

## **Reaktionen einer angewandten und planungsorientierten Stadtklimatologie auf die rezenten Veränderungen urbaner Strukturen**

*Sascha Henninger, Martin Fabisch, Maral Moghaddam*

(Prof. Dr. Sascha Henninger, TU Kaiserslautern, FB Raum- und Umweltplanung, Lehr- und Forschungsgebiet Physische Geographie, sascha.henninger@ru.uni-kl.de)

(Dipl.-Ing. Martin Fabisch, TU Kaiserslautern, FB Raum- und Umweltplanung, Lehr- und Forschungsgebiet Physische Geographie, martin.fabisch@ru.uni-kl.de)

(Maral Moghaddam, TU Kaiserslautern, FB Raum- und Umweltplanung, Lehr- und Forschungsgebiet Physische Geographie)

### **1 ABSTRACT**

Den Verantwortlichen der Stadt- und Umweltplanung ist es mehr denn je gelegen, dass sie fachbezogene Antworten zu klimatisch-lufthygienischen Fragestellungen im urbanen Raum erhalten. Die angewandte, planungsorientierte Stadtklimatologie stellt das Bindeglied zwischen Klimatologie und Stadtplanung dar. In diesem Zusammenhang gilt es aktuell Fragen nachzugehen, wie z. B. die durch „Schrumpfende Städte“ offerierten, frei werdenden Flächen stadtklimatologisch sinnvoll in neue Nutzungsstrukturen integriert werden können, damit diese als potenzielle Areale (z. B. Kaltluftproduktionsflächen) einer klimaangepassten Planung zur Verfügung stehen können. Ebenso werden weitestgehend vergessene urbane Reserveflächen (z. B. Dachbegrünung) in Bezug auf die Schaffung eines verbesserten Mikroklimas v. a. in Städten arider und semiarider Räume immer stärker in den Fokus gerückt. Aus lufthygienischer Sicht ist es an der Zeit Datenbanken zu entwickeln, die sich mit dem Kronendach respektive der Auswahl des Straßenbegleitgrüns befassen, da ein dichter Bestand einen verminderten Luftaustausch bedingt, was zu Schadstoffanreicherungen führen kann, die vergleichbar sind mit einer urbanen Straßenschlucht.

Das Wissen und die Kenntnis bezüglich des lokalen Klimas und der daraus resultierenden lufthygienischen Situation sowie deren klimatische Funktionszusammenhänge stellen wichtige Aspekte der Umweltvorsorge und Stadtentwicklung dar. Die beiden Schutzgüter Klima und Luft sind wichtige Bestandteile räumlicher Planung im Abwägungsprozess der Bauleitplanung, Umweltverträglichkeitsprüfungen und entsprechenden Standortuntersuchungen. Ziel einer angewandten und planungsorientierten Stadtklimatologie ist aus klimatischer Sicht die Identifizierung von urbanen Problemfeldern und über die Berücksichtigung flächen- und objektbezogener Handlungsfelder, die Sicherung, Entwicklung und Wiederherstellung immissionsklimatisch relevanter Flächennutzungsstrukturen.

Keywords: Klimaanpassung, Grüne Räume, Smart City, Stadtklima, Flächennutzung

### **2 EINLEITUNG**

Die angewandte Stadtklimaforschung wird in Anbetracht des rezenten globalen Klimawandels in der Zukunft eine immer größere Rolle spielen. Die Stadt als Wohnort für viele Menschen kann mitunter als klimatologischer „Hot-Spot“ bezeichnet werden. Aufgrund der Beeinflussung des natürlichen Ökosystems durch den urbanen Siedlungsraum und die daraus hervorgehenden Problemfelder, wird ein Handeln aus Sicht der Stadtplanung unausweichlich. Dabei gilt es sowohl die klimatischen als auch die lufthygienischen urbanen Belastungsräume zu lokalisieren und zu typisieren, sowie basierend auf den Erkenntnissen mittels geeigneter Klimafunktions- und Planungshinweiskarten entsprechende Gegenmaßnahmen vorzuschlagen. Ein Schwerpunkt bildet sich Frage wie die u. a. durch „schrumpfende Städte“ offerierten, frei werdenden Flächen stadtklimatologisch sinnvoll in neue Nutzungsstrukturen zu integrieren sind, damit sie als potenzielle Areale (z. B. Kalt- und Frischluftproduktionsflächen) in die klimaorientierte Planung aufgenommen werden können. Des Weiteren liegt ein Hauptaugenmerk auf weitestgehend vergessenen urbanen Reserveflächen wie z. B. Dachbegrünungen in Bezug auf die Schaffung eines verbesserten Mikroklimas, hier v. a. in urbanen Räumen der ariden und semiariden Klimazonen. Aus lufthygienischer Sicht muss eine Datenbank entwickelt, die sich mit dem Kronendach respektive der Auswahl des Straßenbegleitgrüns befasst, da ein dichter Bestand einen verminderten Luftaustausch bedingt, was zu Schadstoffanreicherungen führen kann, die vergleichbar sind mit einer Straßenschlucht. Und es wird der Tatsache Rechnung getragen, dass diverse Baumarten unterschiedliche Mengen an biogenen flüchtigen organischen Kohlenwasserstoffen emittieren. Diese wiederum können als Vorläufersubstanzen zur Bildung von bodennahem Ozon beitragen und sind nicht als Bestand innerhalb eines Erholungs- bzw. Rückzugsraumes (z. B. innerstädtische Grün- und Parkfläche) geeignet.

Das Wissen und die Kenntnis bezüglich des lokalen Klimas und der daraus resultierenden lufthygienischen Situation sowie deren klimatische Funktionszusammenhänge stellen wichtige Aspekte der Umweltvorsorge und Stadtentwicklung dar. Die beiden Schutzgüter Klima und Luft sind wichtige Bestandteile räumlicher Planung im Abwägungsprozess der Bauleitplanung, Umweltverträglichkeitsprüfungen und entsprechenden Standortuntersuchungen. Ziel einer angewandten und planungsorientierten Stadtklimatologie ist aus klimatischer Sicht die Identifizierung von urbanen Problemfeldern und über die Berücksichtigung flächen- und objektbezogener Handlungsfelder, die Sicherung, Entwicklung und Wiederherstellung immissionsklimatisch relevanter Flächennutzungsstrukturen [Henninger, 2013a].

### **3 FORSCHUNG- UND ARBEITSFELD ANGEWANDTE STADTKLIMATOLOGIE**

Das lokalklimatische Phänomen des Stadtklimas wird hervorgerufen durch anthropogene Eingriffe in das natürliche Ökosystem. Der dicht bebaute und versiegelte urbane Bereich verursacht im Vergleich zu seiner ruralen Umgebung sowohl lokalklimatische Veränderungen als auch Modifikationen der atmosphärischen Spurenstoffe. Grundsätzlich können folgende Entstehungsursachen für das Stadtklima festgestellt werden:

- Großräumige Versiegelung der ehemals natürlichen Oberflächen
- Reduzierung der Vegetations- und Wasserflächen
- Dreidimensionale Überhöhung der Erdoberfläche durch die Bebauung
- Eintrag anthropogener Emission durch Wärme und Spurenstoffe

Diese Einflussfaktoren sorgen schließlich für ein eingeschränktes Evaporationsvermögen, eine deutliche Erhöhung der Oberflächenrauigkeit und im Zusammenhang mit der anthropogen modifizierten Stadtatmosphäre zu Veränderungen des Strahlungs- und Energiehaushaltes [Henninger, 2011a; Kuttler, 2013].

Die angewandte Stadtklimatologie wird gegenwärtig stark von der Bearbeitung klimatischer und lufthygienischer Fragestellungen geprägt. Ein Sachverhalt, der in den letzten Jahren zunehmend in den Fokus der Stadtklimatologie gelangt, ist nicht nur die Betrachtung und Bewertung von Klima und Lufthygiene, sondern auch die Analyse der daraus resultierenden negativen Auswirkungen sowohl auf das biotische als auch auf das abiotische urbane Ökosystem [Henninger, 2011b]. Ebenso stellt die angewandte, planungsorientierte Stadtklimatologie das Bindeglied zwischen Klimatologie und Stadtplanung dar. Die Stadtklimatologie vermag so eine große Fülle an Lösungsmöglichkeiten anzubieten, die sowohl in klimatologischen als auch lufthygienischen Problemfeldern auftauchen. Stadtklimaanalysen bzw. die daraus zu erstellenden synthetischen Klimafunktions- und Planungshinweiskarten erlauben es der Planung auf kommunaler Ebene wichtige klimatische Aspekte innerhalb des kommunalen Handlungsrahmens aufzugreifen [Overbeck et al., 2008; VDI, 2015; Henninger, 2013a].

### **4 HANDLUNGSFELDER DER ANGEWANDTEN, PLANUNGSORIENTIERTEN STADTKLIMATOLOGIE**

Das primäre Ziel einer angewandten und planungsorientierten Stadtklimatologie muss sein, dass sowohl die klimatischen als auch die lufthygienischen Bedingungen eine nachweisbare Verbesserung erfahren. Daher öffnet sich für die Stadtklimatologie ein breiter Fächer an möglichen Handlungsfeldern, die sich aus den stadtklimatologischen Charakteristika und Problemfeldern ableiten [Henninger, 2013a]. Einige dieser Handlungsfelder werden von der Lehr- und Forschungseinheit Physische Geographie aufgegriffen und auf eine angewandte, planungsorientierte stadtklimatische Forschung übertragen.

#### **4.1 Tolerierbares Stadtklima**

Ein Hemmnis für die planungsorientierte Stadtklimatologie ist der Tatsache geschuldet, dass Städte einen über einen langen Zeitraum gewachsenen Körper darstellen, der nicht ohne weiteres nach klimatischen und lufthygienischen Interessen umgestaltet werden kann. Wie aus klimatischer Sicht dennoch positiv auf den Städtebau eingewirkt werden kann, wird ersichtlich, wenn man die Bebauungsstruktur in anderen Klimazonen betrachtet und als Vorbild heranzieht. Zum Beispiel sorgen enge Gassen für eine Verschattung der Hauswände. Eine solche Passivkühlung kann den Energieverbrauch konventioneller Klimaanlage reduzieren. Neben der Hauswandverschattung bietet sich der Einsatz von Verschattungselementen bzw. eine klimaorientierte Ausrichtung der Gebäude an. Eine optimierte Wärmedämmung trägt ebenfalls zu einem



klimaangepassten Bauen bei und vermindert den sommerlichen Hitzestress. Mithilfe einer optimalen Wärmedämmung entsteht ein Synergieeffekt. Der Schutz vor übermäßiger Aufheizung der Räume im Sommer sorgt gleichzeitig für einen Schutz vor Energieverlust im Winter [Henninger, 2010]. Ein für den Stadtbewohner optimales Umfeld wurde von Mayer (1989) mit dem Begriff des „idealen Stadtklimas“ umschrieben. Basierend auf gezielten planerischen Eingriffen wird eine urbane Atmosphäre geschaffen, die möglichst keine anthropogenen Luftschadstoffe enthält und den Bewohnern eine große Vielfalt an urbanen Mikroklimaten zur Verfügung stellt. Dieses ideale Stadtklima lässt sich streng genommen aber nur dort annähernd realisieren, wo Stadtneugründungen geplant sind und bereits zu Beginn der Planungsphase die Belange des Klimas und der Luftqualität mit in die Entscheidungsphase aufgenommen wurden. Für bereits bestehende urbane Räume ist dies nicht durchzuführen. Hier muss es die Aufgabe der Stadtplanung sein, dem idealen Stadtklima durch gezielte Maßnahmen sehr nahe zu kommen. Auf diese Weise kann durch eine Minimierung der Belastung und der Umfeldverbesserung ein „tolerierbares Stadtklima“ geschaffen werden [Mayer, 1989; Hartz, 2011]. Als Folge der Anpassungsstrategien an den Klimawandel muss eine Verminderung der zu erwartenden steigenden thermischen Belastung im urbanen Raum angestrebt werden. Dabei geht es zum einen um eine Reduzierung des direkten Hitzeeintrages, zum anderen um die Sicherstellung einer guten Durchlüftung und verbesserter Austauschbedingungen innerhalb der bodennahen Stadtatmosphäre. Bereits der Einsatz geeigneter Baumaterialien kann zu einer Verringerung des Wärmeinseleffektes beitragen. Helle Materialien mit einem entsprechend hohen Albedowert reduzieren das Aufheizen der Hauswand, da auf der Oberfläche mehr kurzweilige Sonnenstrahlung reflektiert wird. Ein großflächiger Einsatz unter Berücksichtigung planerischer Aspekte kann durchaus den sommerlichen Überwärmungseffekt der Stadt minimieren [Henninger 2010; Henninger, 2011a].

#### 4.2 Urbane Kühleinseln

Dem demographischen Wandel und der in einigen deutschen Großstädten noch immer zu verzeichnenden Stadtflucht ist es gegenwärtig zu verdanken, dass verstärkt stadtklimatische Kenntnisse mit in die zukünftige Stadtplanung einfließen können. Das Phänomen der „Shrinking Cities“ offeriert eine große Zahl frei werdender Flächen, deren Raum stadtklimatologisch sinnvoll in die neu entstehende Nutzungsstruktur zu integrieren ist [Oswalt & Rienets, 2006]. In diesem Zusammenhang sind unterschiedliche Handlungsfelder für die angewandte, planungsorientierte Stadtklimatologie hervorzuheben. Im urbanen Bereich bietet sich vor allem die Schaffung von Frei-, Grün- und Wasserflächen an. Vor allem Frei- und Grünflächen im Bestand sind der Ansatzpunkt unterschiedlicher Forschungsthemen im Bereich der angewandten, planungsorientierten Stadtklimatologie.

Von allen urbanen Grünflächen geht ein mehr oder minder starker Kühlungseffekt aus. Während der Tagstunden kommt es aufgrund der Evapotranspiration zu einem Energieverbrauch und dementsprechend zu einer Abkühlung der Lufttemperaturen. Verstärkt wird dieser Effekt durch den Schattenwurf der Bäume. In der Nacht bildet sich über den Grünflächen Kaltluft. Durch die so genannte „park breeze“, eine Luftströmung aus dem Park heraus gerichtet, wird die Luft ausgetauscht und wirkt sich ebenfalls kühlend aus. Innerstädtische Grünflächen können in Abhängigkeit ihrer Größe und Gestaltung einen erheblichen Einfluss auf ihre Umgebung ausüben. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass nicht jede Grünfläche die gleiche Wirkung auf sein Umfeld besitzt [Errel et al., 2011]. Um einen deutlichen klimawirksamen Effekt zu haben, müssen solche Flächen jedoch mindestens eine Fläche von 50 ha aufweisen [Horbert, 2000]. Kleinere Park- und Grünflächen, dies konnte von Bongardt (2006) nachgewiesen werden, besitzen allerdings ebenfalls eine kühlende Wirkung und sorgen so für eine Verringerung der thermischen Belastung. Jedoch bleibt dies auf direkt angrenzende Bereich beschränkt. Die Frage, die man sich im Vorfeld einer sinnvollen Nutzung dieser „urbanen Kühleinsel“ („urban cool island“) stellen muss ist, welcher Effekt soll für die Nutzer bzw. die angrenzende Bebauung erreicht werden. In Abhängigkeit der Nutzungsfunktion einer solchen Grünfläche können zwei tageszeitenabhängige Arten der „urbanen Kühleinsel“ unterschieden werden, die sich letztendlich für eine unterschiedliche Intention anbieten [Henninger, 2015]. Wie aus Tabelle 1 zu ersehen ist, verändert sich in Abhängigkeit des Wasserdargebotes und des Vegetationsbestandes die Wirkung der „Park Cool Island“ zu unterschiedlichen Tageszeiten, wie es u. a. Tel Aviv am Beispiel einer küstennahen urbanen Parkfläche nachgewiesen werden konnte [Henninger & Saaroni, 2014].

	<b>Tagstunden</b> <i>„park cool island“</i>	<b>Nachtstunden</b> <i>„park cool island“</i>
<b>Art der innerstädtischen Grünfläche</b>	- bewässerte Parkflächen - dichter Baumbestand	- unregelmäßig bis nicht gewässerte Parkflächen - geringer Baumbestand
<b>Entstehung</b>	- geringere Oberflächentemperatur durch Verschattung der Bäume - bei guter Bewässerung höhere Verdunstungsleistung über den Grasflächen	- hohe kurzweilige Einstrahlung am Tage - hohe langweilige Ausstrahlung nach Sonnenuntergang
<b>Zeit der maximalen Intensität</b>	- Nachmittag bzw. früher Abend	- mehrere Stunden nach Sonnenuntergang
<b>Besonderheiten</b>		- während der Tagstunden vielfach wärmer im Vergleich zu benachbarten Flächen

Tabelle 1: Unterschiedliche Charakteristika einer „park cool island“ in Abhängigkeit der Tageszeit und Bewirtschaftung [verändert nach Errel et al., 2011; Cohen et al., 2012; Henninger, 2015].

### 4.3 Luftleit- und Ventilationsbahnen

Möglichst naturbelassene Freiflächen bzw. deren Aufwertung ermöglichen einen besseren Luftaustausch mit dem Umland. Als Luftleit- bzw. Ventilationsbahnen sind diese in der Lage kühlere Luftmassen in bebauten Gebiet zu leiten. In Verbindung mit dem bereits angesprochenen Phänomen der schrumpfenden Städte sind es weiterhin nicht mehr für die direkte Verwendung vorgesehene Flächen, die einer Nutzungsänderung unterliegen und sich für die Anlage von Grün- und Freiflächen eignen. Industrie- und Gewerbebrachen, stillgelegte Bahntrassen oder auch Bebauungslücken können in diesem Fall als potenzielle Areale in die klimaorientierte Planung aufgenommen werden.

An dieser Stelle gilt es eine genaue Prüfung der Situation aus klimaorientierter Sicht vorzunehmen, um die Relevanz eines funktionierenden Stadtbelüftungssystems zu gewährleisten oder es möglicherweise durch diese neue Sachlage entstehen zu lassen. Gegebenenfalls sollten solche Areale nicht mehr für eine neue Bebauung frei gegeben werden. Potentielle Ventilationsbahnen sind aus klimatologischer Sicht als sehr sensible Flächen zu betrachten. Bereits kleinste Hindernisse können den Kaltlufttransport zum Erliegen bringen. Zur Sicherstellung einer adäquaten Stadtbelüftung über intraurbane Grünflächen und Frischluftschneisen muss über Bebauungsgrenzen dafür Sorge getragen werden, dass diese Bereiche auch tatsächlich frei gehalten werden [Henninger, 2011a].

### 4.4 Urbane Dach- und Fassadenbegrünung

Eine weitestgehend vergessene Reservefläche in Bezug auf die Schaffung eines verbesserten Lokal- bzw. Mikroklimas ist die Möglichkeit der Dach- und Fassadenbegrünung. Im Besonderen bietet die intensive bzw. extensive Dachbegrünung in der Stadt eine Möglichkeit nicht nur punktuell den stadtklimatischen Effekt zu verringern. Ein positiver thermischer Effekt der Dachbegrünung ist die Minderung von Temperaturextremen. Während sich Kiesdächer und schwarze Bitumenpappe auf bis zu 80°C aufheizen, weisen begrünte Dächer Oberflächentemperaturen von lediglich 20°C bis 25°C auf [Henninger, 2010]. Dieser positive thermische Effekt zeigt sich nicht nur im Sommer, sondern ist auch im Winter nachweisbar. Nicht zuletzt kommt es in den Wintermonaten aufgrund der Vegetation und des Dachsubstrates zu einer Verminderung des Wärmedurchganges und somit zu einer erhöhten Wärmedämmung. Ein weiterer positiver Effekt der Dachbegrünung wird abermals durch die Verdunstung von Wasser hervorgerufen. Auch die Überflutungsgefahr, hervorgerufen durch Starkniederschlagsereignisse, wird deutlich reduziert. Vergleichbar mit offenen Vegetationsflächen, die in der Lage sind Oberflächenwasser zu speichern, wird, je nach Art der Dachbegrünung, das Niederschlagswasser dort unterschiedlich lange gehalten und fließt so, abzüglich von Verdunstung und Transpiration, zeitverzögert ab. Der sog. Abflussbeiwert wird durch die Dachbegrünung, erheblich verbessert. Werden von einem  $\geq 15^\circ$  geneigten Dach 80 % bis 100 % des Niederschlages direkt in die Kanalisation geleitet, beträgt der direkte Abfluss eines begrünten Daches lediglich 30 %. Das restliche Wasser wird über die Verdunstung wieder an die Atmosphäre abgegeben. Somit trägt das

zwischen gespeichertes Niederschlagswasser zur Verbesserung des Feuchtegehaltes der Luft bei. Die Zeitverzögerung entlastet die Stadtentwässerung erheblich und die Überflutungsgefahr wird gemindert [Chiffard, 2011]. Die Erkenntnisse aus dem gemäßigten Klimabereich können jedoch auch in anderen Klimazonen transferiert werden, um vor allem in ariden und semiariden Räumen lokalklimatisch zu einer Entlastung der thermischen Situation beizutragen.

Diese Kenntnisse bilden u. a. die Grundlage für zwei Forschungsprojekte in ariden bzw. semiariden Gebieten im Iran und Bahrain [Henninger et al., 2015]. Die Projekte haben das Ziel die Grundidee der urbanen Nachhaltigkeitsstrategie beispielhaft in die Städte Bahrain (Bahrain) und Karadsch (Iran) zu transferieren. Vor allem die kommunalen Entscheidungsträger sollen für den Nachhaltigkeitsgedanken sensibilisiert werden. Im Sinne des Nachhaltigkeitsdreiecks (Ökonomie, Ökologie, Gesellschaft) werden unterschiedliche Ziele aufgezeigt, die offenlegen, dass eine gezielte urbane Dachbegrünung in den drei o. g. Bereichen Vorteile für das Wohnumfeld und vor allem die Wohnqualität in urbanen Räumen bereitstellen können.

Ökonomische Vorteile: Natürlich muss in der initialen Projektphase investiert werden, um die entsprechenden Vorbereitungen und Installationen durchzuführen. Allerdings soll dargelegt werden, dass mit der Dauer der Laufzeit wiederum Kosten eingespart werden können. Der Schwerpunkt liegt hierbei darauf, dass

- eine Dachbegrünung zu einer Reduktion der Oberflächentemperaturen führt, was wiederum einen positiven Effekt auf die Effizienz von Photovoltaikanlagen haben kann.
- eine Dachbegrünung zu einer Reduktion der Oberflächentemperatur führt, was wiederum eine geringere Erwärmung der darunterliegenden Räumlichkeiten mit sich bringt und so in einem nächsten Schritt einen geringen Energieaufwand zur Kühlung ebendieser bedingt.
- eine Dachbegrünung in Abhängigkeit von intensiver oder extensiver Nutzung zu einer Reduktion der lokalen urbanen Lärmbelastung führen kann, aufgrund der erhöhten Schallabsorption [Henninger, 2010].

Ökologische Vorteile: Neben einer Verbesserung der lokalklimatischen Verhältnisse aufgrund der Reduktion der Umgebungstemperatur zeigt sich durch die Begrünung der Dachflächen ebenfalls eine positive Aufwertung der urbanen Luftqualität. Vor allem für den Bereich der Feinstaubproblematik, aber auch für weitere urbane Luftinhaltsstoffe leistet eine durch Dachbegrünung zusätzlich geschaffene Depositions- und Filterflächen positive Effekte. Weiterführend kann im Rahmen eines gezielten Siedlungswassermanagements durch eine aufgrund der Begrünung hervorgerufene Erhöhung der Abflusszeiten, v. a. bei Starkniederschlagsereignissen, eine zusätzliche Möglichkeit der temporären Zwischenspeicherung des abfließenden Oberflächenwassers bewirken. Dies wiederum entlastet die Kanalisation deutlich [Henninger, 2013b]. Ebenfalls nicht zu vergessen ist, aus ökologischer Sicht, der Nutzen, v. a. extensiv genutzter Grünflächen auf Dächern, als Habitat sowohl für Flora als auch Fauna.

Soziale/ Gesellschaftliche Vorteile: Neben den ökonomischen und ökologischen Aspekten einer urbanen Nachhaltigkeit darf jedoch nicht die gesellschaftliche Wirkung außer Acht gelassen werden. Hier ist es insbesondere der ästhetische Eindruck, der durch eine gezielt betriebene Landschaftsgärtnerei bei der urbanen Bevölkerung durch eine Vielzahl von „grünen Oasen“ eine Steigerung und Akzeptanz der Wohnqualität hervorruft.

Mit diesem Wissen werden sowohl in Bahrain als auch in Karadsch interdisziplinäre Arbeiten angestoßen, die wie u. a. das Projekt „Bahrain Regains Greenery – Green Roofs in Private & Public Buildings“ das Ziel verfolgen den „öffentlichen Dienst“ in Form von Leuchtturmprojekten in die Pflicht zu nehmen. Dabei wird gezielt auf das immense Dachflächenpotential öffentlicher Gebäude zurückgegriffen und an diesen Standorten offensiv die positive Wirkung von Dachbegrünungsmaßnahmen analysiert, angepasst und letztendlich beworben [Henninger et al., 2015].

Weiterführend wird neben der Möglichkeit der intensiven und extensiven Begrünung von Dachflächen sowie der Nutzung der Solarenergie mittels Photovoltaik auch dem Thema des „urban gardening/ farming“ auf sonnenexponierten Dachversuchsflächen Rechnung getragen. Eben solche offenbaren zusätzlich lokal landwirtschaftlich nutzbare Reserveflächen mit einem entsprechenden Erntebeitrag, v. a. in entsprechend klimatisch begünstigten Räumen [Henninger, 2012a].

#### 4.5 Blattwendende (Stadt)Bäume

Auch die Begrünung innerhalb des vorhandenen Bestandes bietet aufgrund sowohl der Verschattung als auch der Verdunstungsleistung von Pflanzen ein kühlendes Potential. Daher beschäftigt sich die Lehr- und Forschungseinheit Physische Geographie u. a. mit der Frage, wie urbanes Grün die negativen lokalklimatischen Modifikationen der urbanen Überwärmung abmildern kann. Dazu werden lokalklimatische Untersuchungen an Silberlinden (*Tilia Tomentosa*) durchgeführt. Ziel des Forschungsprojektes ist es der Frage nachzugehen, ob diese Baumart in der Lage ist ihre nähere Umgebung abzukühlen und somit in den Sommermonaten positiv zu beeinflussen. Hierbei liegt der Fokus jedoch nicht auf bereits bekannten Effekten wie Evapotranspiration und Verschattung. Vielmehr wird die Wirkung einer veränderten Albedo am Blattwerk der Bäume analysiert. Die *Tilia tomentosa* ist für diese Untersuchung besonders geeignet, da initiale Beobachtungen gezeigt haben, dass vor allem die Blätter des Kronenbereiches junger Silberlinden in der Lage sind sich selbstständig gegen eine intensive solare Einstrahlung zu schützen. Kommt es im Verlauf des Tages zu erhöhten Temperaturen im Kronenraum, wendet sich die dunkelgrüne, kurzwellige Strahlung absorbierende Blattoberseite ab und die silberne, reflektierende Blattunterseite wird zur Sonne hin ausgerichtet. Aufgrund der hierdurch hervorgerufenen Veränderung der Albedo kommt es zu einer Reduktion der Oberflächentemperatur am Kronendach und einer Verringerung der Lufttemperatur innerhalb des Kronen- bzw. Stammraums. Zur Verifizierung dieser Aussage werden Analysen an Silberlinden unterschiedlichen Alters durchgeführt (drei Altersklassen: 0 – 10 Jahre, 11 – 25 Jahre, älter als 26 Jahre). Die Ergebnisse werden im Anschluss auf das lokale Klima übertragen und der Effekt der Abkühlung auf die räumliche Planung angewendet [Wundsam & Henninger, 2015]. Im Rahmen des Projektes werden in-situ-Messungen mithilfe von Messstationen innerhalb und außerhalb des Baumbestandes vorgenommen. Hinzu kommen Foto- und Filmaufnahmen von Hitzestresspunkte auf den Kronenblättern, die mithilfe von Wärmebildkameras punktgenau lokalisiert werden, um entsprechende Veränderungen innerhalb des Kronendachs bei der späteren Analyse visualisieren zu können. Mithilfe dieser Methodik wird ermittelt, ab welchem Temperaturbereich die Blattoberflächen beginnen auf den Hitzestress zu reagieren und mit einer Blattdrehung antworten. Des Weiteren wird durch die Positionierung von Messgeräten sowohl im Stammbereich der Silberlinden als auch im nahen Umfeld aufgezeigt, welche Wirkung die Drehung der Blätter auf die Baum- und Umgebungstemperatur hat. Weiterführend wird es Untersuchungen mit anderen Stadtbäumen geben, die ebenso dem urbanen Hitzestress und Luftverunreinigungen ausgesetzt sind. Mittels dieser Analyse soll eine Vergleichbarkeit zwischen der Silberlinde und weiteren urbanen Baumarten hergestellt werden, um die erzielten Ergebnisse mit der *Tilia tomentosa* zu verdeutlichen. Sollten die blattwendenden Baumarten verifizierbare lokalklimatische Auswirkungen auf ihre nähere Umgebung haben, besteht darüber hinaus die Aufgabe darin, diese Erkenntnisse für zukünftige Stadtplanung aufzuarbeiten und in Stadtentwicklungskonzepten bzw. landschaftsplanerische Maßnahmen aufzugreifen, um somit dem Trend der zunehmenden urbanen Überwärmung gezielt entgegenzuwirken.

#### 4.6 „Grüne“ Straßenschluchten

Grundsätzlich gilt für straßenbegleitendes Grün, dass es zur Verbesserung des lokalen Klimas beiträgt und eine luftfilternde Funktion einnimmt [Litschke & Kuttler, 2008]. Aus lufthygienischer Sicht sollte jedoch bei der Auswahl des Straßenbegleitgrüns auf das Kronendach geachtet werden. Ist dieses dicht und geschlossen, erhält man aufgrund des verminderten Luftaustausches ähnliche Schadstoffanreicherungen wie innerhalb einer Straßenschlucht [Errel et al., 2011; Henninger, 2015]. Dies gilt jedoch nur entlang solcher Verkehrswege, die durch ein hohes Verkehrsaufkommen gekennzeichnet sind. Das Projekt „Gefahren am Schulort“ untersucht die Luftqualität im Bereich von Grundschulen. Dabei liegt der Fokus vor allem auf den Standorten, die augenscheinlich aufgrund ihrer Lage nicht als lufthygienisch belastete Räume klassifiziert werden (z. B. Stadtrandbereiche). Dennoch hat sich aufgrund der vor allem morgendlichen Verkehrssituation gezeigt, dass mitunter die suburbanen Grundschulstandorte und deren nähere Umgebung als potenziell lufthygienisch belastet betrachtet werden müssen [Henninger, 2013c].

In vielen Fällen offenbart sich die Kombination aus hohem Verkehrsaufkommen und einem schlechten Austausch innerhalb der bodennahen Luftschicht als dominant-negativer Einflussfaktor. Dies ist wiederum für urbane Schulstandorte im Innenstadtbereich aufgrund der meist engen Straßenschluchten nicht weiter verwunderlich. Jedoch kann dieser Effekt auch an Standorten am Stadtrand oder außerhalb gelegener Stadtteile „im Grünen“ mittels unbefriedigender lufthygienischer Werte nachgewiesen werden. Neben den

meteorologischen Parametern werden auch diverse Luftinhaltsstoffe zeitgleich und parallel erfasst, sowohl an urbanen/ suburbanen als auch an ruralen Grundschulstandorten. Dabei haben erste Ergebnisse offen gelegt, dass einige Standorte in den Morgenstunden eine deutliche Erhöhung der Luftschadstoffsituation aufweisen und diese sich auch nur äußerst langsam im Bereich der bodennahen Luftschicht verdünnt/verbessert. Besonders auffällig und über mehrere Stunden anhaltend, waren die erhöhten Schadstoffbelastungen an suburbanen Grundschulstandorten, die im Zufahrtbereich durch Straßenbegleitgrün mit dominant ausgeprägter Kronenfläche der Bäume einen aus Sicht der bodennahen Luftaustauschverhältnisse „grünen“ Straßenschlucht-Charakter entstehen lassen. Hierbei zeigt sich, dass diese Verschlechterung der lokalen Austauschverhältnisse vor allem in den Sommermonaten deutlich stärker wirkt als dies an als typische Innenstadtstandorte mit ausgeprägter Straßenschlucht klassifizierte „Hot Spots“ der Fall ist [Henninger, 2013c].

#### 4.7 Bodennahes Ozon innerhalb von Grünflächen

Auch wenn die lokalklimatischen Vorteile urbaner Grünflächen hinlänglich bekannt sind besteht durchaus in Bezug auf die Betrachtung solcher Räume ein gewisser Nachholbedarf [Henninger, 2015]. Diverse Baumarten sind in der Lage unterschiedliche Mengen an biogenen flüchtigen organischen Verbindungen zu emittieren [Henninger, 2012b, 2013a, 2014a/b]. Eine dieser Stoffgruppen sind die Isoprenoide. Einige der von der Vegetation produzierten organischen Substanzen dienen u. a. der Abwehr von Herbivoren und Pathogenen oder sie locken Bestäuber an. Des Weiteren wird vermutet, dass das Isopren die Pflanze vor Hitze- bzw. oxidativem Stress schützt [Henninger, 2013a; 2015]. Die Höhe der Emissionsrate der biogenen Kohlenwasserstoffe ist abhängig von den meteorologischen Bedingungen (Blatttemperatur, Strahlungsintensität bzw. Intensität der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR)) und wie diese letztendlich auf den Vegetationsbestand wirken. Demnach sind es vor allem autochthone Wetterlagen, gekennzeichnet durch eine hohe Strahlungsintensität und damit einhergehend hohen Lufttemperaturen, die am besten dazu geeignet sind Isopren an den Pflanzenblättern zu emittieren [Henninger, 2014b; 2015]. Dies bedeutet in einem ersten Umkehrschluss, dass genau an diesen Tagen, an denen ohnehin mit erhöhten Ozonkonzentrationen zu rechnen ist, das biogene Isopren zusätzlich zu einer weiteren Produktion des bodennahen Ozons beiträgt. Und dies innerhalb potentieller urbaner Rückzugs- und Erholungsräume.

Zu den einschlägigen Isopren emittierenden Arten zählen vor allem die Laubbäume (z. B. Eiche (*Quercus*), Pappel (*Populus*), Platane (*Platanus*), Robinien (*Robinia*), Weiden (*Salix*)). Nadelbäume wie z. B. die Gemeine Fichte (*Picea abies*) spielen lediglich eine untergeordnete Rolle. Problematisch ist, dass viele der oben genannten Baumarten als charakteristische Stadtvegetation anzusehen sind. Somit sind meist einige wenige Arten für die Gesamtheit der Isoprenemissionen verantwortlich. Gegenwärtig kann festgehalten werden, dass große Mengen an biogenem Isopren im urbanen Raum trotz einer vergleichsweise eher geringen Vegetationsdichte freigesetzt werden. Dies liegt darin begründet, dass innerstädtische Grünflächen oftmals eine Artenzusammensetzung aufweisen, die nicht zwingend der potenziell natürlichen Vegetation des Standortes entspricht. Ein weit verbreitetes Beispiel ist die Isopren emittierende Baumart der ahornblättrigen Platane (*Platanus acerifolia*). Sie zählt ursprünglich nicht zu den heimischen Baumarten [Henninger, 2015]. Dennoch wird sie aufgrund ihrer Widerstandsfähigkeit gegenüber Luftverschmutzung sowie einer gewissen Unempfindlichkeit gegenüber verdichtetem Boden vielfach als Straßenbaum sowie in Parkanlagen angepflanzt (Wagner, 2014).

Biogenes Isopren weist gegenüber den anthropogenen Kohlenwasserstoffen ein verhältnismäßig hohes Ozonbildungspotenzial auf. Grund dafür ist die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante der Reaktion mit OH-Radikalen. Dies bedeutet, dass Isopren selbst bei geringen Konzentrationen als durchaus ernst zu nehmende Vorläufersubstanz für die Produktion von Ozon angesehen werden kann [Henninger, 2015]. Seit Mitte der 1990er Jahre setzen sich in der planungsorientierten angewandten Stadtökologie bzw. Stadtklimatologie verstärkt die Begriffe der „low-emitter“ und „high-emitter“-Pflanzen durch. Für die innerstädtische Grünplanung kann die Berücksichtigung dieser Bäume einen nachhaltigen Einfluss auf die biogene Kohlenwasserstoffemissionsrate und damit auch auf die Ozonbildungspotenziale haben [Henninger, 2013a; 2015]. Dass dieses Thema bisher in vielen Fällen eher stiefmütterlich behandelt wurde ist der Tatsache geschuldet, dass es an einer allgemein gültigen Analysemethodik mangelt und so vor allem eine Übertragbarkeit an andere Standorte nur schwer möglich ist. Sicherlich gibt es mittlerweile eine große Zahl an fachwissenschaftlichen Publikationen, die sich der Thematik widmet (Analysen der

Ozonbildungspotenziale von Stadtbäumen, Straßenbegleitgrün, in innerstädtischer Parkvegetation). Allerdings offenbart sich immer wieder das Defizit, dass die publizierten Emissionspotenziale der Baumarten extreme Schwankungen aufweisen. Die entsprechende notwendige Vergleichbarkeit wird somit erschwert, was letztlich auf zahlreiche standortbedingte Einflussfaktoren zurückzuführen ist (u. a. genetische Unterschiede, Variationen im Alter der Bäume, Variation der Pflanzenarten, Variationen der Blattgröße, unterschiedliche Bodeneigenschaften, Schwankungen der Wasserverfügbarkeit, Variation der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration; Henninger, 2015).

#### 4.8 Nebenwirkungen von bodennahem Ozon

Die gesundheitlichen Nebenwirkungen des Ozons auf den menschlichen Organismus sind unterschiedlich [Henninger, 2012b; 2014b]. In Tabelle 2 sind einige Folgewirkungen aufgelistet und zeigen deutlich, weshalb die durch diverse Pflanzen geförderte Ozonproduktion innerhalb von urbanen Grünflächen ein sensibles Thema darstellt [Henninger, 2013a]. Basierend auf Daten aus den Jahren 2011 bis 2014 konnte nachgewiesen werden, dass es einen offensichtlichen Zusammenhang zwischen Standorten mit einer hohen bodennahen Ozonkonzentration und dem Auftreten von Atemwegserkrankungen gibt, v. a. innerhalb urbaner Park- und Erholungsflächen. Hierbei spielt die Tatsache eine Rolle, dass luftgetragene Allergene (z. B. Blütenpollen) durch die Wirkung des Ozons an Aggressivität gewinnen und mitunter bei bereits vorbelasteten Menschen (Allergiker, Asthmatiker u. a.) zu unerwartet heftigen Reaktionen führen. Besonders kritisch ist diese Entwicklung im Bezug zum Klimawandel zu sehen, da, wie bereits oben beschrieben, die Produktion von bodennahem Ozon durch höhere Umgebungstemperaturen und eine gesteigerte Zahl einstrahlungsintensiver Sonnentage gefördert wird [Henninger, 2012b; 2013a; 2014b].

	Potenzielle Wirkung auf den Organismus
Substanz: Ozon (O <sub>3</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vordringen in die unteren Atemwege</li> <li>• Husten, Reizung der Atemwege/ Atembeschwerden, Tränenreiz, Kopfschmerzen</li> <li>• verringerte körperliche Leistungsfähigkeit</li> <li>• Anstieg der Asthmaanfälle</li> <li>• Erhöhung der allergischen Reaktionsbereitschaft</li> </ul> = davon betroffen: ~10-20 % der Bevölkerung
Risikogruppe:	Sportler, Personen mit Freiluftarbeitsplätzen, Asthmatiker, Kleinkinder/ Säuglinge

Tabelle 2: Wirkung des bodennahen Ozons auf den menschlichen Organismus [verändert nach Henninger, 2013a].

#### 4.9 Matrix-Methode

Um aus ökologischer und ökonomischer Sicht eine adäquate Aussage über klimaangepasste Veränderungen in einer Stadtstruktur treffen zu können, ist es heute ratsam auf mathematische Simulationen zurückzugreifen. Mithilfe solcher mikroklimatischen Modellierungen können urbane Problem- und Handlungsfelder besser identifiziert und entsprechende Strategien besser abgeschätzt werden. Die Wechselbeziehungen zwischen den unterschiedlichen Klimatelementen und der heterogenen baulichen Struktur im Stadtgebiet sind komplex, sodass es zunehmend schwerer wird zwischen dem Ist- und dem beabsichtigten Planzustand klare Ergebnisse vorherzusagen, v. a. für hochverdichtete Siedlungsräume wie z. B. die Großstädte Asiens [Ringhof & Henninger, 2010; Henninger, 2011c]. Mikroklimatische Simulationsmodelle ermöglichen letztendlich eine Berücksichtigung der verschiedenen Elemente, wie urbane Vegetation und Bebauung, und wie diese in Wechselwirkung mit der Atmosphäre treten. Hierdurch wird eine vorausschauende Planung zur Vermeidung von thermischen oder auch lufthygienischen Belastungsräumen möglich. Aber auch eine Optimierung der bereits vorhandenen Baustrukturen ist denkbar [Bruse, 2000]. Da solche Maßnahmen oftmals sehr zeitaufwendig und kostenintensiv sind, entwickelt die Lehr- und Forschungseinheit Physische Geographie der TU Kaiserslautern die sog. Matrixmethode [Fabisch & Henninger, 2014]. Die stadtklimatischen Modifikationen finden sich nicht nur in großen Städten, sondern sind bereits auf kleinräumiger Ebene zu erkennen. Dabei können schon kleine Veränderungen (z. B.: Temperaturanstieg im Vergleich zum Umland) zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Lebensqualität führen und bei Risikogruppen, wie kleinen Kindern oder Senioren, gesundheitliche Probleme hervorrufen. Während große Städte meist die Finanzkraft besitzen diesen Stadtklimaeffekt durch empirische Erhebungen

oder komplexe Modellierungen nachzuweisen und zu analysieren fehlen kleinen Gemeinden oft diese Mittel. Eine ökologisch ausgerichtete Siedlungsentwicklung ist allerdings nur unter zur Hilfenahme einer belastbaren Bestandsaufnahme der ökologischen Rahmenbedingungen möglich. Die Kosten von empirische Erhebungen und numerischen Modellierungen können zwar durch eine Verringerung der räumlichen Auflösungen bzw. der Detaillierung reduziert werden, doch dabei wird die Belastbarkeit der Ergebnisse erheblich verschlechtert. Hier bietet die Matrixmethode eine Möglichkeit für siedlungsklimatische/ -ökologische Untersuchungen auch für kleinere Gemeinden [Fabisch & Henninger, 2015]. Die Intention der Methode beruht auf der Betrachtung von siedlungsökologisch relevanten Indikatoren (z. B. Versiegelungsgrad oder Grünflächenanteil). Diese werden allerdings nicht wie bisher üblich getrennt voneinander betrachtet, sondern in Bezug zueinander gesetzt, sodass die Wirkungszusammenhänge, die zur Ausprägung eines Stadtklimaphänomens führen, berücksichtigt werden. So kann beispielsweise eine Wiesenfläche als potenzielles Kaltluftentstehungsgebiet klassifiziert werden, doch erst eine Hangneigung, mit einer geringen Oberflächenrauigkeit, in Richtung des Siedlungsraums ermöglicht eine stadtklimarelevante Wirkung. Die Bestandsaufnahme der Indikatoren erfolgt anhand eines Rasters mit einer Auflösung zwischen 50 und 100 Metern. Dazu wird ein Fragenkatalog entwickelt, mit dem in einer Smartphone- oder Tablet-App vor Ort zu jedem Raster die benötigten Indikatoren abgefragt werden können. Diese einfache Handhabung ermöglicht es auch Laien die Bestandsaufnahme durchzuführen, um so die Kosten zu reduzieren. Die so gewonnenen Ergebnisse werden in einer Datenbank gespeichert und im Anschluss mithilfe eines Geographischen Informationssystems ausgewertet werden [Allbach et al., 2014; Fabisch & Henninger, 2014; 2015]. Die verwendeten Matrizen erlauben eine Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Stadtklimaphänomens aufgrund der verwendeten Indikatoren. Je nach Auswirkung des Phänomens auf den Menschen, kann diese Eintrittswahrscheinlichkeit als positiv oder negativ bewertet werden. Auf diese Weise können Risiko- und Potenzialkarten erstellt werden, die die Gemeinden dabei unterstützen können, eine siedlungsökologisch orientierte Gemeindeentwicklung voranzutreiben und gezielte Handlungsempfehlungen zu entwickeln [Fabisch & Henninger, 2014; 2015].

## 5 FAZIT UND AUSBLICK

Die angewandte Stadtklimaforschung wird in Anbetracht des rezenten globalen Klimawandels in der Zukunft eine immer größere Rolle spielen. Die Stadt als Wohnort für viele Menschen muss als lokalklimatologischer „Hot-Spot“ bezeichnet werden. Aufgrund der Beeinflussung des natürlichen Ökosystems durch den urbanen Siedlungsraum und die daraus hervorgehenden Problemfelder, wird ein Handeln aus Sicht der Stadtplanung unausweichlich. Dabei gilt es sowohl die klimatischen als auch die lufthygienischen urbanen Belastungsräume zu lokalisieren und zu typisieren, sowie basierend auf den Erkenntnissen mittels geeigneter Klimafunktions- und Planungshinweiskarten entsprechende Gegenmaßnahmen vorzuschlagen. Denn das Wissen und die Kenntnis bezüglich des lokalen Klimas und der daraus resultierenden lufthygienischen Situation sowie deren klimatische Funktionszusammenhänge stellen wichtige Aspekte der Umweltvorsorge und Stadtentwicklung dar. Die beiden Schutzgüter Klima und Luft sind wichtige Bestandteile räumlicher Planung im Abwägungsprozess der Bauleitplanung, Umweltverträglichkeitsprüfungen und entsprechenden Standortuntersuchungen. Ziel einer angewandten und planungsorientierten Stadtklimatologie muss es daher aus klimatischer Sicht sein urbane Problemfelder zu identifizieren und unter Berücksichtigung flächen- und objektbezogener Handlungsfelder immissionsklimatisch relevante Flächennutzungsstrukturen zu sichern, zu entwickeln und wiederherzustellen.

## 6 LITERATURVERZEICHNIS

- ALLBACH, B., HENNINGER, S., DEITCHE, E.: An urban sensing system as backbone of smart cities. In: SCHRENK, M., POPOVICH, V., ZEILE, P., ELISEI, P. [Hrsg.]: REAL CORP: Plan it Smart, pp. 55-64. 2014.
- BRUSE, M.: Anwendung von mikroskaligen Simulationsmodellen in der Stadtplanung. In: BERNHARD, L., KRÜGER, T. [Hrsg.]: Simulation raumbezogener Prozesse: Methoden und Anwendung. Münster. 2000.
- BONGARDT, B.: Stadtklimatische Bedeutung kleiner Parkanlagen – dargestellt am Beispiel des Dortmunder Westparks. In: Essener Ökologische Schriften, Bd. 24, Westarp Wissenschaften, Hohenwarsleben. 2006.
- COHEN, P., POTCHTER, O., MATZARAKIS, A.: Daily and seasonal climatic conditions of green open spaces in the Mediterranean climate and their impact on human comfort. In: Building and Environment, 51, pp. 285-295. 2012.
- ERELL, E., PEARLMUTTER, D., WILLIAMSON, T.: Urban Microclimate – Designing the spaces between buildings. Earthscan, London. 2011.

- CHIFFLARD, P.: Urbaner Wasserhaushalt. In: HENNINGER, S. [Hrsg.]: *Stadtökologie*. Ferdinand Schöningh Verlag, Paderborn. 2011.
- FABISCH, M., HENNINGER, S.: Urban-ecological survey for small settlements. In: *Journal of Ecology - Biomedical & Life Science*, Vol. 4, pp. 591-600. 2014.
- FABISCH, M., HENNINGER, S.: Smartphonegestützte Bestandsaufnahme zur ökologischen Bewertung von Siedlungsräumen. In: SCHRENK, M., POPOVICH, V., ZEILE, P., ELISEI, P., BEYER, C. [Hrsg.]: *REAL CORP: Plan Together - Right Now - Overall*, pp. 561-570. 2015.
- HARTZ, A.: Neue Herausforderungen für die Stadtentwicklung – dargestellt am Beispiel des Klimawandels. In: HENNINGER, S. [Hrsg.]: *Stadtökologie*. Ferdinand Schöningh Verlag, Paderborn. 2011.
- HENNINGER, S.: Energieeffizientes Bauen. In: *Koblenzer Geographisches Kolloquium*, Heft 32, pp. 53-65. 2010.
- HENNINGER, S.: Das Klima der Stadt. In: HENNINGER, S. [Hrsg.]: *Stadtökologie. Bausteine des Ökosystems Stadt*, Ferdinand Schöningh Verlag, Paderborn. 2011a.
- HENNINGER, S.: Ökosystemkomplex Stadt. In: HENNINGER, S. [Hrsg.]: *Stadtökologie. Bausteine des Ökosystems Stadt*. pp. 11-33. Ferdinand Schöningh Verlag, Paderborn. 2011b.
- HENNINGER, S.: Improvement of the thermal comfort within dense housing complexes. In: HERBERT, M., JANKOVIC, V., WEBB, B. [Hrsg.]: *City Weathers - meteorology and urban design 1950-2010*. Manchester Architecture Research Centre, pp. 81-84. 2011c.
- HENNINGER, S.: Urban gardening and urban climate. In: *IGC – Down to Earth, 32nd International Geographical Congress*, Köln. 2012a.
- HENNINGER, S.: Biogenic isoprene and its impact on human health in dependence on meteorological conditions. In: *Journal of Environmental Protection*, Vol. 3, No. 29A, pp. 1206-1212. 2012b.
- HENNINGER, S.: Notwendiger Wandel im Umgang mit innerstädtischen Grünflächen? In: JUNKERNHEINRICH, M., ZIEGLER, K. [Hrsg.]: *Räume im Wandel - Empirie und Politik*, pp. 73-92. 2013a.
- HENNINGER, S.: Der urbane Wasserkreislauf - Veränderungen des lokalen Wasserkreislaufs durch Landnutzungsänderungen. In: *Praxis Geographie: Alles im Fluss - Ökosystemare Kreisläufe*, 01/2013, pp. 14-16. 2013b.
- HENNINGER, S.: Endangerments on Schools. In: SCHRENK, M., POPOVICH, V., ZEILE, P., ELISEI, P. [Hrsg.]: *REAL CORP: Planning Times*, pp. 285-292. 2013c.
- HENNINGER, S.: Urban green and health. In: PFAFFENBACH, C., SCHNEIDER, C. [Hrsg.]: *Global Demographic and Climate Challenges in the City - An interdisciplinary assessment of impacts, needs and strategies*. Aachener Geographische Arbeiten, Heft 50, pp. 115-130. 2014a.
- HENNINGER, S.: The Impact of Biogenic Isoprene in Dependence on Meteorological Conditions within Urban Green. In: RAUCH, S., MORRISON, G., NORRA, S., SCHLEICHER, N. [Hrsg.]: *Urban Environment - Proceedings of the 11th Urban Environment Symposium*, Springer Verlag, pp. 153-162. 2014b.
- HENNINGER, S.: Kann innerstädtisches Grün die Luftqualität beeinträchtigen? In: *Neue Landschaft - Fachzeitschrift für Garten- und Landschaftsbau*, 2, pp. 31-35. 2015.
- HENNINGER, S., SAARONI, H.: Numeric simulation of microclimate modifications in a Mediterranean coastal urban park. In: *Changes – Challenges – Responsibility*, International Geographical Union, Krakau. 2014.
- HENNINGER, S., ELMARSAFAWY, H., TOBIAS, K.: Bahrain Regains Greenery. In: *Journal of Environmental Protection*, Vol. 6, pp. 929-934. 2015.
- HORBERT, M.: Klimatologische Aspekte der Stadt- und Landschaftsplanung. In: *Landschaftsentwicklung und Umweltforschung - Schriftenreihe im Fachbereich Umwelt und Gesellschaft*, Bd. 113. Berlin. 2000.
- KUTTLER, W.: *Klimatologie*. Ferdinand Schöningh Verlag, Paderborn. 2013.
- LITSCHKE, T., KUTTLER, W.: On the reduction of urban particle concentration by vegetation - a review. In: *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 17, No. 3, pp. 229-240. 2008.
- MAYER, H.: Workshop „Ideales Stadtklima“. In: *Mitteilungen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft*, Heft 3, pp. 52-54. 1989.
- OSWALT, P., RIENIETS, T.: *Atlas of shrinking cities*. Hatje Cantz, Ostfildern. 2006.
- OVERBECK, G., HARTZ, A., FLEISCHHAUER, M.: Ein 10-Punkte-Plan „Klimaanpassung. Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel im Überblick. In: *Informationen zur Raumentwicklung*, Heft 6, pp. 1-18. 2008.
- RINGHOF, E., Henninger, S.: Verbesserung der thermischen Behaglichkeit innerhalb dichter Wohnkomplexe am Beispiel einer südkoreanischen Stadt. In: SCHRENK, V., POPOVICH, D., ZEILE, P. [Hrsg.]: *REAL CORP: Cities for everyone: Liveable, prosper, healthy*, pp. 889-897. 2010.
- VDI - Verein Deutscher Ingenieure: *Umweltmeteorologie – Klima und Lufthygienekarten für Städte und Regionen*. VDI-Richtlinie 3787, Bl. 1, Düsseldorf. 2015.
- WAGNER, P.: Analyse von biogenem und anthropogenem Isopren und seiner Bedeutung als Ozonvorläufersubstanz in der Stadtatmosphäre. In: *Essener Ökologische Schriften*, Bd. 34, Westarp Wissenschaften, Hohenwarsleben. 2014.
- WUNDSAM, T., HENNINGER, S.: Leaf-Turning tree species and their local climatic influence on the city. In: *ICUC '09, UCP-13*, Toulouse. 2015.