reduction of urban heat load in Vienna by modifying surface properties of roofs. *Theoretical and Applied Climatology* **131**, 1005-1018, doi: 10.1007/s00704-016-2024-2.
- ŽUVELA-ALOISE, M., KOCH, R., BUCHHOLZ, S., FRÜH, B., 2016: Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. *Climatic Change* **135**, 425-438, doi: 10.1007/s10584-016-1596-2.
- ŽUVELA-ALOISE, M., KOCH, R., NEUREITER, A., BÖHM, R., BUCHHOLZ, S., 2014: Reconstructing urban climate of Vienna based on historical maps dating to the early instrumental period. *Urban Climate* **10**, 490-508, doi: 10.1016/j.uclim.2014.04.002.

Kontakt

PROF. DR. WILHELM KUTTNER

Universität Duisburg-Essen

Angewandte Klimatologie

Universitätsstr. 2

45141 Essen

wikutt@outlook.de

BRIGITTA HOLLÓSI, M.SC.

GeoSphere Austria (ehemals Zentralanstalt für

Meteorologie und Geodynamik)

Fachabteilung Stadtmodellierung

Hohe Warte 38

1190 Wien

Österreich

brigitta.hollosi@geosphere.at

DR. MORITZ GUBLER

Universität Bern

Geographisches Institut

Hallerstrasse 12

3012 Bern

Schweiz

moritz.gubler@unibe.ch