

Multifunktionale grün-blaue Infrastruktur für gesunde Städte im Klimawandel

Stephan Pauleit

Zusammenfassung

Städte und städtische Lebensweisen sind nicht nur eine Hauptursache des Klimawandels, sondern sie werden etwa durch die zunehmende Hitze, Starkregen und Flussüberschwemmungen auch stark bedroht. Grünflächen können helfen, die Herausforderungen des Klimawandels zu bewältigen. Dazu sollen grüne Netzwerke mit vielfältigen ökologischen und sozialen Nutzen als grüne Infrastruktur entwickelt werden. Für die Stadtentwicklung wird eine Transformation der Freiräume wie Straßen und Plätze erforderlich, um dieses Ziel in den dicht bebauten Innenstädten zu erreichen. Bäume spielen dabei eine zentrale Rolle, denn sie bieten Schatten und kühlen durch Verdunstung. Besonders alte Bäume sind kaum zu ersetzen und verdienen daher besonderen Schutz. Gleichzeitig werden wachsende Städte jedoch immer dichter bebaut und gefährden das Grün und seine Rolle für die Klimawandelanpassung. Das Projekt »Grüne Stadt der Zukunft« zeigt, dass eine integrative Planung mit umfassender Bürgerbeteiligung erforderlich ist, um eine leistungsfähige grüne Infrastruktur auch in sich verdichtenden Stadtquartieren zu entwickeln und Raumkonflikte mit anderen Belangen wie dem Straßenverkehr zu lösen. Die grüne Infrastruktur ist dazu frühzeitig, umfassend und über alle Planungsphasen und -ebenen hinweg als ein hoch zu priorisierendes Ziel zu berücksichtigen.

Summary

Multifunctional green-blue infrastructure for healthy cities in a changing climate

Cities and urban lifestyles are not only a major cause of climate change, but are also strongly threatened by increasing heat, heavy rainfall and river flooding. Green spaces can help to overcome the challenges of climate change. To this end, green networks with diverse ecological and social benefits are to be developed as green infrastructure. Urban development will require a transformation of open spaces such as streets and squares in order to achieve this goal in densely built-up city centres. Trees play a central role here, as they provide shade and cool through evapotranspiration. Old trees in particular are almost impossible to replace and therefore deserve special protection. At the same time, however, growing cities are becoming ever more densely built-up, jeopardising green spaces and their role in climate change adaptation. The 'Green City of the Future' project shows that integrative planning with comprehensive public participation is required in order to develop an efficient green infrastructure, even in densely built-up urban neighbourhoods, and to resolve spatial conflicts with other concerns such as road traffic. Green infrastructure must be considered at an early stage, comprehensively and across all planning phases and levels as a high-priority objective.

Der Beitrag basiert auf einem vom Autor überarbeiteten Transkript seines Vortrags vom 9. April 2024 in der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

✉ Prof. Dr. Stephan Pauleit, TU München, Strategie und Management der Landschaftsentwicklung, Emil-Ramann-Straße 6, 85354 Freising; pauleit@wzw.tum.de

Einführung

Städte sind eine Schlüsselaufgabe für die Planung und für alle, die damit beschäftigt sind, Städte zu entwickeln, inklusive der Menschen, die in ihnen leben. Sie sind auch ein Schlüssel für ein nachhaltigeres Leben auf der Erde, da sie viel Energie und andere Ressourcen verbrauchen. Gleichzeitig werden Städte immer mehr vom Klimawandel betroffen und sind auch anfälliger gegenüber anderen Naturgefahren. Im 5. Sachstandsbericht des IPCC heißt es daher »Die Anpassung an den Klimawandel hängt in erster Linie davon ab, was in den städtischen Zentren getan wird« (Revi et al. 2014, S. 541). Acht Jahre später bestätigt der 6. Sachstandsbericht nicht nur diese Aussage, sondern stellt auch fest, dass die Klimaanpassungsmaßnahmen in Städten, trotz guter Beispiele, hinter den Klimaschutzbemühungen zurückbleiben (Dodman et al. 2022). Die Autoren und Autorinnen sprechen von einer »Anpassungslücke«, die nicht nur allgemein zu beobachten ist, sondern insbesondere die armen Bevölkerungsschichten in allen Regionen der Erde betrifft.

Die Dringlichkeit von städtischer Klimawandelanpassung wird nicht nur durch Nachrichten über Naturkatastrophen erkennbar, die etwa ganze Städte nach tropischen Wirbelstürmen unter Wasser setzen oder durch extreme Hitzewellen zu besonders hohen Mortalitätsraten unter der Stadtbevölkerung führen (z.B. Gabriel & Endlicher 2011, de Schrijver et al. 2023), sondern auch durch die stetige Steigerung des Hitzestresses. In München etwa könnten sich bis 2100 die Sommertage ($> 25^{\circ}\text{C}$) verdoppeln (Mühlbacher et al. 2020) und die Jahresdurchschnittstemperaturen könnten so hoch sein wie in Rom oder Neapel heute (Rötzer et al. 2023). Weltweit könnten die Städte nördlicherer Breitengrade schon in einem mittleren Klimawandelszenario im Durchschnitt eine Jahrestemperatur wie Städte 1000 km südlicher haben (Bastin et al. 2019). Gleichzeitig stehen wir vor der Herausforderung, dass Städte sich ständig verändern. Zurzeit wachsen viele Städte stark, nicht nur nach außen, sondern auch nach innen, d.h., sie verdichten sich. Für München wird für den Zeitraum 2023–2040 ein Bevölkerungswachstum um 14 % prognostiziert (Kürbis 2023). Immer mehr Gebäude und versiegelte Flächen beanspruchen den schon intensiv genutzten Raum zu Lasten der Vegetation. In

München (Stadt) etwa wurden zwischen 2000 und 2015 insgesamt 777 ha Fläche versiegelt, das sind immerhin 2,5 % des Stadtgebiets (LfU 2017). Durch die zunehmende Bebauungsdichte und Flächenversiegelung heizen sich die Städte immer mehr auf. Regenwasser kann nicht mehr verdunsten und versickern, sondern läuft in die Kanalisation ab, die bei immer kräftigeren Starkregen zunehmend überlastet wird. Zu der Frage, wie sich mehr Grün als mögliche Lösung für einige dieser Herausforderungen mit der zunehmenden Verdichtung in Einklang bringen lässt, werden u.a. in dem Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung an der TU München (ZSK; www.zsk.tum.de) seit 2013 Projekte durchgeführt, im Wesentlichen finanziert vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz. Auch das Graduiertenkolleg Urbane Grüne Infrastruktur, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, beschäftigt sich seit 2022 mit diesem Thema.

Potenzial Stadtnatur

Auch wenn Städte meist als dicht bebaut und hochversiegelt betrachtet werden, können sie gleichzeitig sehr grün sein. Im Durchschnitt weist eine Stadt wie München einschließlich der landwirtschaftlich genutzten Flächen am Stadtrand etwa 60 % vegetationsbedeckter oder zeitweilig vegetationsbedeckter Flächen auf (Leichtle et al. 2022). Die Fernerkundung kann inzwischen sehr genaue Informationen über das Grün in der Stadt liefern, von Rasenflächen bis zu großen Bäumen. Wenn wir von Strategien für die Klimawandelanpassung oder auch von Biodiversität in der Stadt sprechen, muss die gesamte Vegetation einbezogen werden. So sind Parks, Wälder und Stadtplätze sehr wichtig, weil sie öffentlich zugänglich sind, aber es geht wesentlich auch um das private Grün in der Stadt, bis hin zu kleinen Gärten. Sie nehmen große Anteile des Stadtgrüns ein (Loram et al. 2007) und können daher auch ganz wesentlich zur Dämpfung der städtischen Wärmeinseln beitragen, wie verschiedene Fallstudien zeigen (Humaida et al. 2023, Leppänen et al. 2024).

Die Verteilung des Grüns in einer Stadt bildet sich auch in den kleinklimatischen Verhältnissen ab und in dem, wie wir als Menschen dieses Kleinklima erleben. Im Rahmen einer Studie haben wir in Würzburg an sieben Punkten mit

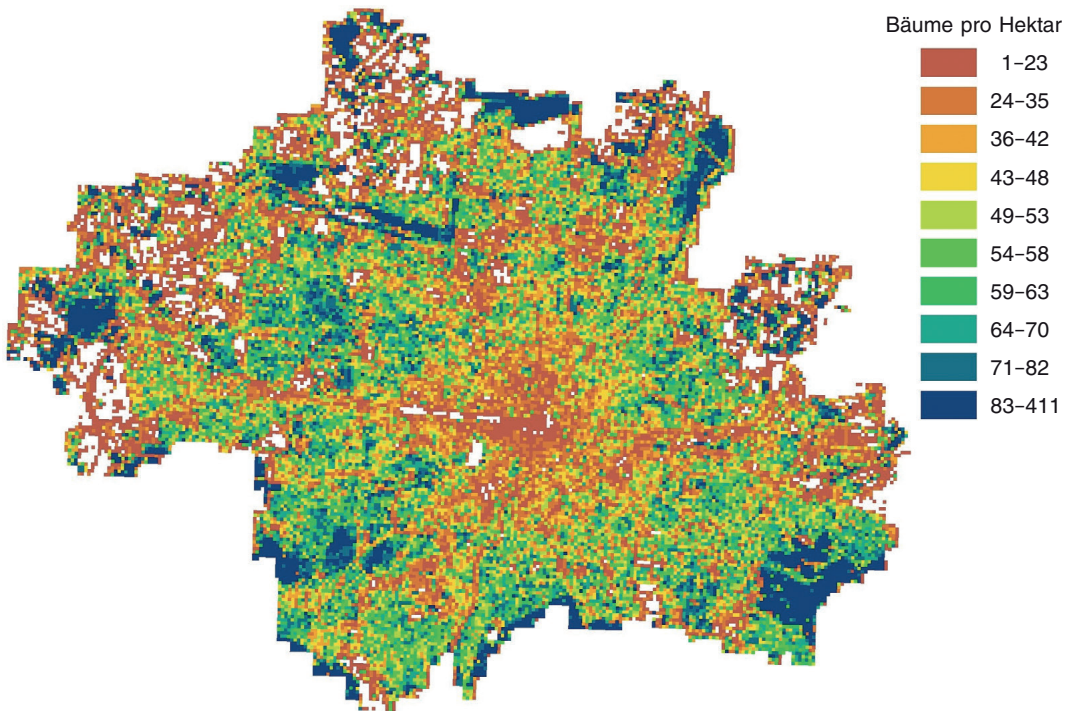


Abb. 1. Verteilung von Bäumen in München. – Leichtle et al. (2021).

unterschiedlichem Grünanteil meteorologische Daten wie die Lufttemperatur sowie den Wasserverbrauch, den Stammzuwachs und andere Daten von Bäumen erhoben. Für jede Wetterstation wurde auch in einem 500-m-Radius der Grünanteil ermittelt. Demnach liegt der Punkt, bei dem sich die Anzahl der Tage mit extremen Hitzestress halbiert, bei etwa 30–40 % Grünanteil (Rahman et al. 2022). Auch andere Untersuchungen bestätigen, dass 30–40 % Grün eine gute Zielgröße für die Begrünung einer Stadt zu sein scheint (z. B. Ziter et al. 2019). Eine europäische Studie zeigte auch, dass sich bei Erhöhung des Baumanteils in einer Stadt von 15 auf 30 % die Anzahl vorzeitiger Todesfälle durch städtische Wärmeinseln (Urban Heat Islands, UHI) erheblich verringert (lungmann et al. 2023). Bäume sind als grünes Element bei der Klimawandelanpassung besonders wichtig, da sie aufgrund ihrer großen Kronen beschatten und viel Wasser verdunsten, das kühlend wirkt (Rahman et al. 2017).

Eine 80 Jahre alte, etwa 19 Meter hohe Winterlinde, die in einem zu 40 % versiegelten Wurzelraum steht, transpiriert nach Berechnungen

mit dem Modell CityTree jährlich 48 m³ Wasser, was etwa 320 Badewannen entspricht. Ihre Kühlleistung beträgt 32667 kWh/Jahr, was etwa 208 Kühlschränken entspricht, sie speichert jährlich 160 kg CO₂, was einer Autofahrt von ca. 1140 km entspricht, und sie erzeugt dabei 88963 Liter Sauerstoff, was in etwa dem O₂-Verbrauch eines Menschen in 101 Tagen entspricht (Rötzer et al. 2020). Dazu kommen weitere Leistungen wie die langfristige Kohlenstoffspeicherung.

Zur Transpiration ist anzumerken, dass sich die Luft durch die Verdunstung zwar nicht so stark erwärmt wie ohne den Baum, aber die 48 m³ Wasser müssen in der Vegetationsperiode bereitgestellt werden. Heruntergerechnet sind dies täglich ca. 200 Liter. Steht die Linde in einer zu 100 % versiegelten Fläche, sinken die genannten Werte auf etwa die Hälfte, bei vollem Wurzelraum (nicht versiegelt), steigen sie um etwa 50 %. Das heißt, wir können die Leistungen, die wir von den Bäumen erhalten, steuern. Auch die Wahl der Baumart und das Alter der Bäume sind zu berücksichtigen: Eine 20 Jahre alte Winterlinde liefert nur gut 1/10 der Leistung eines 80 Jahre

alten Baums (Rötzer et al. 2020). Die Erhaltung alter Bäume ist also ganz besonders wichtig für die Klimawandelanpassung, aber auch für die Biodiversität, denn alte Bäume bieten sehr viel mehr Habitatstrukturen als junge.

München hat etwa 1,5 Millionen Bäume, der kronenüberschirmte Flächenanteil liegt bei etwa 25–30 % (Pauleit et al. 2022). Davon befinden sich etwa ein Drittel in Wäldern, ein Drittel in öffentlichen Grünanlagen, aber auch ein Drittel in den Grünflächen und Hausgärten der lockeren Wohnbebauung. In der Innenstadt ist die Baumdichte jedoch sehr gering (Abb. 1). Wie viel Grün und wie viele Bäume benötigen wir für die klimaangepasste und gesunde Stadt der Zukunft? Konijnendijk (2023) hat dazu die 3-30-300-Regel aufgestellt: Jeder sollte 3 Bäume von seiner Wohnung aus sehen können, in jedem Viertel sollte der Baumanteil 30 % betragen und bis zur nächsten öffentlichen Grünfläche sollten es höchstens 300 m Wegstrecke sein. Das könnten zu diskutierende Zielwerte für eine Stadtentwicklung sein, die sich grün nennt.

Transformation durch grüne Infrastruktur

Wie sollte eine Stadt aussehen, wenn wir dieses Wissen in die Stadtentwicklung einbringen, damit wir im Klimawandel künftig besser leben können? – Wir sind dieser Frage in der Maxvorstadt in München in einem dicht bebauten Quartier mit Blockbebauung an einem hochsommerlichen Nachmittag mithilfe eines Mikroklimamodells nachgegangen (Zölch et al. 2016, ZSK et al. 2018). Bei der aktuellen kronenüberschirmten Fläche von 9 % ergibt sich an dem gewählten Hochsommertag um 15 Uhr eine fühlbare Temperatur (physiologisch äquivalente Temperatur) von durchschnittlich 42,8°C in 1,4 m Höhe. Es herrscht also hoher Hitzestress. Werden in einem realistischen Szenario an offenen Kreuzungsbereichen, vor der Süd- oder Westfassade oder in besonders heißen Innenhöfen Bäume gepflanzt, lässt sich die fühlbare Temperatur um 10,3 % senken (Abb. 2). Die Hitzebelastung wird es dennoch geben, aber ihre Spitzen werden an den besonders kritischen Stellen im Quartier weggenommen. Fassaden- und Dachbegrünung führen nur zu einer geringen Verbesserung des thermischen Komforts im Freiraum. Durch das

Pflanzen von Bäumen könnte andererseits erreicht werden, dass der Klimawandel bis 2050 nicht zu einer Verschlechterung der thermischen Verhältnisse im Quartier führt. Die Umsetzung dieses Entwurfsszenarios ist durchaus möglich; die Fläche ist selbst in diesem dicht bebauten Quartier theoretisch vorhanden. Aber die Höfe und die Straßen müssen komplett anders aussehen, wenn wir die Innenstädte an den Klimawandel anpassen wollen. Es ist also eine Transformation der Freiräume notwendig, was viele Folgeüberlegungen nach sich zieht. Sie betreffen vor allem die Mobilität, denn dort wo heute viele Autos stehen, wird zukünftig die Fläche für die Bäume benötigt.

In dem Projekt Grüne Stadt der Zukunft¹ wurden Bürger befragt, was sie sich wünschen, und das Ergebnis des Workshops, eine verkehrsberuhigte Zone, nur für Liefer- und Radverkehr in Schrittempo, mit mehr Bäumen und Ruheinseln, wurde grafisch umgesetzt. Nimmt man aber den Bürgern tatsächlich Parkplätze weg, protestieren sie. Dieses große Konfliktpotenzial verhindert im Moment weitgehend ein so radikales Vorgehen, wie es für eine Transformation nötig wäre. Es zeigt aber auch klar, dass die Bürger umfassend in die Transformation ihrer Lebensräume einzubeziehen sind. Zusätzlich liegt vieles unter der Straßenoberfläche – Gas, Wasser, Strom usw. –, das den Bäumen Wurzelraum wegnimmt. Die Stadt München etwa verlangt schon heute 36 m³ Wurzelvolumen für sogenannte Großbäume (Landeshauptstadt München 2018). Bei noch zunehmender Sommertrockenheit mag auch dieses Volumen nicht mehr ausreichen. Wir brauchen daher integrierte Planungsansätze, die die verschiedenen Belange zusammenbringen und in denen wir den Umbau der technischen Infrastrukturen mit der Stadtbegrünung koppeln. Ganz besonders gilt dies auch für den Umgang mit Regenwasser. München etwa erhält dank seiner alpennahen Lage fast 1 m Niederschlag jährlich, das entspricht 1 m³ Wasser pro Quadratmeter. Vieles davon fließt von versiegelten

1 Grüne Stadt der Zukunft – klimaresiliente Quartiere in einer wachsenden Stadt; 2018–2023, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung in der Leitinitiative »Zukunftsstadt«; <https://gruene-stadt-der-zukunft.de> [abgerufen 28.06.2024].

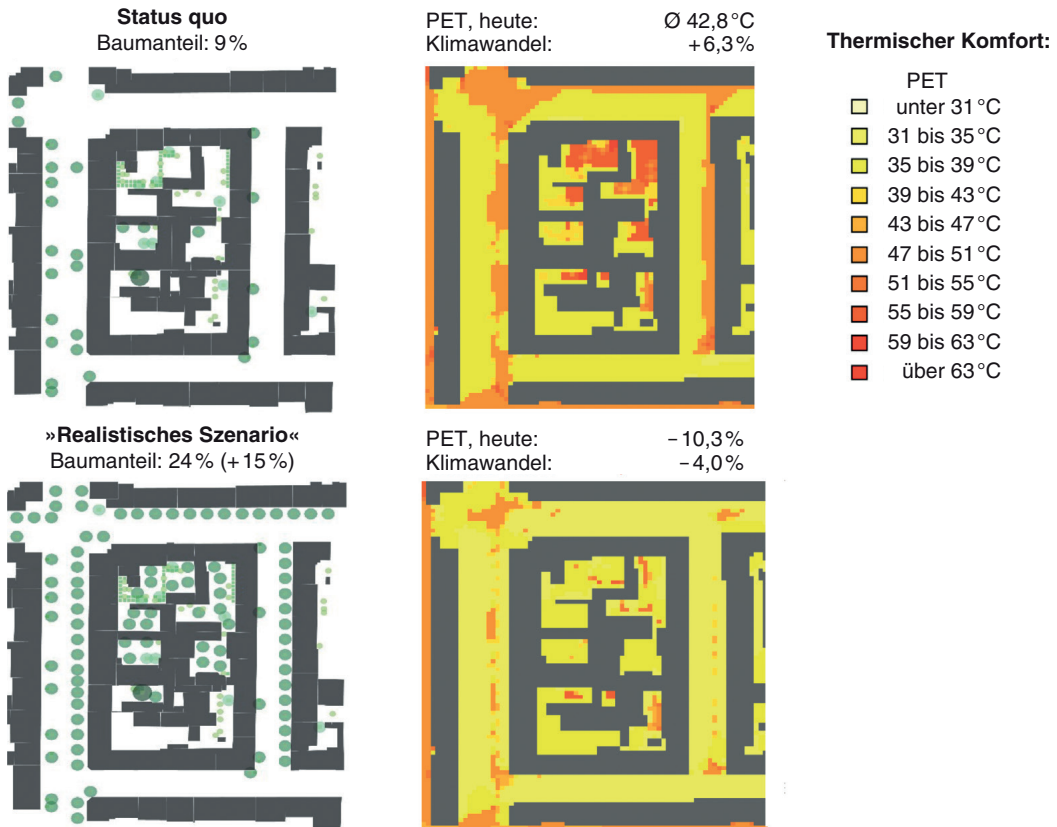


Abb. 2. Baumanteil (links) und thermische Belastung (PET: physiologisch äquivalente Temperatur, rechts) in einer Blockbebauung mit einem Baumanteil von 9 % (oben) bzw. 24 % (Entwurfsszenario; unten) um 15 Uhr eines Hitzetages in 1,4 m Höhe; Maxvorstadt, München. – ZSK et al. (2018).

Flächen in die Kanalisation ab. Dieses Wasser ließe sich für die Bewässerung der vorhandenen und der neu anzupflanzenden Bäume nutzen, sofern es nicht zu sehr verunreinigt ist. Hier gilt es, Synergien zu schaffen und dabei das wichtige Thema Gesundheit und die Biodiversität einzubeziehen. Wenn verschiedene Probleme gemeinsam auf einmal angepackt werden, lassen sich diese Ansätze auch politisch besser auf den Weg bringen.

In der Münchner Altstadt ließe sich auf diese Weise ein 150-m-Raster verwirklichen, so dass »innerhalb einer Entfernung von etwa 150 Meter ... ein geschützter bzw. kühler Freiraum für alle Nutzer*innen erreichbar« ist (mahl-gebhard-konzepte et al. 2023; Abb. 3). Hierbei helfen bereits kleine Inseln von Grün, die Schatten spenden und schon bei ihrem Anblick einen psychologischen

Effekt bewirken. Es gibt durchaus Möglichkeiten, dieses Ziel mit dem Denkmalschutz in der Münchner Altstadt in Einklang zu bringen. Das Beispiel zeigt, wie sich die vielen Konflikte, die in der Stadtplanung um den Raum bestehen, mit geeigneten Planungsansätzen auflösen lassen.

In dem Projekt Grüne Stadt der Zukunft haben wir das Thema Nachverdichtung in einem baufälligen Quartier in München aufgegriffen, das erneuert und dabei nachverdichtet werden soll (Abb. 4; Erlwein et al. 2021). Durch die Nachverdichtung kommen aufgrund des Stellplatzschlüssels Tiefgaragen dazu, die aus Kosten- und Platzgründen zwischen den bestehenden Häusern gebaut werden müssen. Werden die dortigen 70 Jahre alten Bäume gefällt, dauert es 70 Jahre, bis die neuen Bäume diese Leistung (Beschattung, Kühlung durch Transpiration)



Abb. 3. 150-m-Raster für die Münchner Altstadt, Bestand und Ziel. Bestand **(a)**: kleine Kreise: bestehende grüne, kühlende Orte, ■ Erreichbarkeit grüner, kühler Ort innerhalb 150 Meter, ■ keine Erreichbarkeit, ■ Passagensysteme als kühle, wetterfeste Wegeverbindung. Ziel **(b)**: kleine Kreise: grüner, kühler Ort (Bestand und Potenzial), ■ Erreichbarkeit grüner, kühler Ort innerhalb 150 Meter (Bestand), ■ Erreichbarkeit grüner, kühler Ort innerhalb 150 Meter (Potenzial), ■ optimierte, kühle Wegeverbindung zur besseren Erreichbarkeit eines grünen, kühlen Ortes, ■ Passagensystem als kühle, wetterfeste Wegeverbindung. Weitere Details s. mahl gebhard konzepte et al. (2023). – © mahl gebhard konzepte; Kartengrundlage: © Landeshauptstadt München, Kommunalreferat – GeodatenService 2020.



Abb. 4. Beispiel für ein Sanierungsquartier in Moosach (München), für das eine Erneuerung und Nachverdichtung geplant ist. Erläuterungen s. Text. – Foto: © Grüne Stadt der Zukunft.

wieder erreichen. Auf den Tiefgaragenflächen ist die Wahrscheinlichkeit jedoch gering, dass Bäume wieder 70 Jahre alt und so groß werden, da die Bodenaufgabe dazu zu gering ist und Tiefgaragen alle 40–60 Jahre auf ihre Dichtigkeit geprüft werden müssen (Erlwein et al. 2021). Um diesen Herausforderungen zu begegnen, müssen die Anforderungen an die Klimawandelanpassung so frühzeitig wie möglich und umfassend in die Planung eingebracht werden. In der Auslobung des Planungswettbewerbs für das Stadtquartier wurden die Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben aufgegriffen. Der Anteil des Grüns, der Schutz des Baumbestands, das lokale Management des Regenwassers und weitere Maßnahmen waren wichtige Kriterien für die Beurteilung der Wettbewerbsbeiträge. Statt Tiefgaragen wurden Alternativen wie »Mobility Hubs« mit Hochgaragen gefordert und der Stellplatzschlüssel wurde für dieses Gebiet aufgrund der Nähe zu U-Bahn und Straßenbahn auf 0,6 Stellplätze pro Wohnung festgelegt. Selbst dieser reduzierte Stellplatzschlüssel ist aber noch zu hoch, um die grüne Infrastruktur in ausreichendem Umfang in das Quartier zu integrieren. Um eine weitere Verdichtung zur Schaffung von neuem Wohnraum zu erreichen, die mit dem nötigen Grün vereinbar ist, müssen die Prioritäten anders gesetzt werden. Wir müssen erkennen, dass Bäume bzw. das Grün insgesamt eine Infrastruktur darstellen, die genauso wichtig ist wie Schulen oder anderes (Hansen et al. 2018). Um der Praxis hierbei zu helfen, wurden in dem Projekt Grüne Stadt der Zukunft Leitfäden erarbeitet,² die de-

taillierte Hinweise für die Integration der grünen Infrastruktur in Planungsverfahren, wie etwa den genannten Planungswettbewerb, geben.

Umsetzung

Die Stadtplanung wird eine Schlüsselrolle zur Sicherung und Weiterentwicklung von grüner und blauer Infrastruktur spielen, da sie die zukünftige Entwicklung vorkonzipiert. Es gibt aber nicht die eine planerische Stellschraube oder das eine Instrument, sondern viele verschiedene. Unabhängig von den Instrumenten und Prozessen in der Stadt- und Freiraumplanung sind weitere Dimensionen zu berücksichtigen, v.a. die verschiedenen Planungsbeteiligten und ihre jeweilige Verantwortung, die verfügbaren Ressourcen wie Geld, Personal oder Raum, und die verschiedenen Raumkonflikte bzw. Flächenkonkurrenzen (Abb. 5; Linke et al. 2021, 2022). Zu den formellen und informellen Instrumenten, die die Stadt- und Freiraumplanung steuern können, gehören z.B. Leitlinien und Konzepte, Rahmenpläne und Strukturkonzepte, städtebaulich-landschaftsplanerische Wettbewerbe, Bauleitplanung und städtebauliche Sanierungsmaßnahmen, bis hin zu für den Grundstückseigentümer rechtsverbindlichen Bebauungsplänen und Freiflächengestaltungsplänen.

2 Siehe <https://www.lss.lss.tum.de/lapl/forschung/abgeschlossene-projekte/gruene-stadt-der-zukunft/publikationen/> und <https://gruene-stadt-der-zukunft.de/> [abgerufen 28.06.2024].



Abb. 5. Schematische Darstellung der übergeordneten Aspekte der Planung für eine grüne und blaue Infrastruktur. – Nach Linke et al. (2021).

Ganz entscheidend in der Stadt- und auch Freiraumplanung sind die drei Begriffe frühzeitig, ganzheitlich und konsistent: Klimaorientierung muss ganz zu Beginn – also frühzeitig – mitgedacht und mitgeplant werden. Das ist in allen Planungsebenen entscheidend. Dabei sind alle klimasensiblen Inhalte, alle Planungsbeteiligten und auch alle planungsbetroffenen Fachstellen ganzheitlich einzubeziehen. Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass die Klimaorientierung konsistent über die gesamte Planung hinweg Berücksichtigung findet (Linke et al. 2021, 2022).

Projekte wie die Grüne Stadt der Zukunft (ZSK et al. 2018, Linke et al. 2021) können auf diesem Weg helfen. In dem Projekt war die Stadt München mit dem Referat für Klima- und Umweltschutz und dem Planungsreferat als gleichberechtigter Partner beteiligt. Gemeinsam wurden Szenarien und Fakten ausgearbeitet, die von den Planern in dem Wettbewerb aufgegriffen werden konnten. Das Entscheidende an der Stadttransformation ist, dass sich das Verhalten ändert, sowohl bei denen, die fachlich damit beschäftigt sind, als auch bei der Bevölkerung. Wenn diese sieht, dass die Transformation technisch möglich ist und es eine andere, erstrebenswerte Zukunft gibt, ist sie vielleicht eher bereit, auf das Auto in der Stadt zu verzichten. Bis dahin ist es ein langer Weg, den wir aber jetzt beginnen müssen.

Fazit und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- Eine strategisch geplante grüne Infrastruktur kann Hitze und Starkregen regulieren; dabei spielen Bäume eine zentrale Rolle. Es braucht ein Verschlechterungsverbot und ein Verbesserungsgebot in Bezug auf Grünvolumen und Freiraumqualitäten.
- Das Prinzip der doppelten Innenentwicklung (Böhm et al. 2016) zur optimalen Nutzung innerstädtischer Flächen ist oberstes Gebot und ist zu einer dreifachen Innenentwicklung zu erweitern, die auch die Mobilität miteinbezieht.
- Informelle und formelle Instrumente bieten vielfältige Möglichkeiten, Klimaorientierung zu integrieren. Informelle Instrumente haben zwar keine rechtliche Verbindlichkeit, können aber ressortübergreifend Bewusstsein schaffen, grundlegende Ziele bestimmen und so eine klimaorientierte Planung befördern. Formelle Instrumente, wie die Bauleitplanung, haben einen starren Rahmen, bieten aber dafür verbindliche und bislang teilweise ungenutzte Möglichkeiten. Auch die Stadt-sanierung bietet Optionen und finanzielle Mittel, die bislang nicht ausreichend genutzt werden.

- Die Klimawandelanpassung durch grüne Infrastruktur muss durch Anreize, Entlastungen und klare Rahmensetzung von Kommunen bzw. vom Staat gestärkt werden. Ohne einen breiten, parteiübergreifenden und dauerhaften Konsens in der Politik, der klare Ziele vorgibt und auch bei Konflikten Bestand hat, wird dies nicht gehen. Ebenso unabdingbar ist eine umfassende Beteiligung der Bürger in den Planungen zur Umgestaltung ihrer Lebensräume im öffentlichen, aber auch im privaten Bereich.
- Frühzeitige, konsistente und ganzheitliche Berücksichtigung klimaorientierter Belange: Der Schwerpunkt Klimawandelanpassung ist in jedem Instrument und auf allen Planungs- und Maßstabsebenen mitzuplanen und nicht nur sekundär unterstützend zur Rechtfertigung einer Festsetzung anzuführen. Klimaanpassung und auch Klimaschutz müssen zum Schwerpunkt in der Stadt- und Freiraumplanung werden.

In dem Graduiertenkolleg Urbane Grüne Infrastruktur an der TU München³ wollen wir noch mehr in die Tiefe gehen. Um die Städte der Zukunft zu entwickeln, müssen wir die Wechselwirkungen des Lebens in der Stadt noch besser verstehen, d. h. Städte als lebende Systeme betrachten. Wir müssen etwa den Boden nicht nur als Substrat sehen, in dem der Baum gerade so überlebt, sondern als lebendes Ökosystem mit vielfältigem Nutzen, nicht nur für das Leben der Pflanzen und Tiere, sondern auch für die Gesundheit. Und wir müssen uns überlegen, ob wir Bäume nur als technisches Werkzeug sehen, mit dem wir Kühlung schaffen können, oder als gleichberechtigte Lebewesen in der Stadt, deren Ansprüche wir genauso erfüllen müssen wie die des Menschen. Daher halte ich die Diskussionen, die wir etwa über Co-Habitation führen und die zurzeit aus Sicht der Praxis wohl noch etwas abgehoben erscheinen mögen, für durchaus berechtigt (The Urban More-than-Human Collective 2023).

3 Research Training Group 2679 – Urban Green Infrastructure. Training Next Generation Professionals for Integrated Urban Planning Research, <https://www.gs.tum.de/grk/ugi/> [abgerufen 28.06.2024].

Danksagung

Das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz hat seit 2013 zahlreiche Forschungsprojekte zu Klimaschutz und Klimawandelanpassung in der Stadt gefördert. Wir sind dem Ministerium für diese beispiellose Initiative zu großem Dank verpflichtet. Dank gebührt auch dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des Forschungsprojekts »Grüne Stadt der Zukunft« und der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Bewilligung des Graduiertenkollegs 2679 »Urban Green Infrastructure – Training Next Generation Professionals for Integrated Urban Planning Research«.

Literatur

- Bastin, J.-F., E. Clark, T. Elliott, S. Hart, J. van den Hoogen, I. Hordijk, H. Ma, S. Majumder, G. Manoli, J. Maschler, L. Mo, D. Routh, K. Yu, C. M. Zohner & T. W. Crowther. 2019. Understanding climate change from a global analysis of city analogues. – *PLoS ONE* 14 (7): e0217592. DOI: [10.1371/journal.pone.0217592](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217592)
- Böhm, J., C. Böhme, A. Bunzel, C. Kühnau, D. Landua & M. Reinke. 2016. Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. – Bundesamt für Naturschutz, Bonn, BfN-Skripten, 444, 270 S.
- de Schrijver, E., D. Royé, A. Gasparrini, O. H. Franco & A. M. Vicedo-Cabrera. 2023. Exploring vulnerability to heat and cold across urban and rural populations in Switzerland. – *Environmental Research Health*, 1: 025003. DOI: [10.1088/2752-5309/acab78](https://doi.org/10.1088/2752-5309/acab78)
- Dodman, D., B. Hayward, M. Pelling, V. Castan Broto, W. Chow, E. Chu, R. Dawson, L. Khirfan, T. McPhearson, A. Prakash, Y. Zheng & G. Ziervogel. 2022. Cities, settlements and key infrastructure. – In: Pörtner, H.-O., D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem & B. Rama (eds.): *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA: 907–1040. DOI: [10.1017/9781009325844.008](https://doi.org/10.1017/9781009325844.008)
- Erlwein, S., T. Zölch & S. Pauleit. 2021. Regulating the microclimate with urban green in densifying cities: Joint assessment on two scales. – *Building and Environment*, 205: 108233. DOI: [10.1016/j.buildenv.2021.108233](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108233)
- Gabriel, K. M. A. & W. R. Endlicher. 2011. Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. – *Environmental Pollution*, 159: 2044–2050. DOI: [10.1016/j.envpol.2011.01.016](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.016)

- Hansen, R., D. Born, K. Lindschulte, W. Rolf, R. Bartz, A. Schröder, C. W. Becker, I. Kowarik & S. Pauleit. 2018. Grüne Infrastruktur im urbanen Raum: Grundlagen, Planung und Umsetzung in der integrierten Stadtentwicklung. – Bundesamt für Naturschutz, Bonn, BfN-Schriften, 503, 154 S. DOI: [10.19217/skr503](https://doi.org/10.19217/skr503)
- Humaida, N., M. H. Saputra, Sutomo & Y. Hadyan. 2023. Urban gardening for mitigating heat island effect. – IOP Conference Series: Earth Environmental Science, 1133: 012048. DOI: [10.1088/1755-1315/1133/1/012048](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1133/1/012048)
- lungman, T., M. Cirach, F. Marando, E. Pereira Barboza, S. Khomenko, P. Masselot, M. Quijal-Zamorano, N. Mueller, A. Gasparini, J. Urquiza, M. Heris, M. Thondoo & M. Nieuwenhuijsen. 2023. Cooling cities through urban green infrastructure: a health impact assessment of European cities. – Lancet, 401: 577–589. DOI: [10.1016/S0140-6736\(22\)02585-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)02585-5)
- Konijnendijk, C. C. 2023. Evidence-based guidelines for greener, healthier, more resilient neighbourhoods: Introducing the 3-30-300 rule. – Journal of Forestry Research, 34: 821–830. DOI: [10.1007/s11676-022-01523-z](https://doi.org/10.1007/s11676-022-01523-z)
- Kühnl, M., T. Leichtle, K. Martin & H. Taubenböck. 2020. Grünflächenkartierung im urbanen Raum am Beispiel München. – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Sachverständigenbüro für Luftbilddauswertung und Umweltfragen (SLU), Präsentation zum Abschluss des Projektes »Alles im grünen Bereich – Erdbeobachtung für ein nachhaltiges Grünflächenmanagement«. Im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Berlin.
- Kürbis, I. 2023. Demografiebericht München Teil 1 – Analyse 2022 und Bevölkerungsprognose 2023 bis 2040 für die Landeshauptstadt. – Landeshauptstadt München, Referat für Stadtplanung und Bauordnung, München, 60 S.
- Landeshauptstadt München, Baureferat, Gartenbau. 2018. Zusätzliche Technische Vorschriften für die Herstellung und Anwendung verbesserter Vegetationstragschichten. ZTV-Vegetationstragschichten (ZTV-Vegtra-Mü). Ausgabe 2018. – München, 34 S. <https://stadt.muenchen.de/infos/baureferat-ausschreibungen-informationen.html> [abgerufen 28.06.2024]
- Leichtle, T., M. Zehner, M. Kühnl, K. Martin & H. Taubenböck. 2021. Urban Trees in Munich – detection, delineation, quantification, and characterization based on VHR remote sensing data. – REAL CORP 2021 Proceedings. 7–10 September 2021, Wien: 1029–1039. <https://archive.corp.at/> [abgerufen 28.06.2024]
- Leichtle, T., M. Kühnl, N. Osterkamp, A. S. Garcia de León, K. Martin & H. Taubenböck. 2022. Mapping urban green – The capabilities of remote sensing data with spatial resolutions from 10 meters to 10 centimeters. – Dresden Nexus Conference 2022, 23.–25.05.2022, Dresden.
- Lepänen, P. K., A. Kinnunen, R. Hautamäki, L. Järvi, M. Havu, S. Junnila & O. Tahvonen. 2024. Impact of changing urban typologies on residential vegetation and its climate-effects – A case study from Helsinki, Finland. – Urban Forestry & Urban Greening, 96: 128343. DOI: [10.1016/j.ufug.2024.128343](https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128343)
- LfU (Bayer. Landesamt für Umwelt, Hrsg.). 2017. Satellitengestützte Erfassung der Bodenversiegelung in Bayern 2015. – Augsburg, 71 S.
- Linke S., A. Putz, A. Bauer, J. Brasche, A. Dehnhardt, S. Erlwein, W. Lang, K. Langer, C. Meier-Dotzler, S. Pauleit, J. Rupp, M. Schöpfli, A. Timmermann, S. Wutz & T. Zölch. 2021. Die Planung einer Grünen Stadt der Zukunft. Handlungsmöglichkeiten und Instrumente. – Forschungsvorhaben Grüne Stadt der Zukunft. TU München (Hrsg.), 47 S.
- Linke, S., T. Zölch, S. Erlwein, A. Bauer, C. Meier-Dotzler, A. Putz, J. Rupp, M. Welling, S. Pauleit & W. Lang. 2022. Klimaresiliente Quartiere in einer wachsenden Stadt – Forschungsergebnisse Projekt »Grüne Stadt der Zukunft«. – ANLiegen Natur, 44: 9–18. www.anl.bayern.de/publikationen [abgerufen 28.06.2024]
- Loram, A., J. Tratalos, P. H. Warren & K. J. Gaston. 2007. Urban domestic gardens (X): the extent & structure of the resource in five major cities. – Landscape Ecology, 22: 601–615. DOI: [10.1007/s10980-006-9051-9](https://doi.org/10.1007/s10980-006-9051-9)
- Mahl-gehard-konzepte, S. Pauleit & A. Hild. 2023. Integration von klimaresilienten Grün- und Freiraumstrukturen in die historische Münchner Altstadt. Freiraumplanerisches und denkmalpflegerisches Gutachten für die Landeshauptstadt München. – Im Auftrag der Landeshauptstadt München, Referat für Stadtplanung und Bauordnung, München, 95 S.
- Mühlbacher, G., M. Koßmann, K. Sedlmeier & K. Winderlich. 2020. Stadtklimatische Untersuchungen der sommerlichen Temperaturverhältnisse und des Tagesgangs des Regionalwindes (»Alpines Pumpen«) in München. – Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 252, 100 S. ISBN 978-3-88148-519-7.
- Pauleit, S., N. Gulsrud, S. Raum, H. Taubenböck, T. Leichtle, S. Erlwein, T. Rötzer, M. Rahman & A. Moser-Reischl. 2022. Smart urban forestry: is it the future? – In: Chokhachian, A., M. U. Hensel & K. Perini (eds.): Informed Urban Environments. The Urban Book Series, Springer, Cham: 161–182. DOI: [10.1007/978-3-031-03803-7_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-03803-7_10)
- Rahman, M. A., A. Moser, T. Rötzer & S. Pauleit. 2017. Microclimatic differences and their influence on transpirational cooling of *Tilia cordata* in two contrasting street canyons in Munich, Germany. – Agricultural and Forest Meteorology, 232: 443–456. DOI: [10.1016/j.agrformet.2016.10.006](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.10.006)
- Rahman, M. A., E. Franceschi, N. Pattnaik, A. Moser-

- Reischl, C. Hartmann, H. Paeth, H. Pretzsch, T. Rötzer & S. Pauleit. 2022. Spatial and temporal changes of outdoor thermal stress: influence of urban land cover types. – *Scientific Reports*, 12: 671. DOI: [10.1038/s41598-021-04669-8](https://doi.org/10.1038/s41598-021-04669-8)
- Revi, A., D. E. Satterthwaite, F. Aragón-Durand, J. Corfee-Morlot, R. B. R. Kiunsi, M. Pelling, D. C. Roberts & W. Solecki. 2014. Urban areas. – In: Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea & L. L. White (eds.): *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA: 535–612. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/> [abgerufen 28.06.2024]
- Rötzer, T., A. Reischl, M. Rahman, H. Pretzsch & S. Pauleit. 2020. Leitfaden zu Stadtbäumen in Bayern. Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Stadtbäume im Klimawandel – Wuchsverhalten, Umweltleistungen und Perspektiven. – Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung, Freising, 72 S.
- Rötzer, T., V. Dervishi, H. Pretzsch, A. Reischl, P. Stark da Silva & S. Pauleit. 2023. Leistungen von Stadtgrün an öffentlichen Plätzen in München. – Abschlussbericht Bayer. Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz. FKZ: TEW-01CO2P-75382, 98 S.
- The Urban More-than-Human Collective, S. Dümpelmann, R. R. Gioielli, S. Pauleit, A. Sinha, K. Wright & A. Zhang. 2023. Making urban environments: infrastructures of power, resistance and negotiation. – *Global Environment*, 16: 222–257. DOI: [10.3197/ge.2023.160203](https://doi.org/10.3197/ge.2023.160203)
- Ziter, C. D., E. J. Pedersen, C. J. Kucharik & M. G. Turner. 2019. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. – *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 116: 7575–7580. DOI: [10.1073/pnas.1817561116](https://doi.org/10.1073/pnas.1817561116)
- Zölch, T., J. Maderspacher, C. Wamsler & S. Pauleit. 2016. Using green infrastructure for urban climate-proofing: An evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. – *Urban Forestry & Urban Greening*, 20: 305–316. DOI: [10.1016/j.ufug.2016.09.011](https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.09.011)
- Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK), W. Lang & S. Pauleit. 2018. Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern. Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt am Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung. – TU München (Hrsg.), 93 S.

Diskussion

P. Gerhard: Waren in dem vorgestellten Projekt »Grüne Stadt der Zukunft« auch Architekten beteiligt?

S. Pauleit: Wir hatten Stadtplaner und Architekten dabei, da wir uns auch der Energieeffizienz und Nachhaltigkeit der Gebäudesanierung in einer Lebenszyklusbetrachtung gewidmet haben. Wir wollten uns auch die Wechselwirkung zwischen Außen- und Innenklima ansehen, weil man durch geringere Lufttemperaturen im Außenraum vielleicht den Einsatz von Klimaanlage, die künftig kommen werden, minimieren kann. Auf einem Stadtklimatologen-Kongress in Offenbach wurde erst kürzlich gesagt, ohne Kühlung im Sommer wird es künftig nicht mehr gehen. Wenn wir darauf nicht reagieren, werden wir künftig alle solche Kühlanlagen in den Wohnungen brauchen; energetisch wäre das eine Katastrophe.

P. Gerhard: Auch die nächtliche Auskühlung von Rasenflächen ist in diesem Zusammenhang wichtig, v. a. um Tropennächte zu verhindern.

S. Pauleit: Ganz sicher. In meinem Beitrag habe ich mich mit den Bäumen auf eine sehr konkrete Ebene beschränkt. Bäume sind vor allem für den thermischen Komfort im Freiraum tagsüber sehr wichtig. Nachts sind Rasenflächen wichtig, über denen sich die Luft rasch abkühlt. Die klassische Stadtplanung muss aber natürlich dafür sorgen, dass Grünkorridore in die Stadt geführt werden, die hoffentlich kühlere Luft aus dem Südwesten nach München hineinleiten, um die nächtliche Erwärmung zu mildern.

J. Pongratz: Global kommt als Thema die Ausbreitung von Megastädten hinzu, die noch einmal ganz anders funktionieren, die vermutlich viel

stärker mit Hitzeextremen zu kämpfen haben und in denen die Menschen viel enger zusammenleben, als dies bei unseren Städten der Fall ist. Ist das, was wir eben gehört haben, auf eine andere Skala transferierbar oder müssen wir bei Megastädten ganz neu denken?

S. Pauleit: Ich kann nur insofern dazu etwas sagen, als wir auch schon in subsaharischen Städten Urbanisierungsprozesse untersucht und zu Themen wie grüner Infrastruktur gearbeitet haben. Das, was wir in dem hochtechnisierten und superreichen Europa tun können, kommt tatsächlich einer Insel der Glückseligen gleich. Städte wie Addis Abeba oder Dar-es-Salaam mit über fünf Millionen Einwohnern sind so anders, dass wir sehr wenig an Knowhow direkt übertragen können. Sie werden auch anders entwickelt; 60 bis 70 Prozent der Städte bestehen aus informellen Siedlungen, in denen die dort lebenden Menschen sich eine eigene Stadt in der Stadt schaffen. Mit diesen Situationen muss man sich erst intensiv befassen, um zu verstehen, wie sie funktionieren. Erst dann kann man anfangen, in Kollaboration mit Partnern vor Ort zu diskutieren, wie man solche Städte an den Klimawandel anpassen kann – und selbst dann wäre ich vorsichtig mit der Erwartung, schnell zu einer Lösung beitragen zu können. Da braucht man einen langen Atem und Projekte, bei denen man es wagt, sie über zehn Jahre laufen zu lassen, um überhaupt einmal zu einem Effekt zu kommen. In unserem damaligen Projekt Dar-es-Salaam haben wir neue Karten zur grünen Infrastruktur erstellt, aber dann war das Projekt nach einer typischen Laufzeit von drei bis vier Jahren zu Ende. Unsere Ergebnisse sind nie richtig in der Verwaltung angekommen und waren in kurzer Zeit wieder veraltet, weil die Stadt so schnell wächst.