

Zum Stadtklima von Passau

Räumliche Differenzierung, Effekte und Implikation für die Stadtplanung

Thomas Fickert, Passau

Einleitung

Je nach Größe und topographischer Lage weisen Städte aufgrund von Oberflächenversiegelung, Bebauung, veränderter Luftzirkulation sowie Abwärme von Autos und Industrie ein vom jeweiligen Regionalklima mehr oder weniger deutlich abweichendes Mikro- und Mesoklima auf; man spricht daher auch von „Stadtklima“ bzw. aufgrund erhöhter Temperaturen gegenüber dem Umland von „urbanen Wärmeinseln“. In Großstädten können die Differenzen zwischen dem Stadtzentrum und dem Umland dabei mehrere Kelvin betragen (NÜBLER 1979, ADAM 1988, JACOBEIT 1984, FEZER 1995, PARLOW 2003, 2011, HENNINGER 2011, ENDLICHER 2012, KAMINSKE 2015). Aber auch innerhalb urbaner Räume zeigen sich in unmittelbarer Nachbarschaft z.T. große Differenzen aufgrund der Bebauungsstruktur mit unterschiedlicher Oberflächenalbedo, einem Mosaik aus beschatteten Straßenschluchten und strahlungsreichen Freiflächen sowie gegebenenfalls der Existenz von Grün- oder Wasserflächen (Abb. 1). Aufgrund des i. d. R. hohen Anteils versiegelter Fläche und/oder verdichteter Böden sowie Ableitung des Regenwassers in die Kanalisation liegt der Grundwasserspiegel in urbanen Räumen z. T. beträchtlich unter dem natürlichen Niveau, wie es sich im ländlichen Raum darstellt. Der Mangel an Feuchtigkeit und Vegetation verschärft die Erwärmungstendenz von Städten zusätzlich, da die einstrahlte Energie kaum zur Verdunstung aufgewendet und so in latente Energie umgesetzt wird, sondern stattdessen überwiegend als fühlbare Wärme vorliegt. Die Wärmeglocke über Städten führt zu Konvektion und Ausprägung eines lokalen Hitzetiefs, weshalb als „Flurwind“ bezeichnete Ausgleichsströmungen aus dem Umland in die überhitzten Bereiche der Stadt hinein einsetzen. Aufgrund des erhöhten Anteils an Kondensationskernen kann die

Konvektion auch zu erhöhter Bewölkung und Zunahme von Schauerniederschlägen im Stadtbereich führen (JACOBEIT 1984). Innenstadtbereiche und insbesondere Industrie und Gewerbegebiete sind zudem durch erhöhte Gehalte an Aerosolen und Luftschadstoffen gekennzeichnet (Abb. 1). Nicht selten werden diese bei vorherrschenden Windrichtungen (in Mitteleuropa v. a. aus Westen) aus den urbanen Räumen ins leeseitige Umland abgeführt, weshalb auch dort erhöhte Staub- und Schadstoffbelastung auftreten können.

Wie ausgeprägt sich stadtklimatische Effekte darstellen hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab (vgl. HENNINGER 2011). Aus makroklimatischer Sicht spielen Aspekte wie Breitenla-

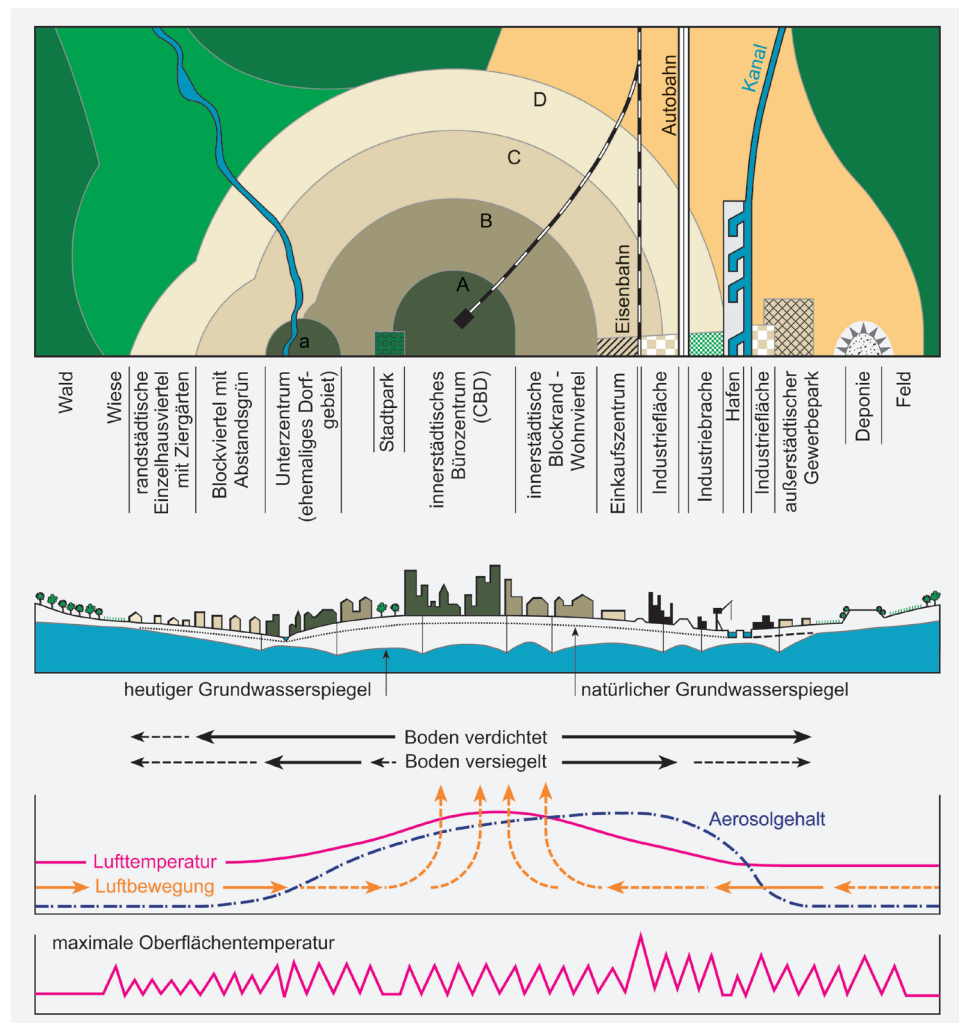


Abb. 1: Schematischer Querschnitt zur strukturellen Zonierung von Städten und den daraus resultierenden Gradienten wichtiger stadtoökologischer Parameter (aus: KAPPAS et al. 2003)

ge, Höhenlage und Kontinentalitätsgrad (d. h. Entfernung zu Meeren) eine Rolle. Entscheidender aber sind sicher mikro- bis mesoskalige Einflussgrößen wie Topographie von Stadt und Umland, Größe und Einwohnerzahl der Stadt, Heterogenität der Stadtstruktur, Versiegelungsgrad und die Dreidimensionalität der Gebäudestruktur. Sie alle wirken sich in Kombination auf die spezifische Situation hinsichtlich der Temperatur-, Feuchte- und Windverhältnisse von Städten sowie stadtinterner Muster aus (HENNINGER 2011).

Passau weist hinsichtlich Höhenlage, Topographie und Bebauungsdichte eine ausgesprochene Heterogenität auf (vgl. FICKERT et al. 2014), weshalb beträchtliche mikroklimatische Unterschiede sowohl Stadt-intern als auch zwischen Stadt und Umland zu erwarten sind. Um solche Unterschiede aufzudecken, wurden in den letzten Jahren im Rahmen von verschiedenen wissenschaftlichen Übungen mit Studierenden des Faches Geographie am Lehrstuhl für Physische Geographie der Universität Passau Klimamessungen sowie Untersuchungen zur Phänologie von Bäumen im Stadtgebiet von Passau durchgeführt. Der vorliegende Beitrag will einige Ergebnisse aus diesen wissenschaftlichen Übungen zur kleinräumigen Differenzierung der klimatischen Bedingungen im Stadtgebiet von Passau vorstellen und dabei auch auf die Bedeutung stadtklimatischer Phänomene für die Stadtplanung hinweisen.

Untersuchungs- und Auswertungsmethoden

Datenerhebung

Die im folgenden vorgestellten stadtklimatologischen Untersuchungen konzentrieren sich auf das engere Stadtgebiet von Passau, den Sporn zwischen der Ortspitze im Osten und Kohlbruck im Westen sowie vom südlichen Donau-Ufer im Norden bis zum Inn-Ufer am Beginn des Neuburger Waldes im Süden (vgl. Abb. 2). Zur Datenerhebung wurden unterschiedliche Verfahren herangezogen:

- stationäre Temperatur- und Luftfeuchtemessungen mit Hilfe von Klimadaten-Loggern, da keine Klimastation im engeren Stadtgebiet von Passau existiert;
- phänologische Untersuchungen, da Pflanzen als wichtige „integrierende Messinstrumente“ für Klima- und Witterungseinflüsse gelten (SCHNELLE 1955);
- mikroklimatische Messfahrten und 24h-Messungen zu Temperatur und Luftfeuchte mit Hilfe von mobilen Handmessgeräten, um stadtinterne Differenzen im jahres- und tageszeitlichen Gang aufzudecken.

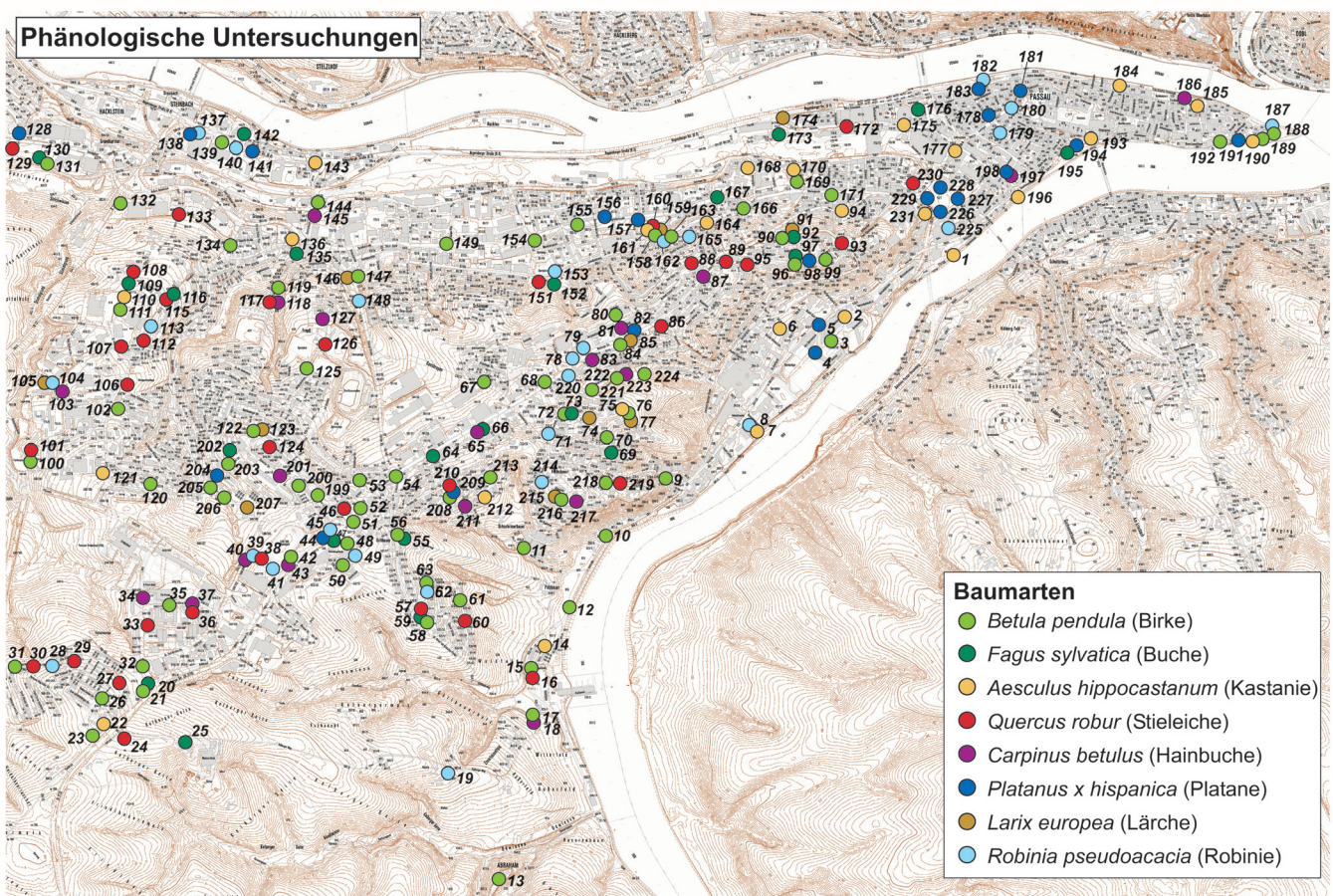
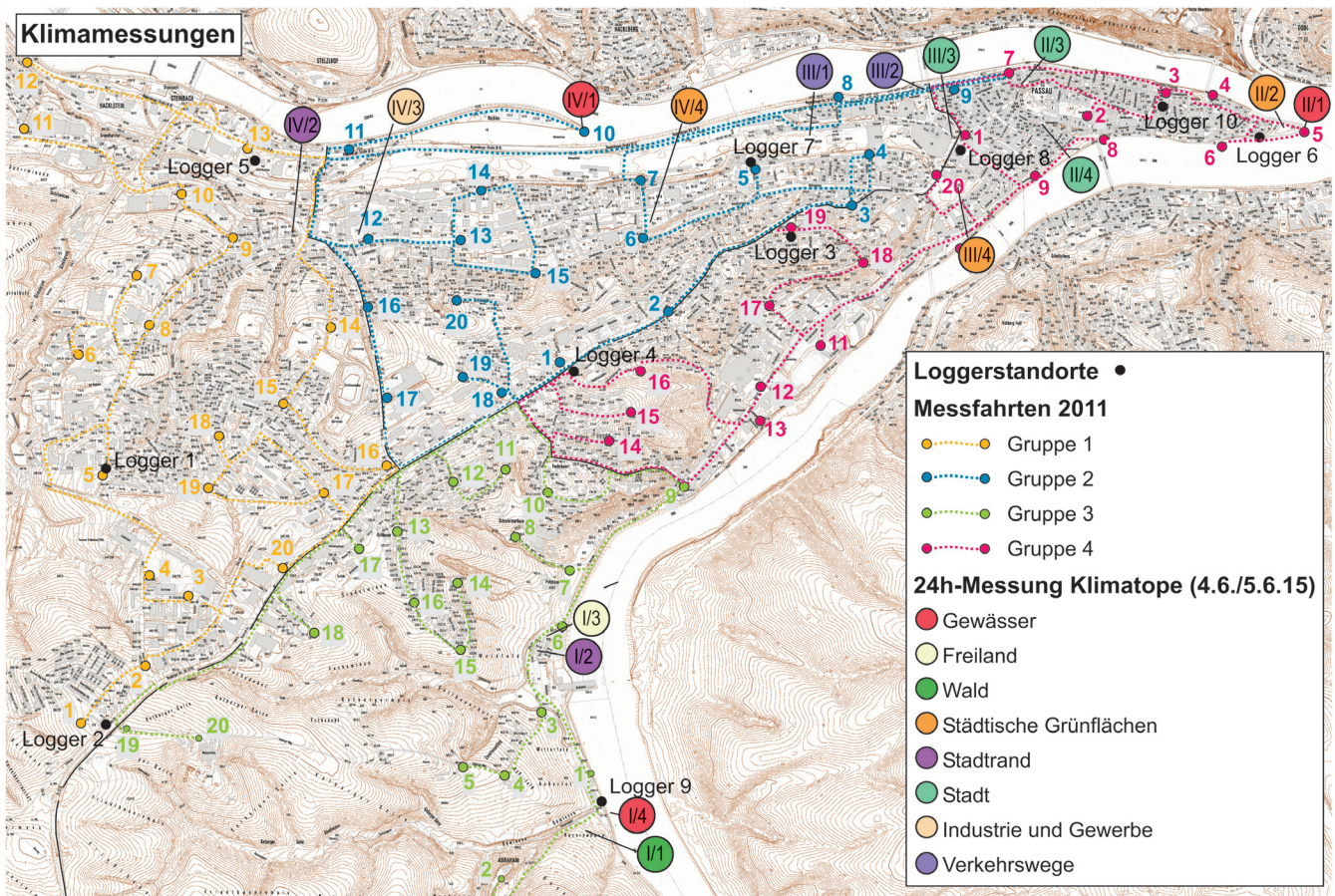
Daten-Logger des Modells HOBO Pro V2 der Firma Onset wurden an insgesamt 10 unterschiedlichen Standorten im Stadtgebiet installiert, die nicht nur erste Erkenntnisse zur stadtinternen Differenzierung von Temperatur und relativer Luftfeuchte in Abhängigkeit von Höhenlage, Exposition und Bebauungsdichte liefern, sondern auch als Referenzstationen für die Datenkorrektur der Messfahrten (siehe weiter unten) sowie für die Interpretation phänologischer Muster dienen.

Die Logger wurden jeweils in Nordexposition (Beschattung!) an Bäumen in drei Meter Höhe installiert und haben über etwa 2 ½ Jahre (16. Februar 2010 bis 26. Juli 2012) in halbstündigem Interwall Temperatur und Luftfeuchte aufgezeichnet. Die Standorte decken dabei verschiedene Höhenbereiche, Expositionen und Bebauungsdichten im Stadtgebiet von Passau ab.

Um Aussagen zur mikroklimatischen Differenzierung im Stadtgebiet von Passau über die 10 stationären Messstandorte hinaus machen zu können, wurden im Jahr 2011 Messfahrten mit insgesamt 80 Messpunkten mit mobilen Messgeräten des Modells Testo 635 durchgeführt, bei denen Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit gemessen wurden. Die 80 Messstandorte verteilen sich auf vier Teilgebiete mit jeweils 20 Messpunkten (vgl. Abb. 2), die im jeweils gleichen Zeitraum von vier Arbeitsgruppen mit Autos angefahren wurden (eine Fahrt dauerte ca. 2 Stunden bei ± synchronem Messstart). Die Messfahrten fanden bei Strahlungswetter statt, d. h. bei möglichst wolkenlosen Bedingungen, bei denen die Temperatur allein aus dem Strahlungsumsatz an den jeweiligen Oberflächen resultiert. Da solche Bedingungen im zu Nebelbildung neigenden Passau nicht so häufig auftreten verteilen sich die Messfahrten ungleichmäßig über das gesamte Jahr 2011, im Mittel wurde aber eine Messfahrt pro Monat durchgeführt (05.01.2011, 29.01.2011, 25.02.2011, 23.03.2011, 07.04.2011, 19.05.2011, 28.06.2011, 27.07.2011, 23.08.2011, 11.09.2011, 18.10.2011, 14.11.2011). Zur Erfassung der Tages-Minimumtemperaturen starteten die Messungen nachts ca. 2 Stunden vor Sonnenaufgang, zur Erfassung der Maximum-Temperaturen am Nachmittag ca. 2 Stunden vor Sonnenuntergang. Ziel der Messfahrten war es sowohl stadtinterne als auch Stadt-Umland-Gradienten der Temperatur und der Luftfeuchte in ihrem saisonalen Gang zu erfassen. Hier vorgestellt werden vier saisonal unterschiedliche Messungen.

Um darüber hinaus auch Informationen zum tageszeitlichen Gang – also nicht nur zu Minimum- und Maximumwerten – von Temperatur und Luftfeuchte zu erhalten, wurden im Juni 2015, auch wieder bei Strahlungswetter von 5:00 Uhr (04.06.2015) bis 5:00 (05.06.2015) an verschiedenen Standorten erneut mit den oben genannten Handmessgeräten 24-Stunden-Messungen zu Temperatur und relativer Luftfeuchte durchgeführt. Die Messstandorte decken dabei verschiedene Klimatope im Sinne von REUTER & KAPP (2012) ab und zeigen die mikroklimatische Variationsbreite im Stadtgebiet. Die Messungen fanden im Stunden-Takt statt, lediglich nachts, wo sich die Temperatur- und Luftfeuchte-

Abb. 2: Standorte der mikroklimatologischen (oben) und phänologischen Untersuchungen (unten) im engeren Stadtgebiet von Passau. Die Klimamessungen beinhalten stationäre Datenlogger sowie 24h-Stunden-Messungen ausgewählter Klimatope und Messfahrten mit mobilen Handmessgeräten. Die phänologische Entwicklung wurde an acht Baumarten mit über 200 Individuen durchgeführt (Kartengrundlage: Bayerisches Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung).



Bedingungen nur wenig verändern wurden einige Messzeitpunkte ausgelassen (23:00, 1:00, 2:00 und 3:00 Uhr). Da jede Arbeitsgruppe vier unterschiedliche Standorte, die in relativer Nähe zueinander lagen und somit binnen weniger Minuten mit dem Fahrrad zu erreichen waren, zu beproben hatte, erstrecken sich die Messungen von ca. 10 Minuten vor dem eigentlichen Messzeitpunkt bis ca. 10 Minuten danach (Beispiel: 11:50 am ersten der vier Standorte bis etwa 12:10 am letzten Standort). Diese minimalen Abweichungen vom eigentlichen Messtermin (hier 12:00 Uhr) beeinträchtigen einen Vergleich der einzelnen Standorte nicht.

In Erdregionen mit ausgeprägten Jahreszeiten, wozu Mitteleuropa zählt, passen sich Pflanzen in ihrem physiologischen und physiognomischen Zustand diesem saisonalen, primär thermisch determinierten Wandel an. Pflanzen reagieren mit phänologischen Erscheinungen weshalb sie als wichtige „integrierende Messinstrumente“ für Klima- und Witterungseinflüsse gelten (SCHNELLE 1955). Um gegebenenfalls bestehende phänologische Muster im Stadtgebiet von Passau zu erkennen, wurden bei hochfrequenten Begehungen (2 × pro Woche) die saisonalen Entwicklungserscheinungen wie Laubentfaltung, Blühbeginn, Vollblüte, Fruchtreife, Laubverfärbung und Laubfall an acht Baumarten mit über 200 Individuen im Jahr 2010 dokumentiert (vgl. Abb. 2).

Datenauswertung

Da bei klimatologischen Messfahrten zu unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedliche Standorte beprobt werden, können die Daten nicht unmittelbar zueinander in Bezug gesetzt werden. Hierfür ist zunächst eine Korrektur notwendig, bei der die gemessenen Werte anhand von Regressionsgleichungen auf die jeweiligen Minimum-Werte nachts und Maximum-Werte am Tag unter Verwendung von als Referenz dienenden Daten-Loggern umgerechnet werden. Hierbei liegt die (vereinfachte) Annahme zugrunde, dass die Abkühlung kurz vor Sonnenaufgang und die Erwärmung kurz vor dem tageszeitlichen Maximum linear verläuft und dass der Trend an allen Messpunkten annähernd gleich ist. Die Routen der Messfahrten starteten daher immer an einem Logger-Standort (vgl. Abb. 2). Anhand der Temperatur- und Luftfeuchtwerte der Logger während der Messkampagne können für die jeweilige Messfahrt Trendlinien der Zu- bzw. Abnahme der entsprechenden Klimaelemente erstellt werden und aus der zugehörigen Regressionsgleichung die zur Korrektur notwendigen Parameter entnommen werden.

Die entsprechende Formel zur Korrektur der gemessenen Werte für die Minimum- respektive der Maximumwerte (hier für Temperatur) lautet wie folgt:

$$T_{min} = T_{akt} - (a \times \Delta x + b)$$

$$T_{max} = T_{akt} + (a \times \Delta x + b)$$

wobei T_{min} und T_{max} die jeweilige Minimum- und Maximum-Temperatur bedeutet, T_{akt} die am jeweiligen Standort gemessene Temperatur, a die Steigung der Regressionsgeraden, Δx die Differenz zwischen aktuellem Messzeitpunkt und dem

Messzeitpunkt des Referenzloggers auf den T_{akt} bezogen werden soll und b den y-Achsenabschnitt aus der Regression (SAMIMI & STROBEL 2004). Veranschaulichen lässt sich diese Korrektur mit der Vorstellung, die aus den Logger-Messungen abgeleitete Trendgerade unter Beibehaltung der Steigung in die jeweiligen Messpunkte zu verschieben und entlang der Gerade die jeweiligen Minimum- oder Maximumwerte zu ermitteln.

Die korrigierten Messwerte werden mit dem jeweiligen Mittelwert in Beziehung gesetzt, um so die positive oder negative Abweichung der einzelnen Standorte zu berechnen. Nach vergleichbarem Verfahren wurde mit den phänologischen Phasen verfahren. Verfrühung bzw. Verzögerung, d. h. die Abweichung vom Art-spezifischen Mittelwert im Einsetzen einer bestimmten Phase (in Tagen) wurde für jede Baumart getrennt berechnet, da die jeweiligen Entwicklungen bei unterschiedlichen Baumarten nicht synchron verlaufen (bei der Kastanie *Aesculus hippocastanum* treten beispielsweise alle phänologischen Phasen viel früher ein als bei der Robinie *Robinia pseudoacacia*). Die Arts-spezifischen Abweichungen (in Tagen) sind dann wieder miteinander vergleichbar.

Sowohl die Messpunkte der klimatologischen Messfahrten als auch die des phänologischen Messnetzes wurde mit GPS (Garmin eTrex Vista G) eingemessen (Abb. 2), um im Anschluss die punktuellen Daten in einem GIS räumlich interpolieren und in Kartenform darstellen zu können. Dargestellt werden jeweils die Abweichungen von einem Mittelwert des gesamten Untersuchungsgebietes, um die Bereiche identifizieren zu können, die sich positiv oder negativ von diesem Mittelwert abheben. Die Kartendarstellung, sowohl der Klimamessfahrten als auch der phänologischen Entwicklung, erfolgte im Computerprogramm IDRISI Taiga, wobei zwischen den Datenpunkten, die ungleichmäßig im Datenraum verteilt vorliegen, interpoliert wurde. Als Interpolationsmethode wurde das sogenannte Kriging-Verfahren eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein flexibles geostatistisches Interpolationsverfahren, bei dem die räumliche Varianz im Datensatz, berücksichtigt wird und die Gewichtung der in die Berechnung einfließenden Messwerte für jeden zu interpolierenden Wert so gewählt wird, dass die Varianz des Schätzfehlers möglichst gering bleibt.

Naturräumliche Ausgangssituation im Umfeld vom Passau

Obwohl das Stadtklima primär auf der mikro- und mesoskaligen Maßstabsebene gesteuert wird, spielt das Makroklima dennoch eine nicht zu unterschätzende Rolle. Daher soll der Blick zunächst hierauf gerichtet werden. Die makroklimatische Ausgangslage für die Stadt Passau zu beschreiben bereitet aber – zumindest wenn man ins Detail gehen will – einige Probleme. Zwar existieren langjährige Klimadaten für Passau, die aber, wie sich bei genauerer Betrachtung herausstellt, nicht unbedingt repräsentativ für das eigentliche Stadtgebiet sind. Ab 1948 existierte für knapp 50 Jahre eine

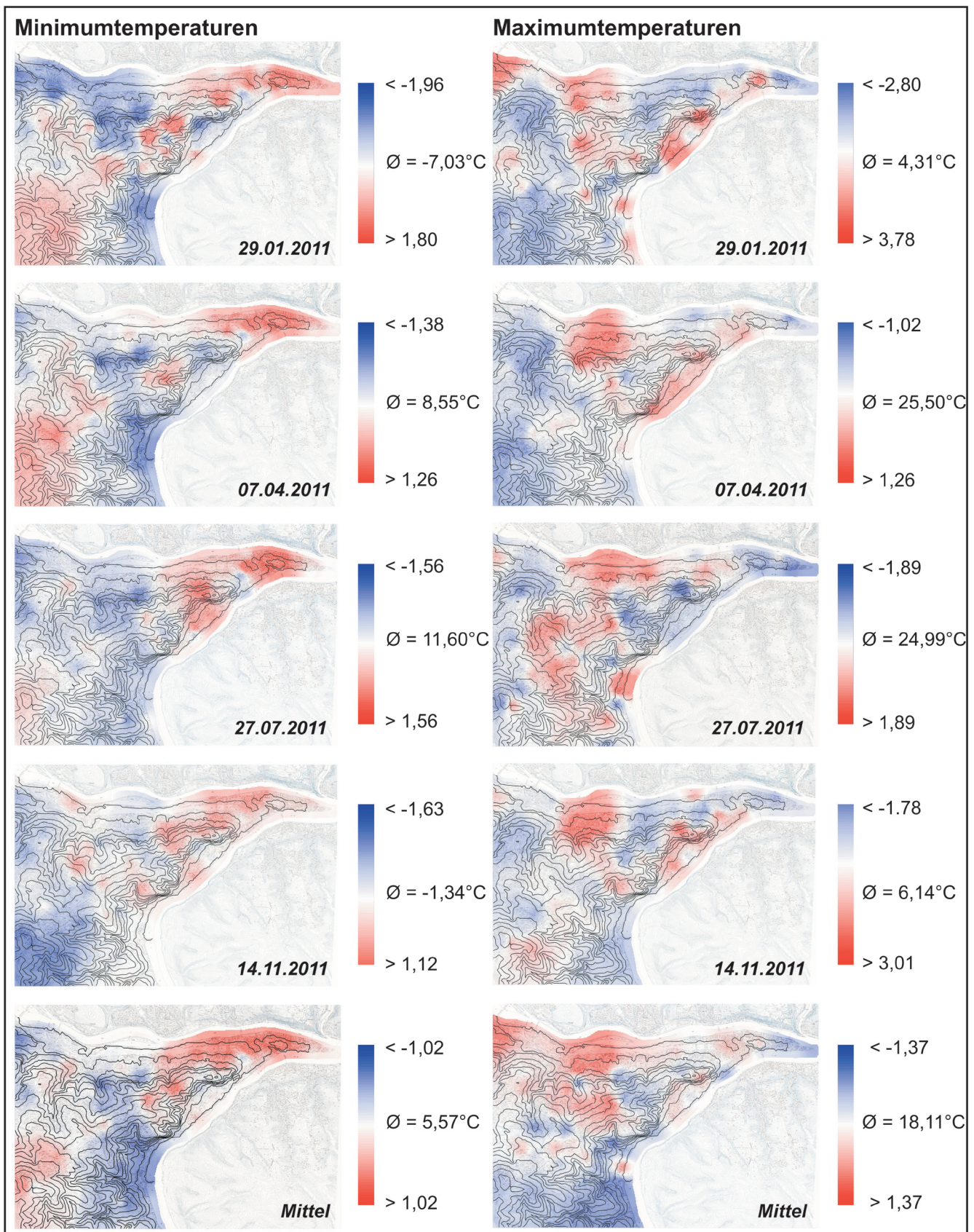


Abb. 5: Die Abweichung der tageszeitlichen Minimum- und Maximum-Temperaturen vom jeweiligen Mittelwert im gesamten Untersuchungsgebiet (d.h. mittlere Minimum und mittlere Maximum-Temperatur zum jeweiligen Messzeitpunkt) für Winter, Frühjahr, Sommer und Herbst sowie gemittelt für das gesamte Jahr zeigen die relativ überwärmten und relativ unterkühlten Bereiche im Stadtgebiet von Passau an (Kartengrundlage: Bayerisches Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung).

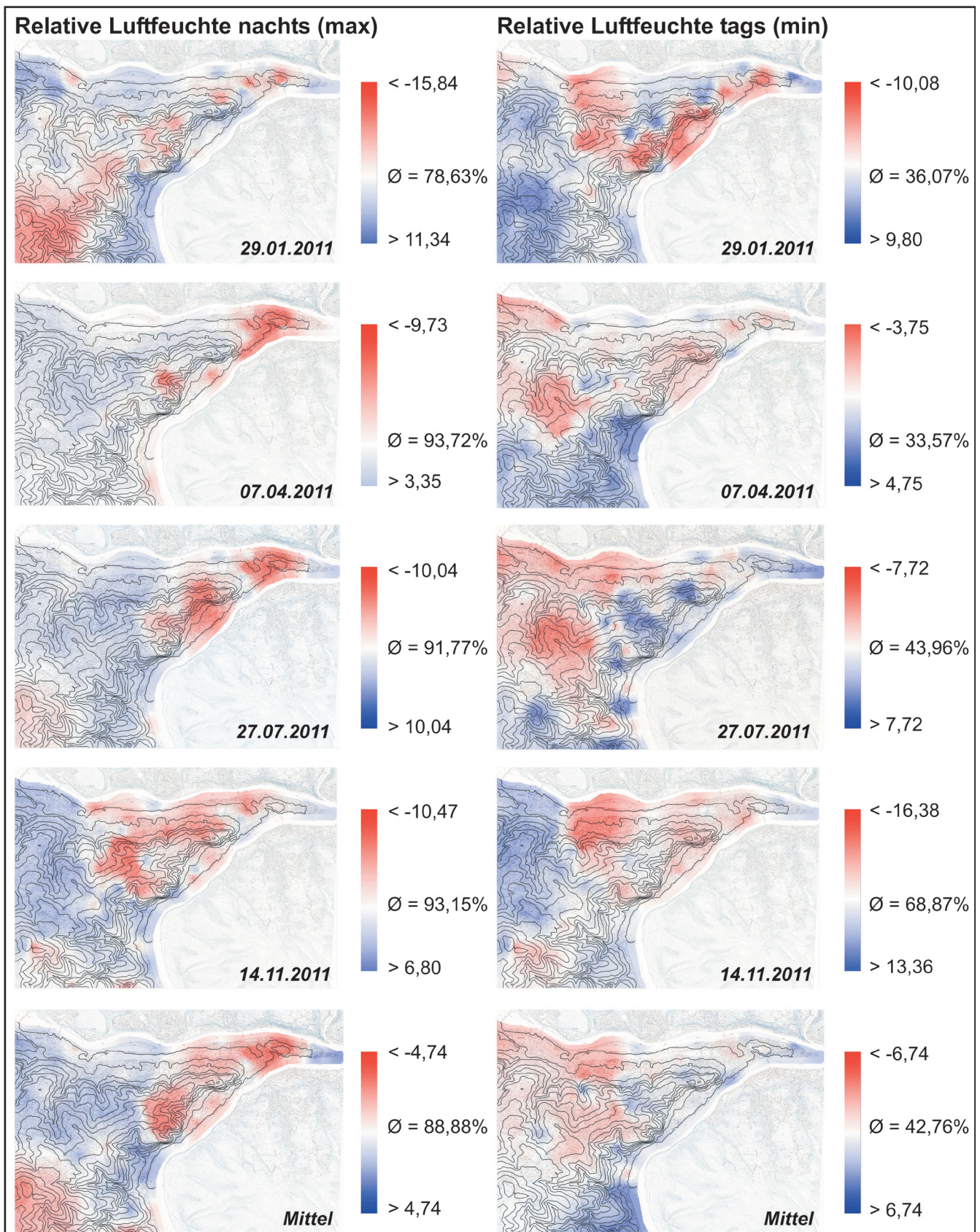


Abb. 6: Die Abweichung der relativen Luftfeuchte Werte vom Mittelwert im gesamten Untersuchungsgebiet nachts und am Tage zum jeweiligen Messtermin für Winter, Frühjahr, Sommer und Herbst sowie gemittelt für das gesamte Jahr zeigen die relativ trockeneren und relativ feuchteren Bereiche im Stadtgebiet von Passau an (Kartengrundlage: Bayerisches Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung).

Kleinräumige Klimadifferenzierung im Stadtgebiet von Passau

Die Kurven der Tagesmittelwerte der Temperatur an den 10 Logger-Standorten sowie der Klimastation Gföhret in Abbildung 4a zeigen zunächst die für Passau typische Witterungsunruhe mit rasch schwankenden Temperaturen, wie sie für Mitteleuropa generell charakteristisch ist (vgl. SCHULTZ 2000). Insgesamt laufen die Kurven sehr synchron, wobei sich bereits Unterschiede zwischen einzelnen Standorten in den Absolut-Werten erahnen lassen. Diese werden in den Kurven der Monatsmittelwerte umso deutlicher (Abb. 4b). Zu allen Jahreszeiten liegen z. T. mehrere Kelvin Temperaturunterschied zwischen einzelnen Messstandorten. Abbildung 4c zeigt, dass hierfür z. T. unterschiedliche Höhenlagen verantwortlich sind. Zugleich ist diesem Diagramm aber auch zu entnehmen, dass selbst bei mehr oder weniger gleicher Höhenlage (Logger 5 bis 10) deutliche Temperaturunterschiede bestehen, die offensichtlich auf Standort-Unterschiede aufgrund von Exposition, Nähe zu Wasserkörpern, Bebauungsstruktur, Kaltluftsammlung, etc. zurückzuführen sind.

Ein wesentlich feiner aufgelöstes Bild der kleinräumigen Differenzierung der Klimabedingungen im Stadtgebiet von Passau lässt sich aus den 80 Messpunkten der stadtklimatologischen Messfahrten ableiten. Abbildung 5 zeigt ein kleingekammertes Mosaik der Temperaturverhältnisse im Innenstadtbereich von Passau, das sich sowohl im tageszeitlichen als auch im saisonalen Gang herausbildet. Auffällig ist eine sich zu allen Jahreszeiten und auch im Jahresmittel abzeichnende nächtliche Überwärmung des Altstadtbereiches am Sporn zwischen Inn und Donau. Verantwortlich hierfür sind neben anthropogen erzeugter Abwärme insbesondere die starke Versiegelung und dichte Bebauung. Diese Oberflächen wirken wie einen Batterie, die sich tagsüber auflädt und dabei sehr viel Energie dem sensiblen und latenten Wärmefluss entzieht (PARLOW 2012). Dies ist auch ein entscheidender Grund warum Kernbereiche von Städten tagsüber nicht selten sogar etwas niedrigere Lufttemperaturen als die Randbereiche und das Umland aufweisen und somit z. T. urbane Kälteinseln bilden, wie es aus verschiedenen Untersuchungen belegt ist (siehe u.a. KUTTLER 2006, HENNINGER 2011, PARLOW 2011). Nachts wird die gespeicherte Energie wieder abgestrahlt, was zu weniger starker Abkühlung führt als in Bereichen mit geringerer Versiegelung/Bebauung und so den allseits bekannten Wärmeinseleffekt hervorruft. Ganz ähnliche Phänomene lassen sich im Altstadtbereich von Passau erkennen: eine mehr oder weniger ausgeprägte urbane Wärmeinsel zu praktisch allen Jahreszeiten nachts, tagsüber dagegen Verhältnisse, die eher einer urbanen Kälteinsel entsprechen (Abb. 5).

Um diesen scheinbaren Widerspruch verstehen zu können, muss ein Blick auf den Strahlungs- und Wärmehaushalt städtischer Oberflächen geworfen werden (vgl. PARLOW 2011). Die Strahlungsbilanz Q^* mit der Gleichung

$$Q^* = E_{sd} - E_{su} + E_{ld} - E_{lu}$$

setzt sich aus den Gliedern Globalstrahlung E_{sd} , kurzwelliger Reflexion E_{su} , atmosphärischer Gegenstrahlung E_{ld} und über die Oberflächentemperatur gesteuerte, ebenfalls langwellige Ausstrahlung E_{lu} zusammen. Aufgrund der deutlich erhöhten Oberflächentemperaturen von Gebäuden und versiegelten Flächen im urbanen Bereich ist auch die langwellige Ausstrahlung und damit die Verlustrate hoch. I. d. R. ist deshalb die Strahlungsbilanz am Tage in Städten weniger positiv als auf dem Land. Nachts ist die Strahlungsbilanz überall negativ, aufgrund der hohen Oberflächentemperaturen in der Stadt und der damit verbundenen hohen Abstrahlung aber im urbanen Umfeld noch stärker als auf dem Land.

Soweit zur Strahlungsbilanz. Für die Erwärmung der Lufttemperatur und die Ausbildung der urbanen Wärmeinsel nachts ist aber nicht die Strahlungsbilanz sondern der fühlbare Wärmefluss von Bedeutung. Er ist wie die Strahlungsbilanz Bestandteil des Wärmehaushalts mit folgender Gleichung

$$Q^* + Q_h + Q_l + Q_s = 0$$

wobei Q^* die Strahlungsbilanz, Q_h den fühlbaren Wärmefluss, Q_l den latenten Wärmefluss und Q_s den Bodenwärmefluss (=Speicherterm) darstellt.

Ist die Strahlungsbilanz positiv, wie es tagsüber der Fall ist, steht den übrigen Gliedern der Wärmehaushaltsgleichung Energie zur Verfügung, die für die Erwärmung der Luft (Q_h), des Bodens (Q_s) oder zur Verdunstung (Q_l) verwendet werden kann. Nur so kann die Gleichung zu Null aufgehen. Nachts bei negativer Strahlungsbilanz müssen dagegen die übrigen Glieder durch die Abkühlung von Luft und Boden sowie durch Kondensation von Wasserdampf Energie bereitstellen, um die Gleichung zu Null aufzulösen. Für den städtischen Wärmehaushalt spielt insbesondere der Speicherterm die entscheidende Rolle. Er verhält sich bei den künstlich gestalteten Oberflächen von Städten (Mauern, Dächer, Straßen, Parkplätze) völlig anders als bei natürlichen Oberflächen. Während der Speicherterm auf dem Land gerade mal 10% der Strahlungsbilanz ausmacht kann er in Städten bis auf 50% ansteigen (PARLOW 2003). Werden derart hohe Werte erreicht und ist eventuell sogar noch ein gewisser Teil an Feuchtigkeit vorhanden, der zur Verdunstung und damit der Überführung in latente Energie bereit steht, kann es passieren, dass tagsüber der fühlbare Wärmefluss in dicht bebauten Stadtbereichen niedriger ist als im Umland und damit die Lufttemperaturen geringer bleiben (urbane Kälteinsel). Der Ausgleich der negativen Strahlungsbilanz nachts sowie der in Städten auch nachts von der Oberfläche weg in die Atmosphäre gerichteten fühlbaren und sensiblen Wärmeflüsse wird fast ausschließlich vom Speicherterm vollzogen. Durch die Abgabe der tagsüber gespeicherten Energie sinken die Temperaturen in der Stadt nachts nicht so weit ab wie im Umland, sodass sich dann die urbane Wärmeinsel ausbilden kann.

Neben dem Altstadt-Bereich finden sich im untersuchten Ausschnitt des Stadtgebiets von Passau noch einige weitere

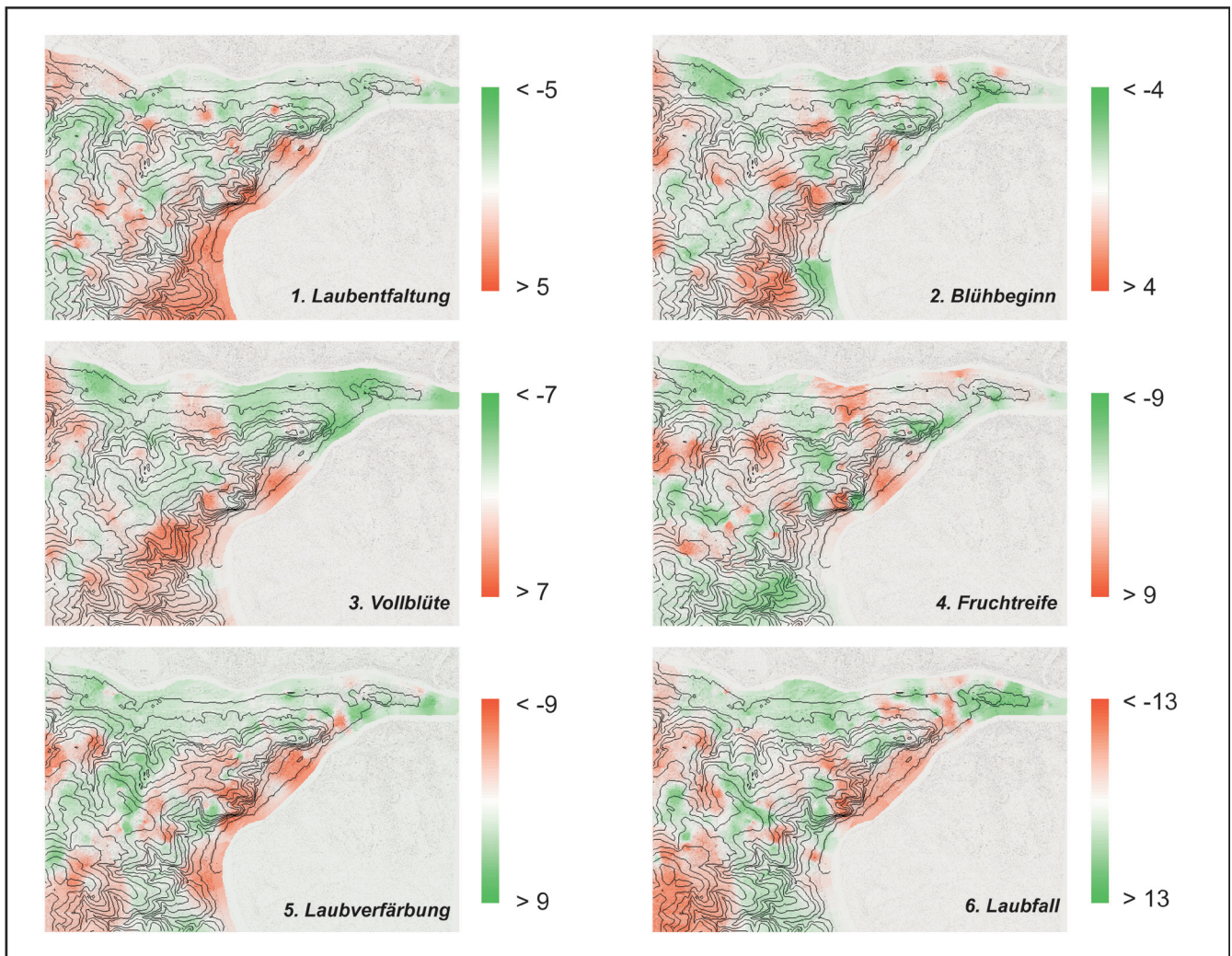


Abb. 7: Muster der phänologischen Entwicklung im Stadtgebiet von Passau. Negative Werte zeigen eine Verfrüherung im Eintreten der jeweiligen phänologischen Phase an (in Tagen vom Arts-spezifischem Mittel), positive Werte eine Verzögerung (ebenfalls in Tagen vom Arts-spezifischem Mittel). Bitte beachten: für die Herbstphasen wurde der Farbstrahl gespiegelt, braun zeigen hier also verfrühtes Laubverfärbung und Laubfall an, während bei den Frühjahrs- und Sommerphasen ein verfrühtes Eintreten einer phänologischen Phase (z.B. der Laubentfaltung) in grün dargestellt ist (Kartengrundlage: Bayerisches Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung).

Areale mehr oder weniger deutlicher Überwärmung nachts und relativer Unterkühlung tagsüber (etwa im Bereich der Neuburger Straße, vgl. Abb. 5), sodass auch in Passau korrekterweise von einem urbanen Wärme- respektive Kältearchipel gesprochen werden sollte (vgl. HENNINGER 2011). In Bereichen aufgelockerter Bebauung und guter Durchgrünung und einem eher natürlichen Verhältnissen nahekommenden Strahlungs- und Wärmehaushalt fehlen derartige Effekte weitgehend.

Daneben lässt Abbildung 5 die Existenz weiterer stadtklimatischer Muster vermuten. Die Donauseite scheint, zumindest im Jahresmittel, thermisch gegenüber der Innseite etwas begünstigt zu sein, was möglicherweise mit einer v. a. im Sommer bei hoher Schmelzwasserfracht im Inn um ca. 5 K höheren Wassertemperatur der Donau (vgl. EBNER 2002) begründet sein könnte. Die höheren Wassertemperaturen der

Donau sollten sich auch auf die Lufttemperatur im Ufernähe auswirken. Lokal und sehr kleinräumig fallen in Abbildung 5 ferner deutlich kühlere Temperaturen entlang kleiner Tiefenlinien auf (v. a. zur Donau hin ausgerichtet). Hierbei handelt es sich um Kaltluftbahnen entlang derer die spezifisch schwerere Kaltluft aus höher gelegenen Bereichen Passaus der Topographie folgend talwärts strömt.

Die Bedingungen der relativen Luftfeuchte, die in Abb. 6 dargestellt sind, spiegeln, wenig überraschend, weitgehend die Temperaturverhältnisse wieder, ist doch der Prozentsatz, zu dem ein Luftpaket wasserdampfgesättigt ist, von der Lufttemperatur abhängig. Etwas generalisiert lässt sich festhalten, dass die unterkühlten Bereiche sowohl tagsüber als auch nachts feuchter sind, die überwärmten Bereiche trockener.

Auswirkungen des Stadtklimas auf die Phänologie von Stadtbäumen

Seit langem gelten Pflanzen als wichtige „integrierende Messinstrumente“ für Klima- und Witterungseinflüsse (SCHNELLE 1955). In den gemäßigten Breiten Mitteleuropas passen sich die Pflanzen in ihrem physiologischen und physiognomischen Zustand dem Wechsel der Jahreszeiten an. Die Synchronisation der Wachstumsperiode ist dabei primär über die Temperatur gesteuert („Thermoperiode“), allerdings existiert mit dem sog. Photoperiodismus (Tageslängen) eine Art Rückversicherung, die die Pflanzen vor einem zu frühen Start (Spätfrostgefahr) bzw. zu spätem Ende der Wachstumsphase (Frühfrostgefahr) schützt (MENZEL 2007). Thermische Unterschiede z.B. zwischen Stadt und Umland bzw. innerhalb von Siedlungsgebieten können zu Verfrühung bzw. Verspätung im einsetzen phänologischer Phasen führen, die als indirekte Klimainformation dienen können („Bioindikation“). Insbesondere bei den temperatursensitiven Frühjahrsphasen haben sich in verschiedenen Untersuchungen Verfrühungen von bis zu 12 Tagen pro Kelvin Temperaturzunahme gezeigt und für die Sommerphasen immerhin noch bis zu 7,5 Tagen/K. Die Herbstphasen treten aufgrund thermischer Begünstigung i. d. R. verzögert auf, obwohl in Einzelfällen auch von gegenläufigen Entwicklungen (z.B. verfrühte Laubverfärbung) in urbanem Kontext berichtet wird (vgl. RÖTZER 2007).

Die in Abbildung 5 gezeigten Bereiche relativer Überwärmung bzw. relativer Unterkühlung spiegeln sich z. T. auch in phänologischen Mustern wieder (Abb. 7). Die Farbgebung in den Karten in Abb. 7 wurden dabei so gewählt, dass bei den Frühjahrs- und Sommer-Phasen grün eine Verfrühung

der jeweiligen Phase ausdrückt, während braun auf eine verzögerte Entwicklung hinweist. Bei den Herbstphasen (Laubverfärbung und Laubfall) bedeutet braun hingegen ein frühes Einsetzen der entsprechenden phänologischen Phase, grün ein verspätetes. Durch diese Farbgebung erscheinen in grüner Farbe jene Bereiche mit einer längeren Vegetationszeit (früheres Einsetzen der Frühjahrsphasen und verspätetes Einsetzen der Herbstphasen), was als thermische Begünstigung interpretiert werden kann. In braun erscheinen diejenigen Bereiche mit einer kürzeren Vegetationsperiode, was analog thermisch benachteiligte Standorte bedeutet. Auch in den phänologischen Mustern stellt sich die Donau-Seite als gegenüber der Inn-Seite begünstigt dar, ebenso erweist sich der Altstadt-Bereich als thermischer Gunstraum. Dort hingegen wo durch die mikroklimatischen Messungen Kaltluftbahnen detektiert wurden, zeigen sich z.T. auch Verzögerungen in der phänologischen Entwicklung der Frühjahrs- und Sommerphasen. Für den Zeitpunkt des Einsetzens der Herbstphasen scheint dies jedoch keine Rolle zu spielen.

Dass die phänologischen Muster nicht eins zu eins die mikroklimatische Differenzierung nachzeichnen, hängt damit zusammen, dass die phänologische Entwicklung von Bäumen nicht ausschließlich als Reaktion auf Temperatur-Reize zu verstehen ist. Hier spielt die Physiologie eines jeden Individuums, Baumalter, Schwächung durch Krankheiten (z.B. Kastanien-Miniermotte) oder Abgasbelastung sowie unterschiedliche Standortbedingungen eine manchmal ebenso wichtige Rolle als klimatische Vorgaben. Immer wieder konnten nebeneinanderstehende Individuen derselben Baumart mit unterschiedlicher phänologischer Entwicklung beobachtet werden. In Abb. 7 sollte daher nicht jeder kleinräumige Farbwechsel als Klimainformation gewertet werden.

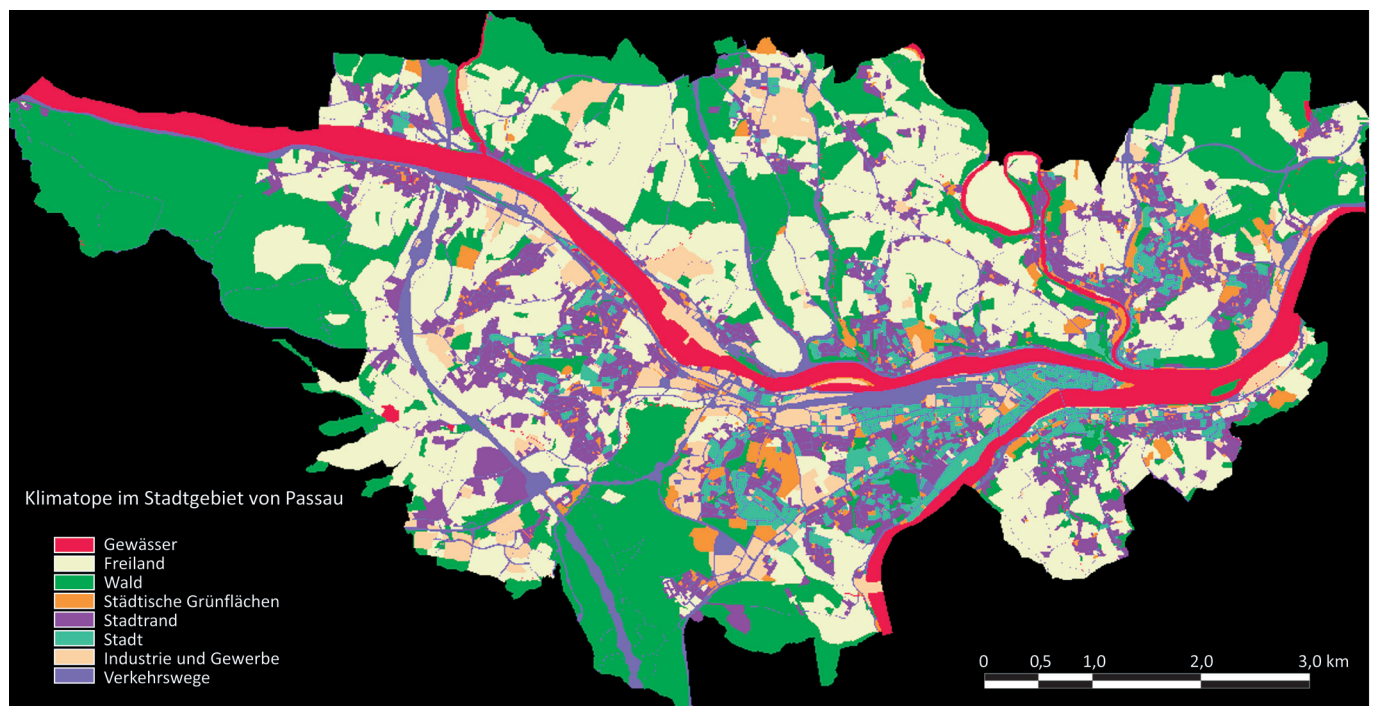


Abb. 8: Im Stadtgebiet von Passau vertretene Klimatope, abgeleitet aus der Stadtstruktur-Kartierung in FICKERT et al. (2014)

Temperatur- und Luftfeuchtetagesgänge ausgewählter Klimatope

Um Unterschiede im Tagesgang von Temperatur und Luftfeuchte innerhalb des Stadtgebietes von Passaus zu erfassen, wurden 24-Stunden-Messungen repräsentativer Standorte unterschiedlicher Bedingungen, sog. Klimatope, durchgeführt. Unter Klimatopen sollen hier in Anlehnung an REUTER & KAPP (2012) Gebiete mit ähnlicher mikroklimatischer Ausprägung verstanden werden, die sich im urbanen Umfeld in erster Linie aus der Bebauungsstruktur und der Flächennutzung ergeben. Anhand der von FICKERT et al. (2014) vorgelegten Kartierung zur Stadtstruktur Passaus lassen sich in Anlehnung an REUTER & KAPP (2012) folgende acht Klimatope für das Stadtgebiet von Passau ausweisen (Abb. 8):

- *Gewässer-Klimatop*: Wasserflächen üben wegen der ihrer spezifischen Wärmekapazität einen mäßigenden Einfluss auf die tages- und jahreszeitlichen Temperaturgänge ihrer Umgebung aus; zudem sind Luftfeuchtigkeit und Windoffenheit hoch.
- *Freiland-Klimatop*: ausgeprägte Tages- und Jahresgänge von Temperatur und Luftfeuchte; bei Strahlungswetterlagen insbesondere nachts verstärkte Kaltluftproduktion aufgrund hoher Ausstrahlung.
- *Wald-Klimatop*: stark gedämpfte Tages- und Jahresgänge von Temperatur und Luftfeuchte; tagsüber aufgrund von Beschattung und hoher Transpiration niedrige Temperatur und hohe Luftfeuchte, nachts vergleichsweise milde Temperaturen aufgrund reduzierter Ausstrahlung.
- *Städtisches Grünflächen-Klimatop*: niedrige Temperaturen und hohe Luftfeuchte sowie mehr oder weniger ausgeprägte Tagesgänge dieser beiden Klimaelemente wirken sich ausgleichend auf die bebaute und zumeist überwärmte Umgebung aus.
- *Stadtstrand-Klimatop*: zumeist niedrige, aber z.T. dicht stehende Gebäude mit mehr oder weniger hohen Anteilen an Grünflächen.
- *Stadt-Klimatop*: dichte, z.T. mehrgeschossige Bebauung mit wenig Anteilen von Grünflächen; starke Energiespeicherung tagsüber, geringe Abkühlung nachts, woraus der bereits angesprochene Wärmeineffekt resultiert; lokale und regionale Windsysteme aufgrund der dichten Bebauung eingeschränkt, sodass Luftschadstoffbelastung z.T. stark erhöht.
- *Industrie- und Gewerbe-Klimatop*: stark verdichtete Bebauung und Versiegelung, Wärmeineffekt und starke Schadstoffbelastung
- *Verkehrswege-Klimatop*: ausgeprägte Temperaturdifferenzen zwischen extremer oberflächennaher Erwärmung tagsüber und nächtlicher Abkühlung.

Von diesen acht Klimatopen wurden im Juni 2015 jeweils mindestens eines, z.T. auch mehrere (vgl. Abb. 2) einer 24h-Messung unterzogen, um eine Vorstellung vom tageszeitlichen Gang von Temperatur und Luftfeuchte dieser unterschiedlichen Standorte und generell der Klimavariabilität innerhalb des Stadtgebiets von Passaus zu bekommen. In

Abb. 9 ist für jedes Klimatop exemplarisch ein Temperaturhöhen-schichten-Diagramm dargestellt (zur Lage vgl. Abb. 2), das die Veränderung der Temperatur im Tagesgang zeigt. Wenig überraschend zeichnen sich die Klimatope Stadt, Verkehrsweg sowie Industrie- und Gewerbe durch hohe nachmittägliche Maximaltemperaturen aus. Hier werden über 40°C in Oberflächennähe erreicht, während mit mehr als 14°C in der Nacht die Minima relativ hoch bleiben, zumindest im Vergleich zum Umland (Wald, Freiland und Stadtstrand). Interessanterweise erreichen auch die Klimatope Stadtstrand und Freiland annähernd gleich hohe Tagesmaxima wie die stark versiegelten Standorte in der Stadt, was mit der geringen Ableitung der Energie in Baumaterialien und dem gleichzeitig geringen Energieumsatz in den latente Wärmestrom zu tun hat. Gerade Wiesen wie der bemessene Freilandstandort erlauben mit der hier vorherrschenden Grasvegetation, die mit ihren eher vertikal ausgerichteten Halmen viel Strahlung bis zum Boden durchlässt, bei relativ trockenen Böden eine starke Erwärmung der Bodenoberfläche (RICHTER 1997). Nachts zeigen sich beide Standorte deutlich kühler als die urbanen Standorte was auf eine hohen Abstrahlung und gleichzeitig geringe Wärmespeicherung hinweist. Völlig andere Bedingungen zeigt der Wald-Standort. Hier entwickelt sich aufgrund der starken Überschildung der Bäume ein ganz eigenes, kühleres und feuchteres Bestandsklima, das am Tage nicht einmal 26°C erreicht. Eine ganz ähnliche Situation zeigt sich in innerstädtischen Grünanlagen sofern sie dicht von Bäumen bestanden sind, wie die hier dargestellte Parkanlage an der Spitalhofstraße. Trotz zentrumsnaher Lage in stark versiegeltem und überbautem Umfeld und relativ geringer Größe bleiben die Temperatur-Maxima deutlich unter denen anderer innerstädtischer Standorte.

In dieser Parkanlage wurde zusätzlich ein 25 Meter langes Profil bemessen, das sich aus dem Park über unterschiedliche Untergründe hinweg bis zur angrenzenden Teerstraße erstreckt (Abb. 10). Dieses Profil belegt extreme Gradienten auf kurzer Distanz (10 K auf 25 Meter), was die besondere Bedeutung von (baumbestanden) Grünflächen innerhalb der Stadt zu Dämpfung der urbanen Überwärmung hervorhebt. Die erhöhte Evapotranspiration und die damit verbundene verstärkte Umsetzung fühlbarer in latente Energie („Verdunstungskühle“) tagsüber sowie die Kaltluftbildung nachts setzen eine dem übergeordneten Flurwind zwischen Stadt und Umland vergleichbare, nur sehr viel kleinere Luftzirkulation in Gang, die dem Druckgefälle folgend von den Grünflächen (Hochdruck) in die überwärmten Stadtviertel (Tiefdruck) strömt („Park-Briese“ vgl. auch BONGARDT 2006). Je größer solche innerstädtischen Grünflächen sind, umso stärker ist der Effekt, aber selbst kleinere Grünflächen rufen merk- und messbare Abkühlungseffekte für die Umgebung hervor.

Das Gewässer-Klimatop schließlich, bei dem von einem Bootssteg aus über dem Inn gemessen wurde zeigt aufgrund der hohen Einstrahlung an einem fast ganztägig unbeschatteten Standort relativ hohe Temperaturen, die durch den unterlagernden Wasserkörper aber dennoch gedämpft werden. Dies wird auch darin deutlich dass anders als über ter-

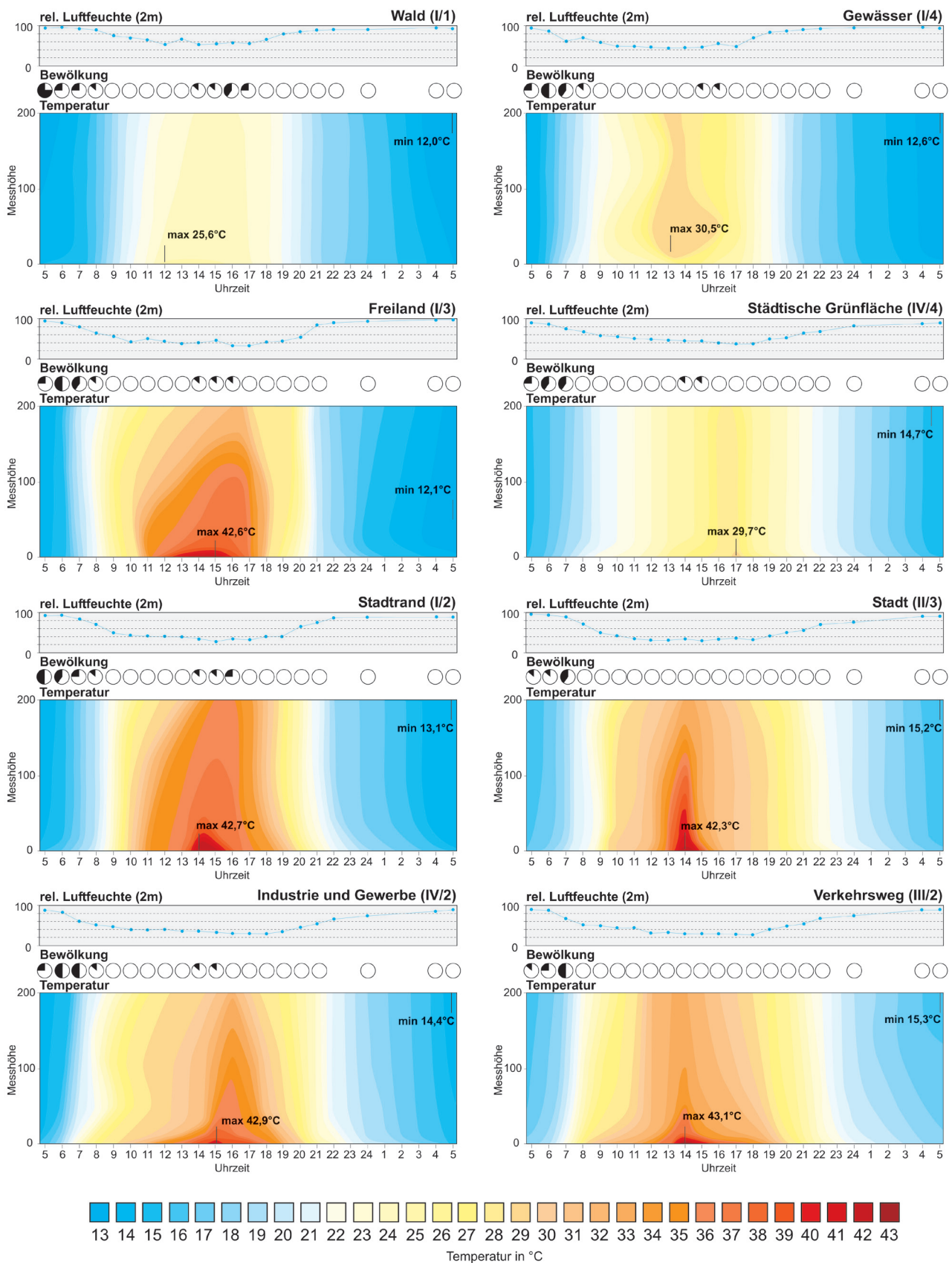


Abb. 9: Exemplarische Temperaturhöenschichtendiagramme der im Stadtgebiet von Passau im Rahmen von 24h-Messungen untersuchten Klimatope. Die Diagramme zeigen den Tagesgang der Temperatur in verschiedenen Höhen zwischen 0 und 200 cm Höhe über Grund. Zudem sind der Luftfeuchtegang (in 2 m Höhe) und die Bewölkung (in Achteln) zum Messzeitpunkt angegeben.

restrischen Standorten, die höchsten Temperaturen nicht in unmittelbarer Nähe der Oberfläche erreicht werde, sondern hier in etwas größerer Höhe, da der kühle Wasserkörper des Inns die darüber liegenden Luftschichten kühl hält. Die tageszeitlichen Temperaturdifferenzen erreichen in den nicht von Bäumen dominierten Klimatopen Werte von knapp 30 K, während im Wald und in der städtischen Grünfläche die Amplitude nur etwa halb so groß ausfällt.

Herausforderungen für die Stadtplanung

Die Untersuchungen zur stadtklimatologischen Situation in Passau haben gezeigt, dass selbst kleinräumige Strukturen wie Kaltluftschneisen, Flurwind-Gassen und kleine Parkanlagen sich positiv auf das Stadtklima auswirken, indem Sie die Überwärmung abmildern. Der Stadtplanung kommt daher die wichtige Aufgabe zu, für den Erhalt solcher Strukturen und Elemente zu sorgen, insbesondere auch unter dem Aspekt des sich immer deutlicher abzeichnenden Klimawandels. Die letzten Jahre mögen auch im Passauer Raum einen Vorgeschmack gegeben haben, was gemeint ist, wenn von einem vermehrten Auftreten von Extremereignissen (Starkregen, Stürme, Hitzeperioden) in Zukunft gesprochen wird. Der Stadt- und Regionalplanung kommt hierbei die wichtige Rolle zu die ökonomischen Belastungen für die städtischen Haushalte möglichst gering und zugleich die Lebensbedingungen in der Stadt auf einen annehmbaren Level zu halten (ZIMMERMANN 2017). Gerade die intensiveren, häufigeren und/oder länger anhaltenden Hitzeperioden können sich in den ohnehin überwärmten Stadtbereichen stark belastend auf den menschlichen Organismus auswirken, worauf JACOBET (1984) schon vor Längerem hingewiesen hat. Der Hitzesommer 2003 mit hohen Mortalitätszahlen kann als warnendes Beispiel dafür gelten, womit in Zukunft zu rechnen sein wird (KOPPE et al. 2003).

Neben der Erhaltung von das Stadtklima positiv beeinflussenden Elementen (Frischluf-Schneisen, städtische Grünflächen, etc.) bieten sich zahlreiche weitere Maßnahmen an, um ein für den Menschen tolerables Klima in seinem urbanen Lebensumfeld zu schaffen (HENNINGER 2011, KAMINSKE 2015). Anstatt komplett versiegelter Parkplätze bieten sich beispielsweise Fugenpflaster und Rasengittersteine an, die partiell den Wuchs von Vegetation sowie das Versickern von Niederschlägen erlauben, das dann der Evapotranspiration zur Verfügung steht und so fühlbare in latente Energie überführt. Dieser Effekt ist noch wesentlich stärker bei tiefwurzelnden Bäumen und Sträuchern, die über ihre Transpiration ebenfalls Verdunstungskühle hervorrufen, weshalb eine Ausweitung der Bepflanzung von Freiflächen oder des Straßenbegleitgrüns mit Gehölzen in Betracht zu ziehen ist. Nachdem für etliche Baumarten die Wuchsbedingungen in Städten wegen Wassermangel, Überhitzung, begrenztem Wurzelraum und Schadstoffbelastung schon heute wenig günstig sind (WOHLLEBEN 2015) und mit zunehmender Erwärmung bestimmte Baumarten im urbanen Umfeld an ihre Toleranzgrenze kommen werden (vgl. ROLOFF et al. 2008), sollte auch darüber nachgedacht werden, inwiefern nicht-einheimische, aufgrund ihrer Herkunft mit den wärmeren

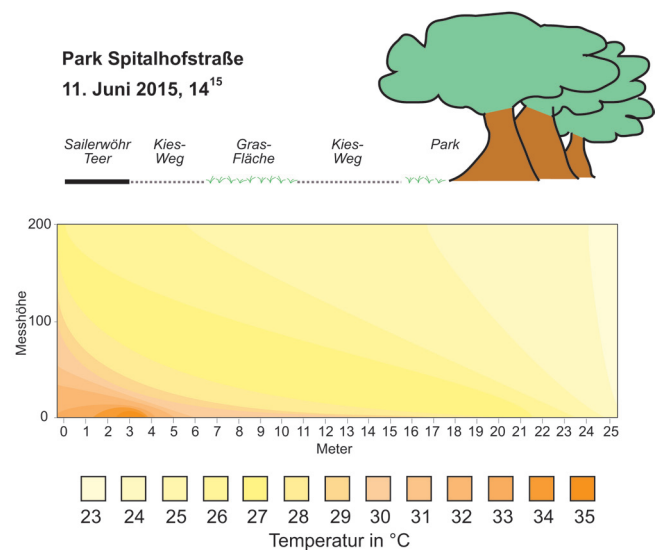


Abb. 10: Kleinräumiges Temperatur-Profil aus dem Park an der Spitalhofstraße auf den Teerbelag der Straße Sailerwöhr, das starke Temperaturgradienten in Abhängigkeit von der Oberflächenbedeckung belegt.

und trockeneren Bedingungen vielleicht besser zurecht kommende Baumarten stadtoökologisch wichtige Funktionen des Stadtgrüns in Zukunft aufrecht erhalten können. Die Suche nach geeigneten Baumarten sollte dabei rechtzeitig erfolgen und nicht erst beginnen, wenn heimische Bäume sich als nicht mehr geeignet herausstellen. Hierzu gibt es bereits vielversprechenden Ansätze (vgl. BÖLL et al. 2014). Einen weiteren interessanten Vorschlag macht KAMINSKE (2015), der zur Nachzucht aus Samen alter Stadtbäume aufruft, um so möglicherweise robustere und für die Stadtbegrünung besser geeignete Bäume hervorzubringen, ein Verfahren ähnlich wie es in der Landwirtschaft durch die Selektion genetisch besonders angepasster Sorten vorgemacht wird. Zudem existieren auch in dicht bebauten Arealen Möglichkeiten über Pflanzen positiv auf das Stadtklima Einfluss zu nehmen. Italienische Architekten haben in Mailand mit den „Boschi Verticali“ die Messlatte städtebaulicher Maßnahmen hoch gelegt, aber selbst durch die Begrünung von Flachdächern oder Fassaden durch geeignete, die Bausubstanz nicht beeinträchtigende, Pflanzen sind messbare Effekte seit langem nachgewiesen (HÖSCHELE & SCHMIDT 1974, KÖHLER et al. 1993). Nicht zuletzt bietet auch die Anlage von Wasserflächen, im Idealfall mit dem Grundwasser in Verbindung stehend, die Möglichkeit der Überwärmung entgegen zu wirken und zugleich den Grundwasserkörper (zumindest lokal) innerhalb des Stadtgebietes hoch zu halten.

Über alle genannten Maßnahmen lässt sich die Bowen-Ratio, die das Verhältnis von fühlbarer zu latenter Wärme beschreibt, positiv beeinflussen. Verhältnisse wie auf dem Land, wo es an der Verdunstung zu Verfügung stehendem Wasser meist nicht mangelt, und dadurch der Anteil latenter Energie etwa doppelt so hoch ist wie derjenige der fühlbaren Wärme, werden dadurch selbstverständlich nicht erreicht. Dennoch lässt sich damit bewirken, dass weniger Energie dem fühlbaren Wärmestrom zugeführt und so einer städtischen Überwärmung spürbar entgegen gewirkt wird.

Dank

Die hier präsentierten Daten würden ohne die Unterstützung zahlreicher Personen nicht vorliegen, denen an dieser Stelle gedankt werden sollt:

- den Teilnehmerinnen und Teilnehmern der Wissenschaftlichen Übungen: Matthias Achatz, Mona Bange- mann, Bettina Bildl, Thomas Bredl, Sebastian Dichtl, Simon Dietrich, Clarissa Ebbe, Carolin Ebler, Yasmin Eger, Maximilian Ertl, Gabriele Forstner, Kim Gaida, Florian Galos, Yvonne Gaspar, Thomas Greil, Elisabeth Grey, Herbert Groll, Veronika Groß, Günter Grünzinger, Melanie Haimerl, Michaela Haslberger, Stefanie Hasmann, Michael Heinrich, Britta Henn, Dominique Hermann, Regina Hingerl, Julia Holnburger, Angela Kagerbauer, Michael Kandlbinder, Annegret Kobietzer, Veronika Kroiß, Matthias Kroner, Verena Kühn, Christian Kulzer, Christine Kunz, Andrea Lagleder, Kerstin List, Thomas Loher, Stefan Loher, Simon Löwen, Verena Maier, Michael Mendyka, Philip Moschek, Josefine Moser, Johannes Müller, Roland Nemmer, Anja Niedermeier, Melanie Obermeier, Katharina Peters, Katharina Philippi, Markus Reiter, Ricarda Rettinger, Carola Rieger, Florian Ritter, Lisa Sagerer, Lea Schaffrath, Alexander Schier, Isabell Schindler, Theresa Schmidberger, Philip Schöttl, Teresa Setz, Linda Sperling, Katharina Stadler, Christina Strube, Stefan Süße, Annette Tezzele, Julia Thomandl, Susanne Weinberger, Thomas Wintersberger, Sabrina Wunsch, Andrea Zoidl;
- Prof. Dr. Dieter Anhuf (Lehrstuhl für Physische Geographie, Universität Passau) für die Anschaffung der Handmessgerät und der Klimalogger aus Lehrstuhlmitteln;
- Dr. Friederike Grüninger (Lehrstuhl für Physische Geographie, Universität Passau) für wertvolle Hinweise zur kartographischen Umsetzung der Daten (Messfahrten, Phänologie);
- Hermann Scheuer, Leiter der Stadtgärtnerei Passau, für die Bereitstellung des Baumkatasters der Stadt Passau;
- folgenden Einrichtungen, auf deren Grundstücken freundlicherweise die Klimalogger angebracht werden durften: Elektrotechnik Guggemoos, Gasthof Bayerischer Löwe, Hellge Klinik, Hotel Achat, Hotel Albrecht, ehemaliges Landratsamt Passau-Auerbach, Peschl-Keller, Ruderverein Passau, Schlosshotel Ort und Rathaus der Stadt Passau.

Quellen

- ADAM, K. (1988): Stadtökologie in Stichworten. – Verlag Ferdinand Hirt, Unterägeri, 180 S.
- BÖLL, S., SCHÖNFELD, P., KÖRBER, K. & J. V. HERRMANN (2014): Stadtbäume unter Stress – Projekt „Stadtgrün 2021“ untersucht Stadtbäume im Zeichen des Klimawandels. – LWF aktuell **98/2014**: 4-8.
- BONGARDT, B. (2006): Stadtklimatische Bedeutung kleiner Parkanlagen – dargestellt am Beispiel des Dortmunder Westparks. – Essener Ökologische Schriften **24**, Hohenwarsleben.
- EBNER, K.-H. (2002): Hydrologie. – In: SPERLING, A. (Hrsg.): Naturerlebnis Donautal – Ein Führer zur Kultur und Geschichte entlang der Donau von Hofkirchen bis zur Schlögener Schlinge, S. 13-15.
- EITEL, B. (2002): Flächensystem und Talbild im östlichen Bayerischen Wald (Großraum Passau-Freyung). – In: RATUSNY, A. (Hrsg.): Flusslandschaften an Inn und Donau. – Passauer Kontaktstudium Erdkunde **6**: 19–34.
- ENDLICHER, W. (2012): Einführung in die Stadtökologie – Grundzüge des urbanen Mensch-Umwelt-Systems. – UTB, Stuttgart, 272 S.
- ENDRES, G. (1996): Klimaatlas von Bayern. bayerischer Klimaforschungsverbund. – München.
- FEZER, F. (1995): Das Klima der Städte. – Klett Perthes, Gotha, 199 S.
- FICKERT, Th. (2013): Das Ilztal – Natur- und Kulturlandschaftsentwicklung an der „schwarzen Perle“ des Bayerischen Waldes. – In: GAMERITH, W., ANHUF, D. & E. STRUCK (Hrsg.): Passau und seine Nachbarregionen. Orte, Ereignisse, Verbindungen – ein geographischer Wegweiser, S. 64-77.
- FICKERT, Th. (2017): Klima im Wandel. – In: HAVERSATH, J.-B., KAPSNER, A. & W. BERCHTOLD (Hrsg.): Fürstenzell: Kultur, Mensch, Umwelt – Vom Klosterdorf zur Markt-gemeinde, S. 54-55.
- FICKERT, TH., DAVIDEAN, C., GALOS, F., HEINKELE, S., IWANSKI, A., NIESLER, L., NOWAK, G., PATSCH, A., PRIEB, N., SCHIER, A., SCHMERBECK, L., SOMPEK, E., STRUBE, C., WERKMANN, K., ZIMMERMANN, F. & J. ZOLLNER (2014): Stadtstruktur und Stadtnatur in Passau. – Der Bayerische Wald **27(1+2)** NF: 28-40.
- HENNINGER, S. (2011): Stadtökologie. – UTB, Paderborn, 252 S.
- HÖSCHELE, K. & H. SCHMIDT (1974): Klimatische Wirkung einer Dachbegrünung. – Garten und Landschaft **6**: 334-337.
- JACOBEIT, J. (1984): Wärmeinseln unter der Glocke. – In: KÖHLER, P. K. (Hrsg.): Naturraum Menschenlandschaft. – Myster Verlag, München, S. 79-88.
- KAMINSKE, V. (2015): Stadtklima: Ursachen und Folgen. – Naturwissenschaftliche Rundschau **68(12)**: 652-659.
- KAPPAS, M., MENZ, G., RICHTER, M. & U. TRETER (2003): Klima, Pflanzen- und Tierwelt – eine Einführung. – Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, Leibniz-Institut für Länderkunde, Leipzig, S. 12-27.
- KÖHLER, M., BARTH, G. & T. BRANDWEIN (1993): Fassadenbegrünung und Dachbegrünung. – Eugen Ulmer, Stuttgart, 329 S.
- KOPPE, C., JENDRITZKY, G. & G. PFAFF (2003): Die Auswirkungen der Hitzewelle 2003 auf die Gesundheit. – Klimastatusbericht des DWD, S. 152-162.

- KÜTTLER, W. (2006): Stadtklima. – In: HUPFER, P. & W. KÜTTLER (Hrsg.): Witterung und Klima – Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. – 12. Aufl., Teubner Verlag Wiesbaden, S. 371-432.
- MENZEL, A. (2007): Phänologische Modelle. – Promet **33**(1-2): 20-27.
- NÜBLER, W. (1979): Konfiguration und Genese der Wärmeinsel der Stadt Freiburg. – Freiburger Geographische Hefte **16**: 113 S.
- PARLOW, E. (2003): The urban heat budget derived from satellite data. – Geographica Helvetica **2**: 99-111.
- PARLOW, E. (2011): Besonderheiten des Stadtklimas. – In: GEBHARDT, H., GLASER, R., RADTKE, U. & P. REUBER: Geographie. – Spektrum, Heidelberg, S. 287-294.
- REUTER, U. & R. KAPP (2012): Städtebauliche Klimafibel – Hinweise für die Bauleitplanung. – Hrsg. Baden-Württemberg, Ministerium für Verkehr und Infrastruktur. – Online verfügbar unter <http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/pdf/Klimafibel-2012.pdf>.
- RICHTER, M. (1997): Allgemeine Pflanzengeographie. – Teubner, Stuttgart, 256 S.
- RÖTZER, T. (2007): Auswirkungen des Stadtklimas auf die Vegetation. – Promet **33**(1-2): 40-45.
- SAMIMI, C. & B. E. STROBEL (2004): Das Stadtklima von Erlangen unter Berücksichtigung kleinräumiger stadtklimatischer Strukturen. – Mitteilungen der Fränkischen Geographischen Gesellschaft **50/51**: 147-177.
- SCHNELLE, F. (1955): Pflanzenphänologie. – Geest & Portig, Leipzig, 299 S.
- SCHULTZ, J. (2000): Handbuch der Ökozonen. – Ulmer Stuttgart, 577 S.
- WOHLLEBEN, P. (2015): Das geheime Leben der Bäume: Was sie fühlen, wie sie kommunizieren – die Entdeckung einer verborgenen Welt. – 224 S.
- ZIMMERMANN, T. (2017): Regionalplanung an den Klimawandel anpassen. – Informationen zur Raumentwicklung Heft **5/2017** „Trends in der Stadt- und Regionalentwicklung“: 66-75.

Anschrift des Verfassers

Thomas Fickert
 Physische Geographie, Universität Passau
 Innstr. 40
 94032 Passau
 thomas.fickert@uni-passau.de