

## 11

## Urban-industrielle Lebensräume

R. Wittig, W. Kuttler, O. Tackenberg

Städtische Gebiete werden sich im Rahmen des momentan ablaufenden Klimawandels stärker erwärmen als das Umland, wie u. a. in der Region Camden (New Jersey, USA) festgestellt wurde (Solecki et al. 2004, Kuttler 2011). Die städtischen Wärmeinseln werden also noch stärker hervortreten als bisher. Entsprechend ist mit starken Auswirkungen auf die Biodiversität in den betroffenen Städten zu rechnen. Überlegungen hierzu wurden bereits von zahlreichen Autoren angestellt, so für Deutschland von Sukopp & Wurzel (2000). Im Folgenden wird zunächst erörtert, ob und in welcher Hinsicht der urban-industriellen Biodiversität Bedeutung zukommt (11.1). Danach werden die klimatischen Hintergründe dieses Phänomens erläutert. (11.2). Es folgt eine Darstellung der zu erwartenden Auswirkungen auf die Biodiversität (11.3). Hieran schließt sich die Frage an, ob die momentanen Verhältnisse im Bereich der städtischen Wärmeinseln als Modell für die Auswirkungen des Klimawandels im Umland dienen können (11.4). Abschließend werden konkrete Maßnahmen zur Verringerung der Auswirkungen des Klimawandels, zur Adaptation und zur Erhöhung der urban-industriellen Biodiversität vorgeschlagen (11.5).

### 11.1 Die Bedeutung der urban-industriellen Biodiversität

Für das auf der Konferenz von Rio (UNCED 1992) definierte Menschheitsziel, die Erhaltung und nachhaltige Nutzung der weltweiten Biodiversität, ist es erforderlich, dass jedes Land diejenigen Lebensräume und Arten sichert, die in ihm einzigartig sind, oder die in ihm ihren Verbreitungsschwerpunkt besitzen. Der Biotopkomplex Stadt ist innerhalb der Großlebensräume (Biome) weltweit sehr ein-

heitlich beschaffen. Im Grunde genommen gibt es sogar nur drei sich aus Sicht der Biodiversität unterscheidende Stadttypen, nämlich die der temperaten Zonen (inklusive des borealen Bereichs), der semi-arid/ariden Tropen und der semi-humid/humiden Tropen. Bezüglich der städtischen Flora und Fauna wird dementsprechend zu Recht von einer weltweiten Homogenisierung gesprochen. Somit besteht aus Sicht der Konvention von Rio weder für Deutschland noch für eines seiner Bundesländer eine besondere Verantwortung im Hinblick auf den Schutz der urban-industriellen Biodiversität.

Dennoch besitzt die städtische Biodiversität große Bedeutung:

- ▶ für Freizeit, Hobby, Erholung, Wohlbefinden und damit auch für die Gesundheit,
- ▶ für die Umweltbildung,
- ▶ als „weicher“ Standortfaktor (Attraktivität einer Stadt im Wettbewerb um die besten Köpfe),
- ▶ bezüglich der Wechselwirkungen mit dem Klima.

Es ist also durchaus sinnvoll, sich mit den Konsequenzen des Klimawandels für die städtische Biodiversität zu beschäftigen.

Als Anreiz, sich für Biodiversität zu interessieren, sind Tiere in der Regel weitaus „erfolgreicher“ als Pflanzen. Auch im Hinblick auf die Hobbies „Naturbeobachtung/Naturfotografie“ rangieren Tiere meist vor den Pflanzen. Im Übrigen aber besitzt die Vegetation eine größere Bedeutung als die Tierwelt. Dies trifft auch für den Bereich Freizeit zu, wo der Vegetation eine wichtige Rolle als „Hintergrund“ von Freizeit und Erholung zukommt (Spazieren im Grünen, Joggen in Park und Stadtwald, kontemplative Erholung auf einer Parkbank, Grillen auf einer Wiese etc.). Für die beiden weiteren genannten Punkte ist sogar ausschließlich die Vegetation bzw. die Flora von Bedeutung: Als „wei-

cher“ Standortfaktor wirken Ausmaß und Diversität von Grünflächen einer Stadt; ob eine bestimmte Anzahl von Schmetterlingen, Käfern oder Vögeln vorkommen, ist dagegen für die Standortwahl in der Regel unwichtig. Und als Klimafaktor spielt in der Stadt ausschließlich die Vegetation eine Rolle. In den Abschnitten 11.3 und 11.5 wird daher ausschließlich auf Flora und Vegetation eingegangen.

## 11.2 Stadtklimatische Grundlagen

Die klimatischen und lufthygienischen Verhältnisse urbaner Räume werden im Wesentlichen durch die Art der Bebauung und Oberflächenversiegelung, die Freisetzung von Abwärme und Luftverunreinigungen sowie durch ihre geographische Lage und Topographie verursacht. Da das Klima von Städten in das jeweils vorherrschende Großklima eingebettet ist, pausen sich auch makroskalige Einflüsse auf das Stadtklima durch. Jedoch treten die Wirkungen der eher großräumigen Faktoren im Allgemeinen hinter diejenigen des Lokal- und Regionalklimas zurück, insbesondere dann, wenn schwachwindige Strahlungswetterlagen die autochthonen Elemente des Stadtklimas verstärkt hervortreten lassen (Kuttler 2009).

### 11.2.1 Klimarelevanz städtischer Oberflächen

Städte stellen nicht nur Strömungshindernisse gegenüber dem Luftaustausch dar, sondern weisen auch in Abhängigkeit ihres Versiegelungsgrades prägnante strahlungsklimatische, thermische und hydrologische Unterschiede zum unbebauten Umland auf (Tab. 11.1). Die thermischen und hydrologischen Eigenschaften versiegelter Flächen werden durch die verwendeten Baustoffe bestimmt. Für die Oberflächenenergiebilanzen von besonderer Bedeutung sind darüber hinaus deren Farbe und Wasseraufnahmefähigkeit. Insbesondere Beton- und Asphaltflächen weisen zum Teil extreme thermische Eigenschaften auf. So liegen die für die Speicherfähigkeit ausschlaggebenden Wärmekapazitätsdichten der genannten Materialien um den Faktor zwei über denjenigen natürlichen trockenen Bodens. Verfügen diese Flächen darüber hinaus über eine dunkle Farbe, so wird bei starker Sonneneinstrahlung besonders viel Energie aufgenommen, gespeichert und zeitverzögert abgegeben.

Für die Versickerung von Wasser in den versiegelten Untergrund sind Anzahl und Durchlässigkeit von Fugen und Rissen des abdichtenden Materials maßgeblich. So weist zum Beispiel eine Asphaltfläche in Bezug auf die Jahresniederschlagssumme

**Tab. 11.1:** Struktur- und Klimaunterschiede zwischen gegliederten Stadt- und ebenen Umlandarealen. In Anlehnung an Kuttler 2010b.

|    |                            |  |
|----|----------------------------|--|
| 1. | Stadtoberfläche            | Umwandlung von „2d“ in „3d“<br>Vergrößerung der wahren Oberfläche; starke Versiegelung   |
| 2. | Bausubstanz / Untergrund   | Hohe Materialdichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazitätsdichte („Speicherfähigkeit“)<br>Veränderter Wasserhaushalt (Verdunstungseinschränkung, Abflusserhöhung)<br>Verlust an natürlichen Kaltluftbildungsflächen |
| 3. | Strahlungsbilanz           | Beeinträchtigung aller Strahlungsbilanzglieder in Abhängigkeit von den kurz- und langwelligen Albeden sowie den Emissionsgraden<br>Einfluss durch Strassenschluchtgeometrie<br>Höhere Oberflächentemperaturen        |
| 4. | Wärmebilanz                | Fühlbarer Wärmestrom höher als latenter Wärmestrom (höhere Lufttemperatur);<br>zusätzliche „anthropogene Wärme“ (Metabolismus, Gewerbe, Klimaanlage, Gebäudebeheizung, Industrie, Verkehr)                           |
| 5. | Luftfeuchtigkeit           | Geringer, in Einzelfällen höher; reduzierte Regenwasserversickerungen sowie eingeschränkte Evapotranspiration und Interzeptionsverdunstung   |
| 6. | Wind                       | Abnahme der Windgeschwindigkeit, reduzierter Austausch, Zunahme der Böigkeit (Richtung und Geschwindigkeit)  |
| 7. | Luftverunreinigung         | Überwiegend höhere Konzentrationen (fest, gasförmig); Quellen: Verkehr, Gewerbe, Industrie, Hausbrand<br>Eingeschränkte Filterfunktion durch Vegetation  |
| 8. | Anthropogener Stressfaktor | Erhöht wegen Anstiegs der Wärmebelastung,<br>Verschlechterung der Luftqualität, mehr Lärm  |

(Berlin) einen Abfluss von rund 70 % auf, während eine Rasengittersteinfläche nur etwa 5 % erreicht (Wessolek 2001). Vergleicht man beide Oberflächen hinsichtlich ihrer Evapotranspirationsfähigkeit, so zeigt sich, dass eine Asphaltfläche etwa 20 %, die mit Rasengittersteinen bedeckte Fläche hingegen 45 % des Jahresniederschlags verdunsten. Dadurch haben beide Materialien einen außerordentlich unterschiedlichen Einfluss auf den latenten Wärmestrom. Verdunstungsaktive Rasengittersteinflächen tragen wegen der hohen latenten Wärmeflussdichte ( $q_{v,W 20^\circ\text{C}} = 2,45 \text{ MJ/kg}$ ) deshalb wesentlich weniger zur unmittelbaren Lufterwärmung bei als zum Beispiel Asphaltflächen.

### 11.2.2 Urbane Energiebilanz

Die Energiebilanz, die aus dem Strahlungs- und Wärmehaushalt besteht, wird in Städten durch deren geographische Lage, Größe, Struktur und Oberflächenbeschaffenheit geprägt.

Der Strahlungshaushalt ( $Q^*$ ) setzt sich aus den Einnahmegliedern Globalstrahlung ( $K\downarrow$ ) und langwelliger atmosphärischer Gegenstrahlung ( $L\downarrow$ ) sowie den Abgabegliedern kurzwellige Reflexion ( $K\uparrow$ ) und langwellige Ausstrahlung der Oberflächen ( $L\uparrow$ ) zusammen.

Die Energiebilanz wiederum stellt eine Funktion der Strahlungsbilanz ( $Q^*$ ), der anthropogenen und metabolischen Wärmeflussdichte ( $Q_{\text{anthr}}, Q_{\text{met}}$ ), der turbulenten fühlbaren und latenten Wärmeflussdichte ( $Q_H, Q_E$ ) sowie der Speicherwärmeflussdichte ( $Q_S$ ) dar. Je nachdem, ob diese Größen zur oder von der Erdoberfläche gerichtet sind, erhalten sie positive oder negative Vorzeichen.

Insgesamt zeichnet sich die urbane Strahlungsbilanz dadurch aus, dass sich in Abhängigkeit von der Luftverschmutzung die kurzwelligigen Strahlungsfussdichten ( $K\downarrow$ ) im Vergleich zum Umland leicht verringern können, im langwelligigen Bereich ( $L\downarrow, L\uparrow$ ) auf Grund der höheren Temperaturen jedoch meist verstärkt sind. Zugleich ist die kurzwellige Reflexion ( $K\uparrow$ ) aufgrund der in Straßenschluchten häufig zu beobachtenden Mehrfachreflexionen, insbesondere an Glasfassaden, geringer als im Umland.

Dominierende Terme der städtischen Wärmebilanz sind  $Q_H, Q_S$  sowie in Abhängigkeit vom Energieverbrauch auch der anthropogene Wärmestrom  $Q_{\text{anthr}}$ ; die vom menschlichen Körper abgegebe-

ne Energie (durchschnittlich 100 – 150 W/Körper) wird wegen Geringfügigkeit in der auf eine Stadtfläche bezogenen Energiebilanz nicht berücksichtigt. Durch die im Gegensatz zum Umland unterrepräsentierten Verdunstungsflächen in Städten (freie Wasserflächen, Vegetation) fällt dem latenten Wärmestrom  $Q_E$  nur eine eingeschränkte Bedeutung zu.

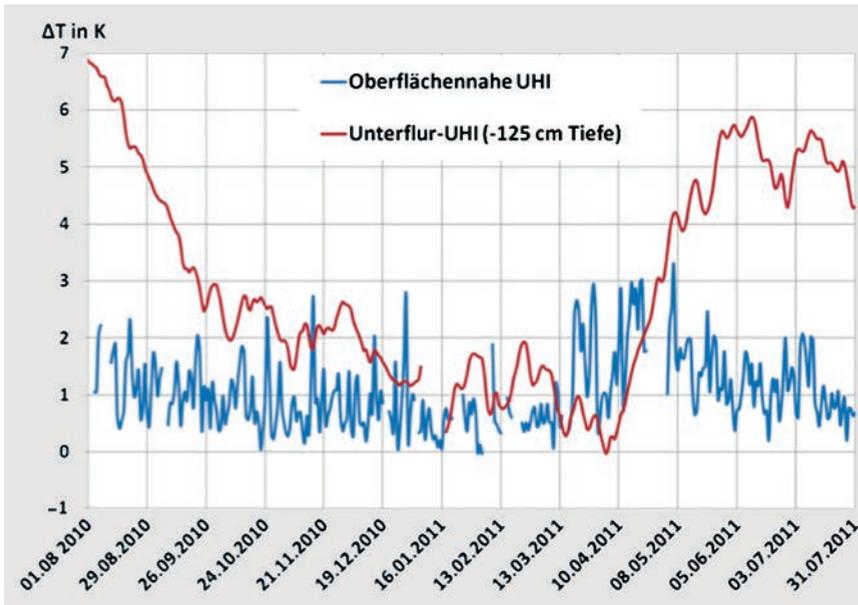
So verschieden die Einzelwerte zwischen bebautem und unbebautem Gebiet auch sein können, in der Summe unterscheiden sich die städtische und rurale Strahlungsbilanz hingegen kaum voneinander. Das liegt unter anderem daran, dass in der Stadt wegen der niedrigeren Albedo zwar ein leichter Gewinn an absorbiertem kurzwelliger Strahlung zu beobachten ist, gleichzeitig aber Siedlungen einen etwas größeren Verlust in der langwelligigen Strahlungsbilanz aufweisen als das Umland.

Deutliche urban/rurale Unterschiede ergeben sich hingegen beim Vergleich der sensiblen Wärmeströme ( $Q_H$ ), die in der Stadt während der Mittagszeit kurzfristig doppelt so hohe Werte erreichen können wie im Umland. Das hängt mit den thermischen Eigenschaften der bebauten Oberflächen zusammen, die bei starker Einstrahlung deutlich mehr Wärme (durch Strahlungs- und turbulente Wärme) abgeben können als rurale Flächen (s. o.). Der latente Wärmestrom ( $Q_E$ ) wird im Wesentlichen durch die Wasserverdunstung von „grün/blauen Oberflächen“ bestimmt. Aus diesen Gründen verwundert es nicht, dass tagsüber im vegetationsbedeckten und ausreichend mit Bodenwasser versorgten Umland unter mitteleuropäischen Verhältnissen bis zu dreifach höhere Werte erreicht werden, als am trockenere versiegelten Stadtstandort.

Ein beträchtlicher Anteil der Wärmebilanz wird in den Speicherterm ( $Q_S$ ) überführt, der wiederum am Stadtstandort stärker ausgeprägt ist als im Umland. Die tagsüber erfolgende Ableitung von Energie in die Baumassen und den Untergrund mindert die Überwärmung der Luft im Vergleich zum Umland, während die Baumassen nachts bei negativer Strahlungsbilanz an der Entstehung der städtischen Überwärmung maßgeblich beteiligt sind.

### 11.2.3 Städtische Überwärmung und Luftverunreinigung

Die städtische Wärmeinsel (engl. *Urban Heat Island*, UHI) kennzeichnet eine positive horizontale



**Abb. 11.1:** Tagesmittelwerte der oberirdischen ( $\Delta T_{uo-ro} > 0$  K; 2 m ü. Gr.) und unterirdischen ( $\Delta T_{uu-ru} > 0$  K; -1,25 m u. Gr.) Wärmeinsel in Oberhausen für den Zeitraum 1.08.2010 bis 31.07.2011. H. Püllen, Essen, pers. Mitt.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> uu, uu = urban oberirdisch, unterirdisch; ro, ru = rural oberirdisch, unterirdisch; m. ü. (u) Gr. = Meter über (unter) Grund. Urbaner Messstandort: Innenstadt; Standortumgebung überwiegend mit Asphaltdecke versiegelt

Temperaturdifferenz ( $\Delta T_{u-r} > 0$  K) zwischen Stadt (u) und Umland (r). Ihre Entstehung und Intensität sind von verschiedenen Einflussgrößen abhängig und diese korrelieren zum Beispiel positiv mit der Höhe des Versiegelungsgrads, der Einwohnerzahl und dem Verhältnis der Höhe der Straßenrandbebauung und Straßenbreite. Negative Abhängigkeiten ergeben sich hingegen beispielsweise zum Wolkenbedeckungsgrad und zur Windgeschwindigkeit.

Städtische Wärmeinseln lassen sich in zwei Gruppen unterscheiden, je nachdem ob sie oberirdisch (an der Bodenoberfläche oder in der urbanen Grenzschicht) oder unterirdisch (im nahen oder tiefen Untergrund) auftreten. **Abb. 11.1** enthält exemplarisch Tagesmittelwerte sowohl für die Grenzschichtwärmeinsel ( $\Delta T_{uo-ro} > 0$  K; 2 m ü. Gr.) als auch solche für eine Unterflurwärmeinsel ( $\Delta T_{uu-ru} > 0$  K; -1,25 m u. Gr.).

Die Werte der oberirdischen UHI erreichen in diesem Fall bis zu 3 K, diejenigen der Unterflurwärmeinsel über 6 K. Während die Überflurwärmeinsel keinen signifikanten Unterschied zwischen den Sommer- und Wintermonaten zeigt, ergibt sich für die Unterflurwärmeinsel stattdessen eine deutliche saisonale Abhängigkeit. Ferner unterscheiden sich beide UHIs dadurch, dass die täglichen Spannweiten der Überflurwärmeinsel wesentlich größer sind als diejenigen der Unterflurwärmeinsel.

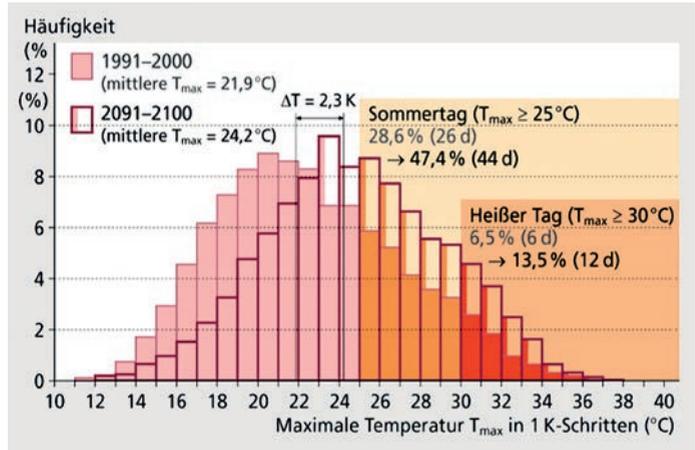
Die Daten zeigen, dass der Untergrund gerade in dichtbebauten Innenstadtbereichen um mehrere Kelvin wärmer sein kann, als der der unbebauten Umgebung. Diese Wärme kann für die Vegetation standortbestimmend sein, aber auch als regenerative Energie über Wärmetauscher genutzt werden.

#### 11.2.4 Einflüsse des globalen Klimawandels auf Stadtökosysteme

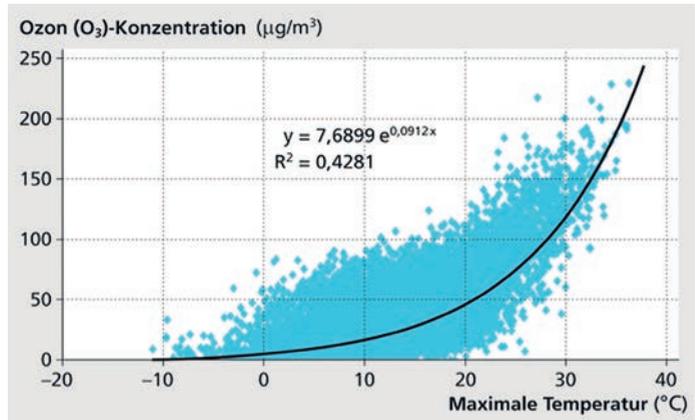
Der globale Klimawandel führt zu Veränderungen der vorherrschenden thermischen und hydrologischen Verhältnisse (s. Becker et al., **Kap. 2** in diesem Band). In Stadtgebieten, die bereits unter den gegebenen klimatischen Bedingungen Wärmeinseln aufweisen, dürften zukünftig deren sommerliche Anzahl, Intensität und Andauer zunehmen, falls nicht Gegenmaßnahmen der Stadt- und Umweltpolitik initiiert werden.

In welchem Maße sich das thermische Klima in einer Stadt verändern wird, zeigt **Abb. 11.2**. Geht man beispielsweise davon aus, dass unter den gegenwärtigen klimatischen Bedingungen der aktuelle Mittelwert der Lufttemperaturmaxima der Sommermonate Juni, Juli und August in Essen einen Wert von 21,9°C aufweist, dann ergeben sich unter den jetzigen Klimabedingungen durchschnittlich 26 Sommertage ( $t_{max} \geq 25^\circ\text{C}$ ). Stellt man die These

**Abb. 11.2:** Verteilung der Maxima der Lufttemperaturen in den Sommermonaten am Standort Essen im gegenwärtigen und zukünftigen Klima. Modell WETTREG/ECHAM5; IPCC-SRES-Szenario: A1B; verändert; D. Düttemeyer, Essen, pers. Mitt., hier nach Kuttler 2011.



**Abb. 11.3:** Abhängigkeit der Ozonstehung von der Lufttemperatur für den Industriegebietsstandort Duisburg-Walsum (1984-2007). Melkonyan, pers. Mitt., Daten nach LANUV, Essen; hier nach Kuttler 2011.



auf, dass in einem zukünftigen Klima des Ruhrgebietes die Lufttemperaturmittelwerte in Essen um 2,3 K zunehmen, dann wird es zu einem Anstieg um weitere 18 Tage, auf dann 44 Tage, kommen. Das sind immerhin fast anderthalb Monate, an denen Sommertage im mittleren Ruhrgebiet vorherrschen werden. Heiße Tage, an denen die Lufttemperaturmaxima sogar  $\geq 30^\circ\text{C}$  erreichen, nehmen unter den genannten Bedingungen von heute 6 Tage ein, unter den Konditionen des Klimawandels wird sich diese Zahl auf 12 Tage erhöhen. Dieses stellt immerhin eine Verdoppelung der Anzahl des Ausgangswertes dar.

Der Klimawandel wird wegen der prognostizierten Zunahme sonnenscheinreicher Witterungsabschnitte allerdings nicht nur zu einem Temperaturanstieg führen, sondern auch zu einer Erhöhung der Globalstrahlungsstromdichte. Da sowohl hohe

Temperaturen als auch kräftige Sonneneinstrahlung wichtige Voraussetzungen zur Bildung des sekundären Spurenstoffs Ozon sind, werden die Ozonkonzentrationen künftig ansteigen (Jacob & Winner 2009; Lin et al. 2001; Kuttler & Straßburger 1999). Ein eindrucksvolles Beispiel der temperaturabhängigen Entstehung von Ozon zeigt **Abb. 11.3**. Hier nach belaufen sich die Ozonkonzentrationen im Mittel bei  $10^\circ\text{C}$  auf rund  $19\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ , bei  $20^\circ\text{C}$  schon auf  $47\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  und steigen bei  $30^\circ\text{C}$  sogar auf  $119\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  an. Dieser exponentielle Anstieg hängt damit zusammen, dass eines der Vorläufergase (PAN, Peroxyacetylnitrat), welches an der Ozonbildung beteiligt ist, erst bei höheren Temperaturen zersetzt wird, wodurch entsprechende Stickstoffverbindungen freigesetzt werden, die wiederum die Grundlage der Ozonstehung bilden. Ferner geben verschiedene Pflanzen verstärkt biogene Kohlenwasserstoffe (zum

Beispiel Isopren) ab, die wichtige Ozonvorläufersubstanzen darstellen (Pacifico et al. 2009).

### 11.2.6 Ausblick

Eine dem Klimawandel gerecht werdende Stadtplanung sollte eine kompakte, dennoch gut durchlüftete Bebauungsstruktur favorisieren, die mit ausreichenden Grün-, Frei- und Wasserflächen versehen ist und ausreichende Möglichkeiten zur Beschattung bietet. Eine optimale Anbindung der Bevölkerung an den Personennahverkehr erspart grundsätzlich den Gebrauch von Privatkraftfahrzeugen in den Innenstädten („Stadt der kurzen Wege“) und reduziert damit die Emission von Abgasen, Feinstaub und CO<sub>2</sub>. Bebauungsdichte und Beschattungsmöglichkeiten sollten so gewählt werden, dass im Sommer ausreichender Schutz vor solarer Einstrahlung gegeben ist, im Winter hingegen größtmögliche Strahlungsaufnahme durch die Gebäude garantiert wird. Das vielerorts zu beobachtende suburbane Wachstum sollte zugunsten des Erhalts stadtrandnaher Kaltluftbildungsflächen aufgegeben werden.

Generell gilt es, die Auswirkungen des Klimawandels auf städtische Gebiete verstärkt zu untersuchen. Hierzu werden bereits interdisziplinäre Klimaprojekte durchgeführt (zum Beispiel: dynamik 2009), die zu einem umfassenden Verständnis der Wechselwirkungen Stadt-Atmosphäre in den verschiedenen Regionen beitragen. Das kürzlich erschienene „Handbuch Stadtklima“ (MUNLV 2010), das sich am Beispiel des Ruhrgebiets mit der Anpassung von Städten an den Klimawandel beschäftigt, stellt hierzu eine erste exemplarische Bestandsaufnahme und eine auf andere Ballungsräume übertragbare Handlungsstrategie dar.

### 11.3 Zustandsbeschreibung und Entwicklungsprognosen

Städte sind, verglichen mit ihrem Umland, in der Regel sehr artenreiche Lebensräume (Kühn et al. 2004). So kommen beispielsweise im Stadtgebiet von Frankfurt am Main (Stand 2010) rund 1675 Gefäßpflanzenarten vor ([http://www.biofrankfurt.de/fileadmin/website/download/biozahl/Biozahl\\_2010.pdf](http://www.biofrankfurt.de/fileadmin/website/download/biozahl/Biozahl_2010.pdf)), während die entsprechende Artenzahl im angrenzenden Taunus, dessen Fläche 33mal größer ist als

die von Frankfurt, nur 1250 beträgt (Wittig et al. 2008).

Bei der eindeutigen Mehrzahl der in Städten vorkommenden Organismen handelt es sich jedoch um weltweit verbreitete Arten (Kosmopoliten). Insbesondere die stadttypischen Lebensräume sind artenmäßig sogar über Kontinente hinweg sehr ähnlich, weshalb man im Hinblick auf das Arteninventar der Städte von einer weltweiten Homogenisierung spricht (McKinney 2006; Wittig & Becker 2010). Die Arten urbaner Lebensräume sind dementsprechend global in keiner Weise gefährdet, so dass man sich um ihre Zukunft auch unter dem Gesichtspunkt des Klimawandels keine Gedanken machen muss. Auf offenem Gelände, insbesondere auf Bahn- und Industriebrachen, kommen allerdings auch seltene, wärmeliebende Arten der Roten Listen Deutschlands vor (Wittig 1993; Bönsel et al. 2000). Derartige urbane Biotope stellen Ersatzlebensräume für die Arten der in der vorindustriellen ländlichen Kulturlandschaft weit verbreiteten Magerrasen, für Arten von Fels- und Geröllfluren, aber auch von Kiesbänken an Flussufern dar. Als an sommerliche Wärme und Trockenheit angepasste Arten werden sie vom Klimawandel nicht gefährdet sein, sondern eher davon profitieren. Da es sich in allen Fällen um Pionierarten offener Flächen handelt, werden sie in der Regel im Zuge fortschreitender Sukzession von konkurrenzkräftigeren Arten abgelöst, haben also auf Dauer nur dann Bestand, wenn die betreffenden Flächen offen gehalten werden.

Bei der botanischen Diversität wird, oberhalb der genetischen Ebene, in der Regel zwischen der Diversität der Arten (in ihrer Summe als „Flora“ bezeichnet) und der Diversität der Lebensgemeinschaften („Vegetation“) unterschieden. Diese Differenzierung wird auch im vorliegenden Beitrag vorgenommen. Eine andere Unterscheidung, die jeweils innerhalb von „Flora“ und von „Vegetation“ vorgenommen wird, ist die zwischen „spontan“ und „angepflanzt“. Als spontan werden alle Arten und Lebensgemeinschaften bezeichnet, die sich von selbst angesiedelt haben (also weder gepflanzt noch gesät sind). Allerdings gibt es in den Städten fließende Übergänge, beispielsweise kommen zahlreiche Bäume sowohl als gepflanzte Straßen-, Park-, Friedhofs- und Forstbäume als auch spontan auf Brachflächen und in Stadtwäldern sowie als strauchförmiger Jungwuchs in Hecken und Gebüsch vor.

### 11.3.1 Flora

#### 11.3.1.1 Gepflanzte Arten

##### Stadtbäume

Stadtbäume leisten bereits momentan einen bemerkenswerten Beitrag zur Kohlenstoffspeicherung (Nowak & Crane 2002). Eine Verdoppelung der Zahl der Stadtbäume wäre sicher realisierbar, wahrscheinlich ließe sich sogar eine noch stärkere Vergrößerung des Bestandes erreichen. Bereits vor 12 Jahren wurde von Rowntree & Nowak (1999) gezeigt, wie viel Bäume welchen Alters nötig sind, um das durch einen Menschen verursachte CO<sub>2</sub> zu binden. Werden bereits bei seiner Geburt Bäume gepflanzt, so sind 45 Sämlinge oder 30 zehnjährige Bäume erforderlich; ein 50-jähriger Mensch benötigt dagegen 550 Sämlinge oder 95 zehnjährige Bäume.

Durch reflektierende Baumaterialien (v. a. Dächer, Fassaden) und Beschattung kann die Wärmeinselintensität (UHI) um 20 % vermindert und damit Kühlenergie (und somit CO<sub>2</sub>-Emissionen) sowie Kosten reduziert werden (Akbari et al. 2001). 30 % der insgesamt technisch möglichen Einsparungen sind mit Beschattung durch Bäume zu erzielen, wie für Toronto berechnet wurde (Akbari & Konopacki 2004). Übersichtstafeln für die Wirkung unterschiedlicher Morphotypen von Bäumen wurden von Simpson (2002) erstellt. Angeblich lässt sich damit eine thermische Wirkung um +/- 10 % voraussagen.

Eine sicherlich nicht in allen Punkten exakte, aber dennoch insgesamt ernstzunehmende Vorstel-

lung der Größe des monetären Wertes der klimabezogenen Wirkungen von Stadtbäumen vermittelnde Übersicht (s. hierzu auch Killocoat et al. 2002) ist in **Tab. 11.2** enthalten.

Mit fortschreitendem Klimawandel wird die Gefährdung der Stadtbäume zunehmen. Hierfür verantwortlich sind:

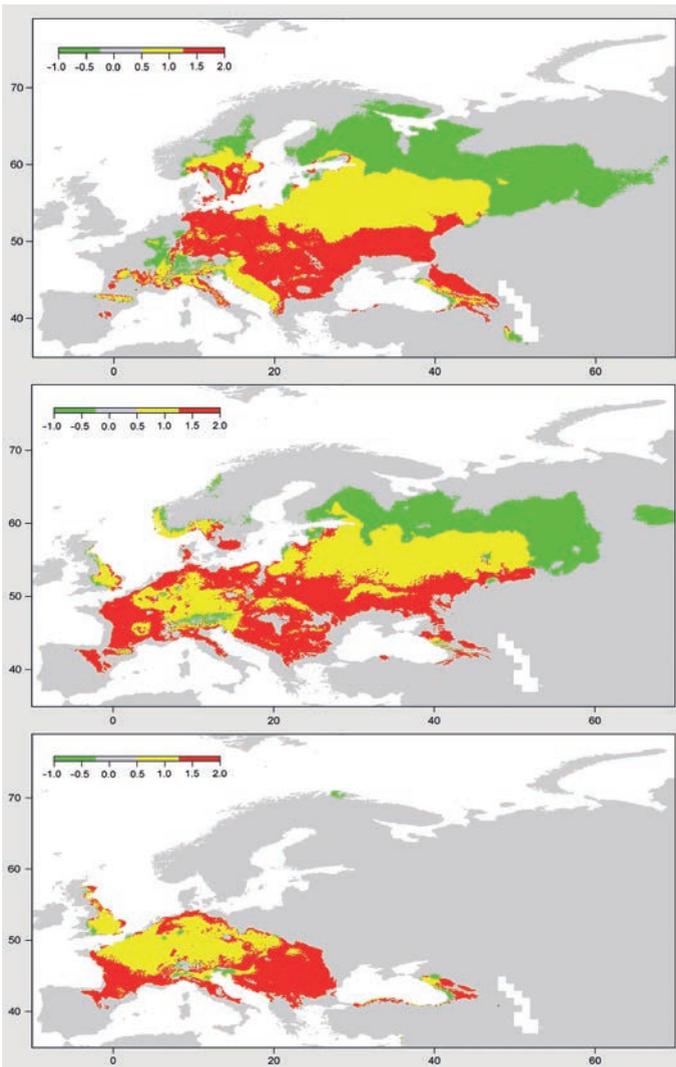
- ▶ **Direkte Wirkungen:**
- ▶ Hitze- und Trockenstress: verringertes Wachstum, Tod oder erhöhte Krankheitsanfälligkeit
- ▶ erhöhter Ozongehalt: ähnliche Wirkungen wie Hitze- und Trockenstress
- ▶ mehr und heftigere Stürme: Windwurf oder zumindest Sturm Schäden
- ▶ häufigere Starkregenereignisse: Wurzelschäden oder Entwurzelung durch Überflutung
  
- ▶ **Indirekte Wirkungen:**
- ▶ Bevölkerung sucht häufiger die Parks auf: Bodenverdichtung
- ▶ mehr Baum-Schädlinge überleben den Winter
- ▶ neue Schädlinge kommen hinzu

Momentan sind unter den 15 häufigsten Stadtbauarten (Wittig 2002) zehn mitteleuropäische, zwei nordamerikanische und lediglich drei mediterrane Arten. Seit einigen Jahren tritt zusätzlich die ebenfalls ursprünglich mediterrane Walnuss (*Juglans regia*) häufig spontan auf (Adolphi 1995; Hetzel 2009). Gut an Trockenheit angepasst zu sein scheint der aus China stammende Götterbaum (*Ailanthus altissima*), denn er breitet sich schon seit mehreren Jahren auf extrem urban-industriellen Brachen

**Tab. 11.2:** Schätzung verschiedener ökonomischer Werte für 100 000 große, ausgewachsene Stadtbäume in einer australischen Stadt. Nach Moore 2009, gekürzt, 1 € entspricht ca. 1,4 Austral. \$.

| Faktor  | Wert pro Baum   | Menge             | Preis pro Einheit (in Austral. \$)   | Wert (in Austral. \$) |
|---|---|-------------------|--|-----------------------|
| In Bäumen festgelegter Kohlenstoff                  | 12,5 Tonnen   | 1,25 Mill. Tonnen | 20 pro Tonne t   | 25 Mill.              |
| Stromersparnis (geringerer Einsatz von Klimaanlage) | 30 kWh  | 3 Mill. kWh       | 0,17 \$ pro kWh  | 510 000 \$ pro Jahr   |
| Vermiedene Emissionen                               | 1,2 kg pro kWh  | 3600 Tonnen       | 20 \$ pro Tonne  | 72 000 \$ pro Jahr    |
| Wassersparnis aufgrund von Stromeinsparung*         | 30 kWh pro Baum bei 100 L pro kWh                             | 300 Mill. Liter   | 1,50 \$ pro Kiloliter  | 45,000 \$             |
| Verlängerte Lebensdauer asphaltierter Gehwege       | 540 \$ pro m <sup>2</sup> bei einer Lebensdauer von 20 Jahren |                   | 225 \$ pro m <sup>2</sup> bei einer um 50 % verlängerten Lebensdauer von 10 Jahren | 47 250 000 \$         |

\* bei Stromgewinnung aus Kohle werden 100 l Wasser pro kWh benötigt



**Abb. 11.4:** Effekt des Klimawandels auf drei in Städten häufig gepflanzte einheimische Baumarten: (oben) Spitz-Ahorn (*Acer platanoides*), (Mitte) Winter-Linde (*Tilia platyphyllos*) und (unten) Sommer-Linde (*Tilia cordata*). Dargestellt sind Unterschiede in der Habitateignung zwischen den aktuellen und den für das Jahr 2050 prognostizierten Klimabedingungen (A2A Klimaszenario mit dem Zirkulationsmodell HadCM3). Rot: deutliche Abnahme der Habitateignung, Grün: deutliche Zunahme der Habitateignung, Gelb: Gebiete ohne deutliche Veränderung der Habitateignung. Grau: Art kommt natürlicherweise nicht vor. Modellierungsalgorithmus: MAXENT, berücksichtigte Umweltfaktoren: 19 Bioklimatische Variablen.

(Bahngelände, Industrieflächen) aus (Kowarik & Böcker 1984). Neuerdings werden weitere Spontanvorkommen von bisher nur angepflanzt wachsenden wärmeliebenden Baumarten beobachtet, z. B. des Blauglockenbaums (*Paulownia tomentosa*) (Nowack 1987).

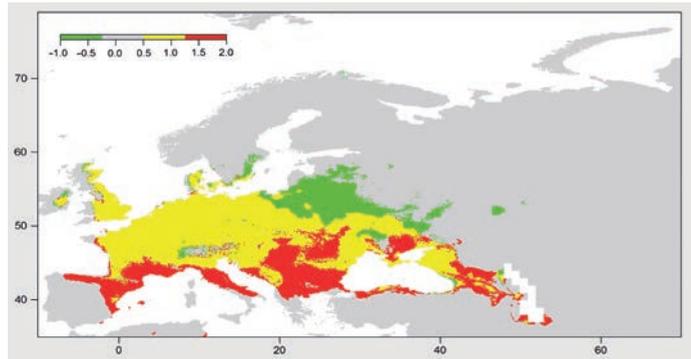
Für viele der bisher (im Hinblick auf Erhaltung und Förderung der Biodiversität zu Recht) bei Anpflanzungen immer noch bevorzugten einheimischen Baumarten, wird Deutschland im zunehmendem Klimawandel deutlich schlechtere Habitateigenschaften aufweisen als bisher (Abb. 11.4). Gleiches gilt für einige weitere einheimische Bau-

marten, die in Städten öfter als Heckensträucher, denn als Bäume kultiviert werden (Abb. 11.5).

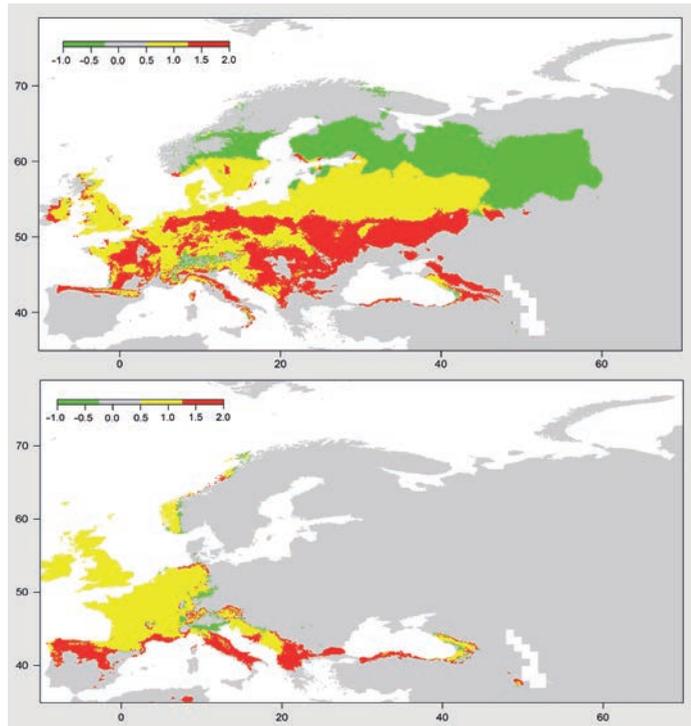
### Sträucher

Von den im Siedlungsbereich häufig gepflanzten Straucharten (s. Kunick 1985; Ringenberg 1994) besitzen zahlreiche Vertreter bereits aufgrund ihres ursprünglichen geografischen oder standörtlichen Optimums einen an Trockenheit angepassten Bauplan und sind daher relativ unempfindlich gegenüber trocken-warmen Sommern. Hierbei handelt es sich um die traditionellen Hecken- und Ziersträucher Forsythie (*Forsythia spec.*), Flieder (*Syringa*

**Abb. 11.5:** Effekt des Klimawandels auf die gerne als „Heckenstrauch“ genutzte einheimische Baumart Feld-Ahorn (*Acer campestre*). Rot: deutliche Abnahme der Habitateignung, Grün: deutliche Zunahme der Habitateignung, Gelb: keine deutliche Veränderung. Grau: Art kommt natürlicherweise nicht vor. *Weiteres:* s. Abb. 11.4.



**Abb. 11.6:** Effekt des Klimawandels auf zwei häufig angepflanzte einheimische Straucharten: (oben) Hasel (*Corylus avellana*) und (unten) Stechpalme (*Ilex aquifolium*). Rot: deutliche Abnahme der Habitateignung, Grün: deutliche Zunahme der Habitateignung, Gelb: keine deutliche Veränderung. Grau: Art kommt natürlicherweise nicht vor. *Weiteres:* s. Abb. 11.4



*vulgaris*), Liguster (*Ligustrum vulgare*) und Wolliger Schneeball (*Viburnum lantana*) sowie einige erst seit wenigen Jahrzehnten oder Jahren angepflanzte immergrüne Arten wie Mahonie (*Mahonia aquifolium*), Lorbeer-Kirsche (*Prunus laurocerasus*) und einige *Berberis*-Arten (*Berberis juliana*, *B. thunbergii*, *B. verruculosa*). Aber auch die in Hecken strauchförmig gehaltene einheimische Baumart *Taxus baccata* (Eibe) sowie einige echte Sträucher (z. B. *Rosa* div. spec.) sind, im Vergleich zu vielen anderen einheimischen Waldgehölzen, an wärmere, sommer-

trockene Standorte adaptiert. Verschlechtern werden sich die Bedingungen dagegen z. B. für Hasel (*Corylus avellana*) und Stechpalme (*Ilex aquifolium*) (Abb. 11.6) sowie den in Städten meist zur Bildung von Hecken strauchförmig gehaltenen Feld-Ahorn (*Acer campestre*) (Abb. 11.5)

#### Kletterpflanzen

Alle Kletterpflanzen besitzen einen im Vergleich zu der bei maximaler Größe vorhandenen Blattmasse geringen Stammdurchmesser. Bei starker Transpi-

ration der Blätter reicht das Leitungsgewebe daher nicht aus, um genügend Wasser nachzuliefern. Entsprechend sind die in Deutschland einheimischen Kletterpflanzen in der Regel nicht an Trockenstandorten zu finden. Weltweit betrachtet liegt das Verbreitungsoptimum der Kletterpflanzen (Lianen!) sogar in Regenwäldern. Mit zunehmender Trockenheit wird daher die Begrünung von Wänden durch Kletterpflanzen immer schwieriger werden. In Trockengebieten nach Ersatz-Arten zu suchen, ist kaum Erfolg versprechend, da es in Savannen und Trockenwäldern keine Kletterpflanzen gibt, die hochwüchsig genug sind, um zur Begrünung mehrstöckiger Häuser auszureichen.

### Holzige Bodendecker

Der häufigste einheimische Bodendecker, das Efeu (*Hedera helix*), ist eine Kletterpflanze, die aber, aufgrund der oben erwähnten Gründe, an Trockenstandorten nicht klettert, sondern auf dem Boden wächst. Es ist daher zu erwarten, dass die Art auch weiterhin zumindest an halbschattigen Standorten zur Bodenbedeckung eingesetzt werden kann. Die seit einigen Jahrzehnten gepflanzten nicht einheimischen Bodendecker aus der Gattung *Cotoneaster* (s. z. B. Asmus 1989) besitzen kleine, skleromorphe Blätter und sind dementsprechend wahrscheinlich an den bevorstehenden Klimawandel angepasst.

### Krautige Zierpflanzen

In Gärten und Parkanlagen sind bereits viele Arten aus wärmeren Gebieten bzw. von Trockenstandorten vorhanden, z. B. fast alle Arten der Steingärten (*Arabis caucasica*, *Aubretia deltoidea*, *Aurinia saxatilis*, *Campanula caucasica*, *C. garganica*, *C. por-*

*tenschlagiana*, *C. poscharskiana*, *Hylotelephium* div. spec., *Sedum* div. spec.). Gut angepasst sollten Tulpen und andere ursprüngliche Arten der Steppen, (sub)mediterranen Trockenrasen und wärmeliebenden Säume (*Campanula glomerata*, *C. persicifolia*, *Geranium sanguineum*) sein. Auch extreme Frühjahrsgeophyten (*Crocus*, *Muscari*, *Narcissus*, *Scilla*), sind wohl nicht gefährdet.

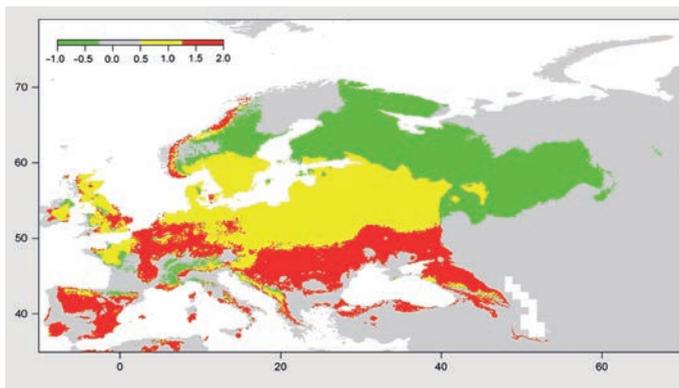
Ursprünglich in Wäldern beheimatete Arten, die teils seit alters her zum Sortiment der Gartenpflanzen gehören, wie der Gewöhnliche Wurmfarne (*Dryopteris filix-mas*) und die Akelei (*Aquilegia vulgaris*), oder neuerdings häufiger gepflanzt werden, z. B. Lungenkraut (*Pulmonaria officinalis*), Wald-Vergissmeinnicht (*Myosotis sylvatica*) und die gefleckte Variation der Goldnessel (*Lamium montanum* var. *floribundum*) werden dagegen bei steigender sommerlicher Trockenheit nur an schattigen Stellen und mit zusätzlicher starker Bewässerung in Gärten haltbar sein.

### Arten der Nutz-, Park- und Zierrasen

Die Mehrzahl der momentan für Nutz-, Park- und Zierrasen bedeutsamen einheimischen Gras-Arten gedeiht am besten im atlantischen Klima d. h. bei relativ kühlen, regenreichen Sommern. Bei Sommertrockenheit wird sich in Deutschland die Habitateignung für die beiden wichtigsten Rasen-Arten, das Deutsche Weidelgras (*Lolium perenne*; Abb. 11.7) und den Rot-Schwingel (*Festuca rubra*) verschlechtern

#### 11.3.1.2 Spontane Flora

Aufgrund des trockenwarmen Stadtklimas (s. Abs. 11.2) enthält die Stadtflora bereits gegenwärtig re-



**Abb. 11.7:** Effekt des Klimawandels auf die in Deutschland wichtige einheimische Grasart von Scherrasen, das Deutsche Weidelgras (*Lolium perenne*). Rot: deutliche Abnahme der Habitateignung, Grün: deutliche Zunahme der Habitateignung, Gelb: keine deutliche Veränderung. Grau: Art kommt natürlicherweise nicht vor. Weiteres: s. Abb. 11.4

lativ viele angepasste Arten. Hierzu gehören insbesondere die in Mitteleuropa z. Z. fast ausschließlich im urbanen Bereich vorkommenden, so genannten urbanophilen Arten (Wittig et al. 1985). Diese momentan auf stark urbane Bereiche beschränkten Spezies, zu denen Götterbaum (*Ailanthus altissima*), Sommerflieder (*Buddleja davidii*) und viele der nachfolgend genannten Arten zählen, werden sich nicht nur im Stadtbereich stärker ausbreiten, sondern, wie bereits zu beobachten (Wittig 2008), auch in den dörflichen Bereich und sogar ins Umland eindringen. Insbesondere ist eine Zunahme zu erwarten von Arten, die:

- ▶ aufgrund ihres Bauplanes an Trockenheit angepasst (skleromorph) sind, wie man sie bereits heute auf großen Industrie- und Bahnbrachen der Großstädte antrifft, z. B. Ruthenisches Salzkraut (*Salsola ruthenica*), Sand-Wegerich (*Plantago arenaria*), Knorpellattich (*Chondrilla juncea*) und Wanzensame (*Corispermum spec.*);
- ▶ die Kohlenstoff-Fixierung im Rahmen der Photosynthese auf dem, im Vergleich zum bei mitteleuropäischen Arten fast ausschließlich anzu-treffenden C<sub>3</sub>-Weg, deutlich wassersparenden C<sub>4</sub>-Weg durchführen; Beispiele für C<sub>4</sub>-Pflanzen sind die bereits momentan stark in Ausbreitung befindlichen Vertreter der Gattungen Amaranth (*Amaranthus*) und Hirse (*Setaria*);
- ▶ die sommerliche Trockenheit vermeiden, was auf zwei Wegen möglich ist:
  - ▶ Frühjahrs-Therophyten, wie Hungerblümchen (*Draba verna*), Schmalwand (*Arabidopsis thaliana*) und Dreifinger-Steinbrech (*Saxifraga tridactylites*), nutzen den noch feuchten Frühling für ihre gesamte Entwicklung (Keimung, Wachsen, Blühen, Fruchtreife) und überdauern das restliche Jahr als Samen. Auf städtischen Trockenstandorten, z. B. brachliegendem Bahngelände, sind solche Arten bereits heute sehr häufig (Wittig & Lienenbecker 2003);
  - ▶ Frühjahrs-Geophyten sind zwar mehrjährig, aber nur im Frühjahr auffindbar. Den Rest des Jahres verbringen sie als Zwiebel, Knolle oder Rhizom im Boden; ein Beispiel ist die sich im Siedlungsbereich momentan stark ausbreitende Armenische Träubelhyanthe (*Muscari armeniacum*) (s. Wittig 2008).
- ▶ breitblättrige immergrüne (laurophyll) Blätter besitzen, z. B. Mahonia (*Mahonia aquifolium*) und Lorbeer-Kirsche (*Prunus laurocerasus*).

Neben einigen bereits oben genannten Beispielen werden in Gärten traditionell Arten aus wärmeren Gebieten kultiviert. „Jumping the garden fence“ (Groves et al. 2005) könnte zu einer schnellen Ausbreitung dieser Arten führen, vorausgesetzt, sie sind an die übrigen städtischen Bedingungen angepasst. Sukkulente, z. B. Vertreter der Gattung *Sedum*, werden wohl nicht merklich zunehmen, da sie zu störungsempfindlich sind.

### 11.3.2 Vegetation

Flächendeckend mit Vegetation bestandene Bereiche haben aus klimatischer Sicht große Bedeutung: In Meyerside (U.K.) wurden für einen Stadtteil mit hohem Grünflächenanteil (>30 %) um 7° C niedrigere Maximaltemperaturen errechnet als für einen mit sehr niedrigem (<10 %) Anteil (Whitford et al. 2001). Hierbei kommt es v. a. auf die Schattwirkung und die Verdunstungsrate an. Beides ist bei hochwüchsigen, reich strukturierten Vegetationstypen mit großer Blattflächensumme stärker ausgeprägt als bei niedrigwüchsiger, kleinblättriger Vegetation.

#### 11.3.2.1 Gärtnerisches Stadtgrün

Stadtwälder, naturnahe Parkanlagen, Alleen Stadtwälder, naturnahe Parkanlagen, und Alleen, also von Bäumen dominierte Vegetationstypen, haben die stärkste Klimawirkung und sind oft auch von großer Bedeutung für die Biodiversität. In Städten ist es hierbei weniger die pflanzliche Vielfalt, sondern die Funktion derartiger Lebensräume als Habitat einer artenreichen Fauna (Vögel, Fledermäuse, holzbewohnende Insekten, streuabbauende Arten), die ihren Wert für die Erhaltung der Biodiversität von Städten bestimmt.

#### Hecken und Strauchgruppen

In städtischen Hecken und Zierstrauchpflanzungen werden teilweise schon seit langem, vermehrt aber in neuerer Zeit, Arten aus wärmeren und trockeneren Regionen angepflanzt (s. o.). Die Probleme werden daher geringer sein als bei den baumdominierten städtischen Vegetationstypen. Sogar die beiden häufig für Hecken genutzten einheimischen Baumarten Hainbuche (*Carpinus betulus*) und Eibe (*Taxus baccata*; s. o.) kommen etwas besser mit

Wärme und Trockenheit zurecht als viele andere unserer Waldarten.

### Rasenflächen

Rasenflächen tragen zur Kühlung bei (mitigation), müssen aber auch jetzt schon bewässert werden. Darüber hinaus emittieren sie das starke Treibhausgas  $N_2O$ . Nach Bijoor et al. (2008), die kalifornische Rasen untersuchten, steigen diese Emissionen mit der Temperatur sowie mit der Bewässerung (die bei Temperaturerhöhung natürlich auch höher sein muss). Die gleichen Autoren fanden eine Zunahme von C4-Gräsern (die als „weeds“ angesehen werden) auf Kosten der C3-Arten.

### Dachbegrünung

Dächer stellen bereits heute bezüglich Hitze und Trockenheit einen Extremstandort dar. Die Mehrzahl der zur Dachbegrünung verwendeten Arten wird daher auch in Zukunft weiter Verwendung finden können.

#### 11.3.2.2 Spontane Vegetation

Genau wie die Flora, so ist auch die Vegetation einer Stadt in der Regel ein Gemisch aus Resten des naturnahen Zustands, der ländlichen Kulturlandschaft sowie typisch urbaner Bestandteile. Im Hinblick auf die beiden ersten Bestandteile verweisen wir auf die Abschnitte 8 und 9. Im Folgenden beschäftigen wir uns ausschließlich mit der stadttypischen (urbanen) spontanen Vegetation.

Großflächige Bestände spontaner urbaner Vegetation findet man auf Industrie- und Verkehrsbrachen. Das meist mehr oder weniger steinige Substrat (Extremfall: Schotter, Bauschutt, Bergematerial) bewirkt einen sommerlich sehr trockenen und heißen Standort. Die dort wachsenden Vegetationstypen werden an häufig gestörten Stellen von steppenartigen Rasen (Verband *Salsolion ruthenicae*), oder an weniger häufig gestörten Standorten von ruderalen Halbtrockenrasen (*Convolvulo-Agropyron repentis*) und ausdauernden Hochstaudenfluren (*Dauco-Melilotion* und *Onopordion*) gebildet. Bleibt nach dem Brachfallen der Fläche eine Störung über lange Zeit hinweg aus, entstehen auch auf diesen Extremstandorten Gebüsch und Wälder. Diese ähneln aber nicht den einheimischen Pionier- und Schlusswäldern, sondern werden in der Regel von an Wärme und Trockenheit

angepassten Neophyten dominiert (z. B. *Buddleja davidii*-Gebüsch, *Ailanthus altissima*-Gebüsch und -Wälder, *Robinia pseudacacia*-Wälder). Nicht völlig identische, aber doch recht ähnliche Vegetationstypen finden sich heute auf analogen Standorten in Städten des Mittelmeerraums. Bei einer Zunahme von Wärme und Trockenheit im Sommer sowie von Niederschlägen im Winter, also einer Annäherung unseres Klimas an das mediterrane Klima, ist dementsprechend mit keiner einschneidenden Veränderung der spontanen Vegetation zu rechnen. Allerdings werden die bisher auf die beschriebenen Extremstandorte beschränkten Vegetationstypen dann auch auf eher mittleren Standorten des Stadtgebietes Fuß fassen können. Bedenkt man, dass die „gebaute“ Vegetation mit fortschreitendem Klimawandel immer mehr Probleme bereiten wird (zusätzliche Bewässerung erforderlich), so könnte der spontanen Vegetation für eine kostengünstige, klimaangepasste Begrünung städtischer Freiflächen in Zukunft große Bedeutung zukommen.

#### 11.4 Städte als Modellfall der Reaktion auf Klimawandel

Da Städte wärmer und trockener als ihre Umgebung sind, könnte man auf die Idee kommen, deren heutigen Zustand als Modellfall für die Reaktion von Fauna, Flora und Vegetation der Umgebung auf den Klimawandel anzusehen. Tatsächlich stimmen folgende Phänomene mit denen des Klimawandels überein:

- ▶ Wärme und Trockenheit,
- ▶ verlängerte Vegetationsperiode,
- ▶ Änderung der Phänologie.

Jedoch gibt es auch deutliche Unterschiede:

- ▶ veränderte Böden,
- ▶ starke mechanische Störungen,
- ▶ Streusalzeinsatz,
- ▶ Immission,
- ▶ Gärten und Anlagen als permanente Diasporenquelle.

Wie die weltweite Homogenisierung der städtischen Flora und Vegetation zeigt, sind die letztgenannten Punkte, die allesamt auf die direkten Einwirkungen des Menschen in der Stadt zurückzu-

führen sind, momentan deutlich wichtiger als das Klima: Landnutzung, Unkrautbekämpfung, Anpflanzung von Arten und ganzen Vegetationseinheiten, Intensität der Eingriffe sowie das durch den Menschen bestimmte Substrat spielen eine äußerst wichtige Rolle. Das Muster der Pflanzenverbreitung in der Stadt spiegelt mehr die Bau- und Wirtschaftsstrukturen (Kunick 1982) und die sozialen Verhältnisse (Hard & Otto 1985) wider als die klimatischen. Natürlich gibt es immer noch große Unterschiede zwischen der Vegetation einer tropischen Stadt und der einer gemäßigten Zone. Innerhalb der Unterbereiche dieser großen Klimazonen, z. B. zwischen Städten des atlantischen, kontinentalen und submediterranen Bereichs Mitteleuropas, deren natürliche Vegetation sich deutlich voneinander unterscheidet, sind die Unterschiede in der urbanen Flora und Vegetation jedoch äußerst gering geworden (z. B. Wittig & Becker 2010). Eine Übertragung der Unterschiede zwischen Stadt und Umland auf diejenigen zwischen den heutigen Realitätsverhältnissen und denen etwa in 50 Jahren, ist daher nicht möglich.

## 11.5 Maßnahmen

Zahlreiche den Klimawandel eindämmenden Maßnahmen sind auch geeignet, die Gefährdung der Biodiversität zu verringern. Einige dieser Maßnahmen sind allgemeiner Natur (11.5.1), andere stützen sich auf die Vegetation (und damit auf die Biodiversität: 11.5.2), wobei bestimmte Voraussetzungen zu beachten sind (11.5.3).

### 11.5.1 Allgemeine stadtbezogene Maßnahmen gegen den Klimawandel

Mit geeigneten Maßnahmen der Objekt- und Stadtplanung sollte der in den Städten bevorzugt auftretenden Überwärmung begegnet werden. Dabei ist zu beachten, dass der durch den Klimawandel erwartete thermische Stress im Wesentlichen auf die Sommermonate beschränkt ist. Das heißt, Maßnahmen, die während des Sommers einer Wärmebelastung entgegenwirken, sollten sich im Winter bei kurzem Tagbogen der Sonne nicht als nachteilig hinsichtlich der Wärmegegewinnung in Gebäuden auswirken. Nachfolgend werden verschiedene Möglichkeiten genannt, mit deren Hilfe das Stadtklima

verbessert und die CO<sub>2</sub>-Emissionen verringert werden können (in Anlehnung an Kuttler 2010a).

- ▶ Zu den wichtigsten Maßnahmen zählt, das menschliche Verhalten hinsichtlich des Energieverbrauchs zu beeinflussen. Allein durch sparsameren Umgang mit Energie ließe sich ein Großteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen vermeiden. Passivhäuser würden zum Beispiel den spezifischen Wärmeenergieverbrauch im Vergleich zu derzeitigen herkömmlichen Bauweisen auf etwa ein Zehntel senken; Plus-Energie-Häuser sogar eine positive Energiebilanz aufweisen, da sie durch Photovoltaikanlagen und Wärmepumpen mehr Energie produzieren als sie verbrauchen (Hegger 2009).
- ▶ Der nach wie vor hohe Anteil an versiegelten Flächen in Städten sollte verringert werden und Platz schaffen für unversiegelte verdunstungsaktive Flächen, die den latenten Wärmestrom ( $Q_E$ ) erhöhen (s. oben). Die Verdunstung kann über verschiedene Umweltmedien erfolgen: So von Wasserflächen oder natürlichem Boden sowie über die Transpiration der Pflanzen. Sichergestellt sein müsste in diesem Zusammenhang, dass die Böden ausreichend mit Wasser versorgt sind und die Oberflächen niedrige Abflussbeiwerte (Verhältniswert von Abflussmenge zur Niederschlagssumme) aufweisen, um Versickerung von Niederschlagswasser in den Untergrund zu ermöglichen.
- ▶ Direkte Maßnahmen, die Oberflächenenergiebilanzen im Sinne einer geringeren Aufheizung im Sommer zu beeinflussen, sollten darin bestehen, helle, reflektierende Materialien zu verwenden. Dies führt nicht nur über die Absenkung der Oberflächentemperaturen zu einer Reduzierung der langwelligen Wärmestrahlung, sondern auch zu einer Verringerung der Lufterwärmung durch eine kleinere turbulente sensible Wärmestromdichte. Dunkle Oberflächen, zum Beispiel Asphaltstraßen und Teerdächer, die sich bei starker Einstrahlung durchaus auf bis zu 80 °C erhitzen können, geben dabei etwa 880 W/m<sup>2</sup> an langwelliger Strahlungsenergie ab. Durch geeignete Aufhellung dieser Oberflächen könnte zum Beispiel die Temperatur auf vielleicht 50 °C gesenkt werden, wodurch mehr als 250 W/m<sup>2</sup> weniger an langwelliger Strahlung emittiert würde.
- ▶ Grundsätzlich ist der Anteil der Durchgrünung in den Städten zu erhöhen, um die Oberflächen- und Lufttemperaturen zu senken (Näheres s.

**11.5.2 und 11.5.3).** Damit die positive Wirkung von urbanen Grünflächen nicht nur auf das jeweilige lokale Umfeld begrenzt bleibt, sollte eine innerstädtische Freiraumvernetzung angestrebt werden, die im Idealfall über Ventilationsbahnen an rurale Kaltluftproduktionsflächen angebunden ist.

### 11.5.2 Maßnahmen zur Förderung der städtischen Vegetation

Folgende mit der städtischen Biodiversität zusammenhängende Maßnahmen können dazu beitragen, die negativen Auswirkungen der Klimaveränderungen (Hitze- und Trockenstress) abzumildern. Mehrere dieser Maßnahmen sind gleichzeitig dazu geeignet, Energie zu sparen und damit den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu verringern oder aber ausgestoßenes CO<sub>2</sub> zu binden. Außerdem tragen diese Maßnahmen zum Erhalt oder sogar zur Förderung der städtischen Biodiversität bei:

► **Erhöhung des Anteils an geschlossenen Baumbeständen im Siedlungsbereich.**

Ein Mindestanteil an Waldfläche innerhalb der bebauten Fläche sollte gesetzlich festgelegt werden. Dabei dürfen die auf dem Gebiet einer Stadt außerhalb des besiedelten Bereichs vorhandenen Waldflächen keine Rolle für diese Festsetzung spielen.

► **Erhöhung des Anteils der Straßenbäume und der Bäume auf öffentlichen Plätzen.**

Bei jeder Neuanlage einer Straße sollte eine flächendeckende Baumbepflanzung verpflichtend sein. Dazu sollten hochwachsende, großkronige, schattenspendende Laubbäume verwendet werden, die im Sommer den gewünschten Strahlungsschutz gewährleisten, im Winter hingegen, bei fehlender Belaubung, die Sonnenstrahlung weitgehend durchlassen. Allerdings dürfen Straßenbäume über der Straßenmitte keinen gemeinsamen Kronenschluss aufweisen, da ein derartiger „Tunneleffekt“ die Belüftung behindern und so zu einer Anreicherung der Kfz-Emissionen führen kann. Ebenfalls mit Bäumen bepflanzt werden sollten öffentliche Plätze (Marktplätze, Parkplätze; – Ziel: mindestens 50 % Bedeckung durch Bäume).

► **Erhöhung des Baumbestandes auf Privatgrundstücken**

Auch hier ist über Möglichkeiten nachzudenken, wie ein Mindestprozentsatz der Fläche durch Bäume abgeschattet werden kann (gesetzliche Verpflichtung der Besitzer oder finanzieller Anreiz).

► **Gestaltung der Grünflächen / mehr Raum für spontane Vegetation**

Bei der erforderlichen Anlage zusätzlicher sowie bei der Anpassung vorhandener Grünflächen an den Klimawandel ist stark bewässerungsbedürftige Vegetation durch trockenheitsangepasste zu ersetzen. Insbesondere ist daran zu denken, spontaner Vegetation mehr Raum in öffentlichen Grünflächen zu geben, denn diese ist sowohl nutzungs-, als auch klimaangepasst.

Größere ebenerdige Grünflächen in Städten sollten nach dem Savannenprinzip (Baumwiese) gestaltet werden: Auf Freiflächen sollten nur vereinzelt großkronige Bäume wachsen, die tagsüber für eine ausreichende Beschattung sorgen, nachts hingegen die langwellige Wärmestrahlung des Bodens nicht so stark behindern, dass keine Abkühlung mehr möglich ist. Ferner sollte sich urbane Grünplanung dadurch auszeichnen, dass neben der Verwendung von Laubbäumen auch immergrüne Vegetation angepflanzt wird. Denn letztere bindet ganzjährig mehr Feinstaub als Laubbäume.

► **Förderung der Fassaden- und Dachbegrünung.**

Bei öffentlichen Gebäuden sollte eine allgemeine Verpflichtung zu Fassaden- und Dachbegrünung erfolgen. Private Neubauten mit Flachdächern sollten nur mit Dachbegrünung genehmigt werden. Wie bereits in einigen Gemeinden üblich, könnte ein Anreiz zur Dachbegrünung bzw. ein Ausgleich für die Kosten der verpflichtenden Dachbegrünung durch Nachlässe bei der Abwasserabgabe erfolgen.

Fassaden- und Dachbegrünungen entfalten in erster Linie eine Objekt bezogene Wirkung und beanspruchen in der Regel wenig Platz, sodass diese auch in dicht bebauten Innenstadtbereichen eingesetzt werden können. Die Begrünung sollte möglichst aus immergrüner trockenadaptierter Vegetation bestehen. Dadurch wird das entsprechende Gebäude im Sommer gekühlt und im Winter gegen Wärmeabfluss nach außen isoliert. Der Gegenüberstellung der Energiebilanzen eines begrünten und eines mit Kies bedeckten Daches erfolgt exemplarisch in [Tab. 11.3](#).

**Tab. 11.3:** Vereinfachte Energiebilanzen für ein bewässertes begrüntes Dach und ein Kiesdach während eines Sommertages. Höschele & Schmidt 1974; verändert nach Kuttler 2010a.<sup>1</sup>

| Begrüntes Dach                | Kiesdach                      |
|-------------------------------|-------------------------------|
| ▶ 9 % Lufterwärmung           | ▶ 50 % Lufterwärmung          |
| ▶ 79 % Verdunstung            | ▶ 0 % Verdunstung             |
| ▶ 11 % Bodenwärmestrom        | ▶ 50 % Bodenwärmestrom        |
| ▶ Untergrundtemperatur: 30 °C | ▶ Untergrundtemperatur: 40 °C |

<sup>1</sup> Strahlungsbilanzen ( $Q^*$ ):  $Q^*_{\text{Kies}}$ : 740 W/m<sup>2</sup>,  $Q^*_{\text{Grün}}$ : 420 W/m<sup>2</sup>; Max. Einstrahlung (Sommer, wolkenlos, Mittagszeit); baugleiche Dächer; Fläche: jeweils 1000 m<sup>2</sup> Kiesdach; 1200 m<sup>2</sup> Gründach (Bewuchs: *Cotoneaster dammeri radicans*, *Amelanchier canadensis*, *Malus sargentii*, *Potentilla fruticosa* „Longacre“, *Pyracantha coccinea* „Bad Zwischenahn“, Polyantharosen)

Für den in Tab. 11.3 dargestellten strahlungsreichen Sommertag zeigt sich, dass im Falle des mit Wasser versorgten „Gründaches“ der größte Teil, nämlich fast 4/5 der Energie, über die Evapotranspiration (Verdunstung feuchten Bodens und Transpiration der Pflanzen) abgegeben wird. Das bedeutet, dass die Energie für den latenten Wärmestrom aufgewendet wird und deshalb die Luft nicht erwärmt. Die Verdunstungsenergie wird dabei im Wesentlichen aus dem verdunstenden Medium, mithin aus der Dachbegrünung, entnommen, wodurch sich diese abkühlt. Nur 11 % der Energie werden dabei in den Untergrund geleitet, wodurch das Dach des Gebäudes eine Temperatur von etwa 30 °C annimmt. Ganz anders verhält sich das mit Kies bedeckte, trockene Dach hinsichtlich seiner Energiebilanz. Hier wird – in Ermangelung der Energieabfuhr durch Evapotranspiration – zu gleichen Teilen die Luft und das Dach des Gebäudes erwärmt. Dadurch steigt die Gebäudedeckentemperatur um 10 K auf 40 °C an, wodurch im Vergleich zum „Gründach“ (30 °C) etwa 70 W/m<sup>2</sup> mehr an Wärme in das mit Kies bedeckte Dach des Gebäudes fließt. Sollen begrünte Dächer und Fassaden neben den unbestreitbaren mikroklimatischen Vorteilen (auf die ebenfalls günstige Wasserbilanz und das Staubsammelpotenzial wurde hier nicht eingegangen) auch auf Stadtquartiersebene klimaverbessernde Wirkungen haben, dann sollten möglichst viele, insbesondere niedrige Häuser Fassaden- und Dachbegrünungen aufweisen. Bei den städtebaulich flächenintensiven Minderungs-

maßnahmen wie Oberflächenentsiegelungen, Frei- und Grünraumplanung und der Erhaltung oder Ausweisung von Ventilationsbahnen und Vernetzungskorridoren sind die Handlungsmöglichkeiten begrenzt, da der städtische Baukörper in der Regel historisch gewachsen und somit bereits vorhanden ist. Da im Bereich der bestehenden Bebauung die Erneuerungsrate der Flächennutzung bei nur 1 – 2 Prozent pro Jahr liegt, ist eine weiträumige Durchsetzung dieser Maßnahmen auch langfristig eher unwahrscheinlich. Eine Ausnahme hiervon bilden ehemals industriell geprägte Städte, in denen im Zuge des Strukturwandels alte, große Industrieflächen einer neuen Nutzung zugeführt werden können. Auch die bereits einsetzende demografisch bedingte Schrumpfung der Städte (Oswald & Rieniets 2006) ermöglicht es, offen gelassene Wohnquartiere einzureißen und einer neuen, umwelt- und klimagerechten Nutzung zuzuführen.

#### ▶ Ersatz versiegelter durch begrünte Flächen

Ein hoher Anteil der in Städten zurzeit versiegelten Flächen muss nicht notwendigerweise versiegelt sein. Parkplätze können anstatt asphaltiert mit Rasensteinen gepflastert werden. Auf öffentlichen Flächen sollte dies gesetzlich verpflichtend gemacht werden. Auf privaten Flächen ist dies durch Anreize zu erreichen (z. B. über die Abwasserabgabe).

### 11.5.3 Kriterien für die die Auswahl von Pflanzenarten

Bei der Auswahl anzupflanzender Arten sind insbesondere zwei Punkte zu bedenken:

- ▶ Da die Sommer trockener und wärmer werden, im Winter dagegen weiterhin extreme Frostergebnisse auftreten können, ist nicht jede wärmeliebende, trockenheitsresistente Art als zukünftige Stadtpflanze geeignet, sondern nur solche, die gleichzeitig frostresistent sind.
- ▶ Bei der Auswahl anzupflanzender Arten ist zu berücksichtigen, dass während hoher sommerlicher Temperaturen verschiedene Pflanzenarten in starkem Maße biogene Kohlenwasserstoffe (engl. Volatile Organic Compounds, VOCs), welche die Ozonbildung begünstigen, freisetzen können, wozu zum Beispiel das hochreaktive Isopren, aber auch Terpene und Limunen zäh-

| Pflanze – Lateinischer Name        | Populärer Name         | geringes Ozonbildungspotenzial | hohe Trocken-toleranz |
|------------------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| <i>Acer campestre</i>              | Feld-Ahorn             | ++                             | ++                    |
| <i>Acer rubrum</i>                 | Rot-Ahorn              | ++                             | ++                    |
| <i>Carya ovata</i>                 | Schuppenrinden-Hickory | ++                             | +                     |
| <i>Carya tomentosa</i>             | Spottnuss              | ++                             | ++                    |
| <i>Fraxinus pennsylvanica</i>      | Grün-Esche, Rot-Esche  | ++                             | +                     |
| <i>Ginkgo biloba</i>               | Ginkgo, Fächerbaum     | ++                             | ++                    |
| <i>Malus tschonoskii</i>           | Woll-Apfel             | ++                             | +                     |
| <i>Pinus ponderosa</i>             | Gelb-Kiefer            | +                              | ++                    |
| <i>Pinus sylvestris</i>            | Wald-Kiefer            | +                              | ++                    |
| <i>Prunus avium</i>                | Vogel-Kirsche          | ++                             | ++                    |
| <i>Pyrus communis</i>              | Kultur-Birne           | ++                             | +                     |
| <i>Pyrus pyrastra</i>              | Wild-Birne             | ++                             | +                     |
| <i>Quercus rubra</i>               | Rot-Eiche              | +                              | +                     |
| <i>Sophora japonica</i>            | Japanischer Schnurbaum | +                              | ++                    |
| <i>Ulmus parvifolia</i>            | Japanische Ulme        | ++                             | +                     |
| <i>x Cupressocyparis leylandii</i> | Leylandzypresse        | ++                             | +                     |
| <i>Zelkova serrata</i>             | Japanische Zelkove     | ++                             | +                     |

**Tab. 11.4:** Ozonbildungspotenzial (OZBP) und Trockentoleranz ausgewählter Baumarten und ihre Verwendungsempfehlung bei höheren Temperaturen. Kombiniert nach Roloff et al. 2008; Benjamin & Winer 1998; verändert; hier nach Kuttler 2010a.

1) Geringes OZBP: Isoprenemission < 2 µg/(g h)TS; ++ = sehr gut, + = gut, **fett: einheimische Arten**

len (Pacífico et al. 2009; Sharkey et al. 2008). Aus diesem Grund sollten in der städtischen Gehölzvegetation solche Arten gefördert werden, die zu den sogenannten „Low-Emitter-Pflanzen“ zählen (Taha 1996; Benjamin & Winer 1998). Dabei handelt es sich um Pflanzen, deren Isoprenemission unter Hitzestress nicht mehr als 2 µg/(g h) Trockensubstanz aufweist. **Tab. 11.4** enthält ausgewählte Beispiele an Bäumen, die sowohl durch ein geringes Ozonbildungspotenzial charakterisiert werden als auch optimale Toleranzen gegenüber Trockenheit bei eingeschränkter Wasserversorgung aufweisen.

#### 11.5.4 Ausblick

Einerseits werden Flora und Vegetation der Städte, insbesondere auf der nördlichen Erdhalbkugel, durch den projizierten globalen Klimawandel direkt und indirekt betroffen sein. Dabei wird es unter den

verschiedenen Pflanzenarten sowohl Gewinner als auch eine ganze Reihe an Verlierern geben, so dass es zu einer nachhaltigen Veränderung der Artenspektren kommen wird. Andererseits stellt die Vegetation aber auch einen Aktivposten dar. Durch ihre Funktion als CO<sub>2</sub>-Speicher kann sie dazu beitragen, das Ausmaß des Klimawandels zu verringern. Darüber hinaus kann sie seine Auswirkungen mildern, indem sie sowohl die Luft- als auch Oberflächentemperaturen durch Schattenwurf und Evapotranspiration reduziert und auf diese Weise das für die Stadtbewohner häufig belastende Klima verbessert. Die Kenntnis dieser wichtigen Rolle der Vegetation kann helfen, gesundheitliche Schäden von Stadtbewohnern zu vermeiden. Die Kosten für die notwendige Vermehrung und Anpassung des Stadtgrüns können durch die Wahl geeigneter Arten und Vegetationstypen sowie eine stärkere Berücksichtigung der Spontanvegetation reduziert werden.

## Literatur

- Adolph, K. (1995): Neophytische Kultur- und Anbaupflanzen als Kulturflüchtlinge des Rheinlandes. Weil, 271 S., Anh.
- Akbari, H., Konopacki, S. (2004): Energy effects of heat-island reduction strategies in Toronto, Canada. *Energy* 29, 191 – 210.
- Akbari, H., Pomerantz, M., Taha, H. (2001): Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy* 70, 295 – 310.
- Asmus, U. (1989): Spontane Vegetation in Bodendeckerkulturen. *Braun-Blanquetia* 3, 183 – 189.
- Becker/Brasseur: Klimawandel in Deutschland, Kap. 2 in diesem Buch.
- Benjamin, M.T., Winer, A.M. (1998): Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs. *Atmospheric Environment* 32, 53 – 68
- Bönsel, D., Malten, A., Wagner, S., Zizka, G. (2000): Flora, Fauna und Biotoptypen von Haupt- und Güterbahnhof in Frankfurt am Main. *Kleine Senckenberg-Reihe* 38, 63 S., Anh.
- Fisher, P. (2007): Why we need the urban forest. *Urban Magazine*, 2007.
- Dynaklim (2009) - BMBF-Forschungsprojekt "Dynamische Anpassung regionaler Planungs- und Entwicklungsprozesse an die Auswirkungen des Klimawandels am Beispiel der Emscher-Lippe-Region (Nördliches Ruhrgebiet)". Interdisziplinäres Forschungsprojekt im Rahmen des Programms "Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten (KLIMZUG)" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Berlin. 2009 bis 2014. <http://www.dynaklim.de>. (in Bearb.)
- Gill, S.E., Handley, J.F., Ennos, A.R., Pauleit, S. (2007): Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built Environment* 33(1), 115 – 133.
- Groves, R.H., Boden, R., Lonsdale, W.M. (2005): Jumping the garden fence: invasive garden plants in Australia and their environmental and agricultural impact. CSIRO report for WWF-Australia, Sydney.
- Hard, G., Otto, G. (1985): Die vegetationsgeographische Gliederung einer Stadt. Ein Versuch auf der Ebene statistische-administrativer Räumlichkeiten und am Beispiel der Stadt Osnabrück. *Erdkunde* 39, 296-306.
- Hegger, M. (2009): Sonnige Aussichten. Hetzel, I. (2009): Zur spontanen Ausbreitung von Walnuss (*Juglans regia*) und Ess-Kastanie (*Castanea sativa*) in Wäldern und Forsten im mittleren Ruhrgebiet. *Flor. Rundbr.* 43, 24 – 43.
- Höschele, K. & H. Schmidt (1974): Klimatische Wirkung einer Dachbegrünung. *Garten und Landschaft*, H. 6, 334 – 337
- Jacob, D.J., Winner, D.A. (2009): Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment* 43, 51 – 63.
- Killicoat, P., Puzio, E., Stringer, R. (2002): The economic value of trees in urban areas: estimating the benefits of Adelaide's street trees. *Treenet Proceed. of the 3<sup>rd</sup> National Street Tree Symposium: 5<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup> September 2002*, 94 – 106.
- Kühn, I., Brandl, R., Klotz, S. (2004): The flora of German cities is naturally species rich. *Evol. Ecol. Res.* 6, 749 – 764.
- Kunick, W. (1982): Comparison of the flora of some cities of the central european lowlands. In Bornkamm, R., Lee, J.A., Seaward, M.R.D. (Hrsg.): *Urban Ecology*, Oxford, 13 – 22.
- Kunick, W. (1985): Gehölzvegetation im Siedlungsbereich. *Landschaft + Stadt* 17, 120 – 133.
- Kuttler, W. (2009): *Klimatologie*. UTB 3099, Paderborn, München, Wien, Zürich, 260 S.
- Kuttler, W. (2010): *Das Ruhrgebiet im Klimawandel - Bestandsaufnahme und Prognose*. = Essener Uni-kate – Berichte aus Forschung und Lehre, 38, Beiträge zur "Ruhr 2010", 40 – 51.
- Kuttler, W. (2010a): *Urbanes Klima, Teil 1*. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, Umweltmeteorologie*, 70, Nr. 7/8, Juli/August, 329 – 340.
- Kuttler, W. (2010b): *Urbanes Klima, Teil 2*. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, Umweltmeteorologie*, 70, Nr. 9, September, 378 – 382.
- Kuttler, W. (2011a): *Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen; Climate Change in urban Areas, Part 1, Effects*. *Environmental Sciences Europe* (DOI: 10.1186/2190-4715-23-11) 1 – 12.
- Kuttler, W. (2011b): *Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 2, Maßnahmen; Climate change in urban areas, Part 2, Measures*. - In: *Environmental Sciences Europe (ESEU)* (DOI: 10.1186/2190-4715-23-21) 1 – 15.
- Kuttler, W., Straßburger, A. (1999): Air quality measurements in urban green areas. In: *Atmospheric Environment Vol. 33, Nos. 24-25; 4101 – 4108*.
- Lin, C.Y.C., Jacob, D.J., Fiore, A.M. (2001): Trends in exceedances of the ozone air quality standard in the continental United States, 1980-1998. *Atmos. Environ.* 35, 3217-3228
- McKinney, M.L. (2006): Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biol. Conserv.* 127, 247 – 260.
- Moore, G.M. (2009): Urban trees: worth more than they cost. In: *Lawry, D, Gardner, J, Smith, S. (Hrsg.): Proceedings of the Tenth National Street Tree Symposium, 7 – 14. University of Adelaide/Waite Arboretum, Adelaide*.
- Kowarik, I., Böcker, R. (1984): Zur Verbreitung, Vergesellschaftung und Einbürgerung des Götterbaumes (*Ailanthus altissima* [Mill.] Swingle) in Mitteleuropa. *Tuexenia* 4, 9 – 29.
- MUNLV - Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW (Hrsg.) (2010): *Handbuch Stadtklima - Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel (Langfassung)*. Düsseldorf, 268 S.
- Nowack, R. (1987): *Verwilderungen des Blauglockenbaums (Paulownia tomentosa Thunb. Steud.) im Rhein-Neckar-Gebiet*. *Flor. Rundbr.* 21, 23 – 32.
- Nowak, D.J., Crane, D.E. (2002): Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environm. Poll.* 116, 381 – 389.
- Oswald, P., Rieniets, T. (2006): *Atlas of Shrinking Cities*. Ostfildern.
- Pacifico, F., Harrison, S.P., Jones, C.D., Sitch, S. (2009): Isoprene emissions and climate. *Atmospheric Environment* 43, 6121 – 6135
- Ringenberg, J. (1994): *Analyse urbaner Gehölzbestände am Beispiel der*

- Hamburger Wohnbebauung. Dr. Kovac, Hamburg.
- Roloff, A., Bonn, S., Gillner S. (2008): Klimawandel und Baumartenwahl in der Stadt – als Straßenbäume geeignete Arten. *Allg. Forstzeitschrift/Der Wald* 63, 398 – 399
- Sharkey, T.D., Wiberley, A.E., Donohue, A.R. (2008): Isoprene emission from plants: why and how. *Annals of Botany* 101, 5 – 18
- Rowntree, R.A., Nowak, D.J. (1991): Quantifying the role of urban forests in removing atmospheric carbon dioxide. *J. American Arboriculture* 17 (10), 269 – 275.
- Simpson, J.R. (2002): Improved estimates of tree-shade effects on residential energy use. *Energy Buildings* 34, 1067 – 1076.
- Solecki, W.D., Rosenzweig, C., Pope, G., Chopping, M., Goldberg, R., Polissar, A. (2004): Urban heat island and climate change: an assessment of interacting and possible adaptations in the Camden, New Jersey region. In: State of New Jersey (Hrsg.): *Environmental Assessment and Risk Analysis Element – Research Project Summary*, Trenton, 1 – 4.
- Sukopp, H., Wurzel, A. (2000): Changing climate and the effects on vegetation in Central European cities. *Arboricult. J.* 24, 257 – 281.
- Taha, H. (1996): Modeling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin. *Atmospheric Environment*, 30, 20, 3423 – 3430.
- Wessolek, G. (2001): Bodenüberformung und -versiegelung. *Handbuch der Bodenkunde*, 11. Erg. Lfg. 04/01, 1 – 29
- UNCED (United Nations Conference on Environment and Development) (1992): Übereinkommen über die biologische Vielfalt.
- Whitford, V., Handley, J., Ennos, R. (2001): City form an natural process – indicators for the ecological performance of urban areas. *Landscape Urban Planning* 57, 91 – 103.
- Wittig, R. (1993): Die Vegetation städtischer Brachflächen. *Geobot. Kolloq.* 9, 25 – 30
- Wittig, R. (2002): *Siedlungsvegetation*. Stuttgart, 252 S.
- Wittig, R. (2008): Gartenflüchtlinge als neue Mitglieder der Dorfflora in Nordrhein-Westfalen.- Braunschweig. *Geobot. Arb.* 9, 481 – 490.
- Wittig, R., Becker, U. (2010): The spontaneous flora around street trees in cities. A striking example for the worldwide homogenization of the flora of urban habitats. *Flora* 205, 704 – 709.
- Wittig, R., Wittig, M. (2009): Trittgemeinschaften der nordrhein-westfälischen Dörfer. *Tuexenia* 29, 215 – 235.
- Wittig, R., Lienenbecker, H. (2003): Sandtrockenrasen auf Bahnhöfen in Ostwestfalen. *Ber. Naturwiss. Ver. Bielefeld Umgegend* 43, 259 – 284.
- Wittig, R., Diesing, D., Göttsche, M. (1985): Urbanophob – Urbanoneutral – Urbanophil. Das Verhalten der Arten gegenüber dem Lebensraum Stadt. *Flora* 177, 265 – 282.
- Wittig, R., Uebeler, M., Ehmke, W. (Hrsg.) (2008): *Die Flora des Hohen Taunus*. *Geobot. Kolloq.* 21, 88 S.