

Bauphysik urbaner Oberflächen

Philip Leistner
Andreas Kaufmann
Mark Koehler
Michael Würth
Wolfgang Karl Hofbauer
Sebastian Dittrich
Stephanie Maier
Antonia Gordt
Michael Jäger

*Univ.-Prof. (em.) Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis
zum 80. Geburtstag gewidmet*



Philip Leistner
 Andreas Kaufmann
 Mark Koehler
 Michael Würth
 Wolfgang Karl Hofbauer
 Sebastian Dittrich
 Stephanie Maier
 Antonia Gordt
 Michael Jäger

Bauphysik urbaner Oberflächen

Baulich-räumliche Gestalt und urbane Flächennutzung gehören zu den wesentlichen transformativen Handlungsfeldern der Städte. Lebens- und Umweltqualität, Identität und Eigenart sowie die Teilhabe in der kommunalen Gesellschaft werden durch urbane Oberflächen maßgeblich beeinflusst. Die meisten urbanen Oberflächen sind bislang auf die dauerhafte Erfüllung einzelner Zwecke ausgerichtet, bieten aber einen größeren Gestaltungsspielraum bezüglich Funktionalität und Adaptivität, Qualität und Effizienz. Es ist deshalb sinnvoll, das bauphysikalische Wirkpotential urbaner Oberflächen ganzheitlich zu erschließen, zu bewerten, technologisch zu erweitern und praxistauglich zu erproben. Angesichts wachsender Belastungen urbaner Strukturen durch klimatisch bedingte Einflüsse, wie Überflutung, extreme Wetterlagen oder Hitzeinseln, werden neue Möglichkeiten, Verfahren, Systeme oder Materialien zur Verbesserung der Resilienz notwendig. Im Beitrag werden exemplarische Entwicklungen vorgestellt, die sich ergänzen und zusammenfügen lassen. Hydroaktive Oberflächen puffern Regenwasser und geben es zeitverzögert ab, um Hitze und Überflutung gleichermaßen zu reduzieren. Begrünte Fassaden verbessern Stadtklima und Luftqualität. Schallabsorbierende Fassaden verringern innerstädtischen Lärm. Die optimierte Reinigung von Verkehrs- und Freiflächen reduziert den Instandhaltungsaufwand. Die Betrachtung von Bewirtschaftungsprozessen mittels Ökobilanz zeigt Optimierungspotentiale kommunaler Stoffströme auf.

Stichworte: urbane Oberflächen, Klimaresilienz, bauphysikalisches Wirkpotential, hydroaktive Oberflächen, Fassadenbegrünung

1 Einleitung

Zu den wesentlichen transformativen Handlungsfeldern der Städte gehören ihre baulich-räumliche Gestalt und die urbane Flächennutzung. Sie sind für eine nachhaltige Entwicklung sowohl neuer als auch reifer Städte und Stadtquartiere von besonderer Bedeutung, da sie die Lebens- und Umweltqualität, die Identität und Eigenart sowie die Teilhabe in der kommunalen Gesellschaft maßgeblich beeinflussen. Zugleich bestehen untrennbare Wechselbeziehungen von Nutzung und Gestaltung urbaner Flächen mit anderen Handlungsfeldern, wie der Ressourcen- und Energieeffizienz, der Klimaresilienz sowie der Mobilität und Produktivität städtischer Strukturen. Die meisten Siedlungs-, Verkehrs- und vor allem Gebäudeoberflächen sind bislang auf die möglichst dauerhafte Erfüllung einzelner

Building physics in towns

Structural-spatial form and urban land use are among the main transformative fields of action of cities. Quality of life and environment, identity and individuality as well as participation in local society are significantly influenced by urban surfaces. Most urban surfaces have so far been designed for the long-term fulfilment of individual purposes, but offer greater scope for design in terms of functionality and adaptability, quality and efficiency. It therefore makes sense to develop, evaluate, technologically expand and test the potential of urban surfaces in terms of building physics as a whole. In view of growing stress on urban structures due to climate-induced influences, such as flooding, extreme weather conditions or heat islands, new possibilities, processes, systems or materials are needed to improve resilience. The article presents exemplary developments that can be supplemented and combined. Hydroactive surfaces buffer rainwater and release it with a time delay to reduce heat and flooding equally. Green façades improve city climate and air quality. Sound-absorbing façades reduce inner-city noise. Optimized cleaning of traffic and open spaces reduces maintenance costs. The assessment of management processes by means of a life cycle assessment shows the potential for optimizing municipal material flows.

Keywords: urban surfaces, climate resilience, building physical impact potential, hydroactive surfaces, façade greening

Zwecke ausgerichtet. Sie bieten aber für die Bilanzräume Quartier und Stadt einen deutlich größeren Gestaltungsspielraum und damit Handlungsoptionen im Sinne von Funktionalität und Adaptivität, Qualität und Effizienz. Dafür ist es erforderlich, die Aspekte und Akteure in einem strukturierten und moderierten fach- und interessensübergreifenden Prozess zu vereinen. Die Eigentümer und Nutzer urbaner Oberflächen stammen schließlich aus allen Teilen der Stadtgesellschaft. Die konkreten Planungs- und Gestaltungslösungen müssen sich auf die stadtbauphysikalischen Merkmale urbaner Oberflächen richten, sollten aber auch ein funktionales Flächenmanagement urbaner Materialien, Oberflächen und (Stadt-) Bauteile erreichen. Allein die hohe Betroffenheit von Kommunen durch dauerhafte Klimaänderungen und extreme Witterungsereignisse verdeutlicht, dass diese Herausforderungen nur mit



Bild 1. Bauphysikalisches Wirkpotential zur Gestaltung urbaner Oberflächen mit Klimarelevanz sowie für nachhaltige Lebens- und Umweltqualität in Städten

Fig. 1. Building physics potential for the design of urban surfaces with climate relevance and for sustainable quality of life and environment in cities

vielen Impulsen und aufeinander abgestimmten Beiträgen bewältigt werden können. Das bauphysikalische Wirkpotential urbaner Oberflächen ganzheitlich zu erschließen und technologisch zu erweitern, zählt zu diesen Beiträgen. In Bild 1 sind die Wirkungen und Wechselwirkungen im Kontext der aktuellen Situation und Gestaltungsziele illustriert.

Der Stand des Wissens belegt klar und vielfach den Handlungszwang, zeigt aber auch konkrete Handlungsebenen. Zugleich sind zahlreiche Vorschläge bekannt, wie wirksam und wirtschaftlich zum Beispiel auf spezifische Folgen der Klimaänderungen reagiert werden kann. Die gestiegene Dynamik von Witterungserscheinungen (Wasser, Schnee, Temperatur) und deren Konsequenzen sind Gegenstand zahlreicher Publikationen und Praxisbeispiele. Wird jedoch der Systemgedanke zu urbanen Oberflächen erweitert, etwa um Aspekte der urbanen Sicherheit (Katas-

trophen- und Brandschutz, Evakuierungsstrukturen), der akustischen und visuellen Lebens- und Umweltqualität sowie der Betrachtung von (Tele-) Kommunikationssystemen, schmilzt der Wissens- und Lösungsfundus zusammen. Daher sind auch konkrete Anwendungen und Effekte die Ausnahme, wenn nutzungs-, interessen- und fachübergreifende Hürden in der Praxis auftreten. Die großen Flächen mit unterschiedlicher Nutzung stellen hohe Ansprüche, bieten aber bei systematischer Betrachtung Ansätze für ein bauphysikalisches Flächenmanagement, wie Bild 2 verdeutlicht. Als Grundprinzip und Maßstab der Gestaltung gilt alternativlos die Nachhaltigkeit.

Zur Erschließung des bauphysikalischen Wirkpotentials waren und sind die experimentelle Bestimmung der Eigenschaften urbaner Oberflächen, die (quartiers- und stadt-) modellhafte Beschreibung mit Planungswerkzeugen

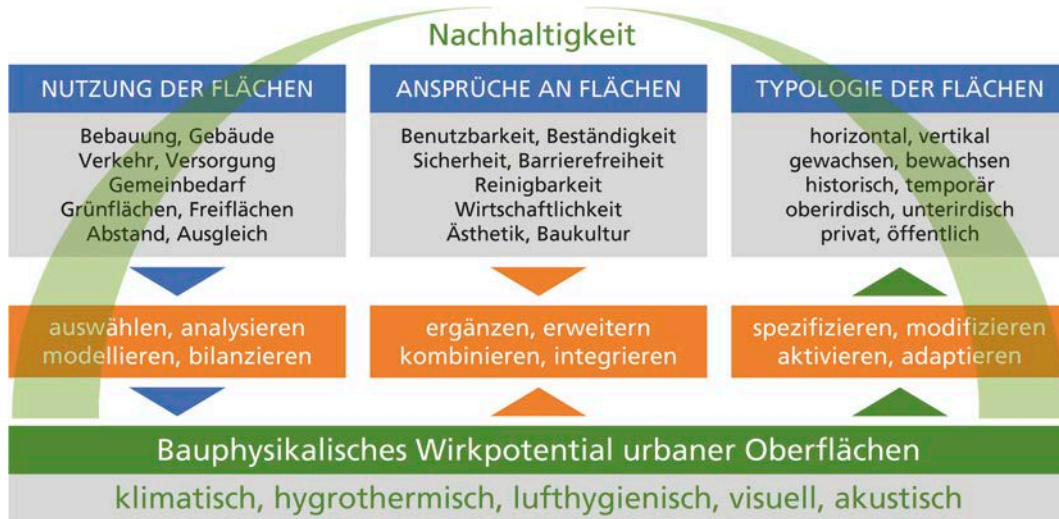


Bild 2. Systematische Betrachtung und Behandlung urbaner Oberflächen im Sinne eines bauphysikalischen Flächenmanagements

Fig. 2. Systematic consideration and treatment of urban surfaces in the sense of building physics area management

und natürlich auch die Bewertung und Ökobilanzierung Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Über beispielhafte Ergebnisse und deren zusammenhängende Betrachtung wird hier berichtet.

2 Hydroaktive Oberflächen

Die bereits erwähnten Starkregenereignisse sowie heiße, trockene Witterungsperioden häufen sich und treffen auf ungebremsten Flächenverbrauch und Nachverdichtung. Der in Ballungsräumen mitunter auf über 90 % der Gesamtfläche gestiegene Versiegelungsanteil erhöht und beschleunigt einerseits den Niederschlagsabfluss. Andererseits reduziert er die Wassermenge, die für Verdunstung bzw. latente Kühlung und zur Grundwasserneubildung zur Verfügung steht. Da fehlende Pufferflächen zur Überlastung der Kanalisation führen, können Kommunen auf Basis der DIN 1986-10 [1] die maximalen Abflussspenden von Grundstücken begrenzen und beispielsweise Rückhaltungsmöglichkeiten auf dem Grundstück vorschreiben. Gerade in hochverdichteten Siedlungsstrukturen fehlt jedoch für offene Vertiefungen, zum Beispiel Mulden-Rigolen-Systeme, mit hohen Versickerungs- und Verdunstungsanteilen oftmals der Platz. Daher sind urbane Oberflächen gefragt, die zur Vorsorge hinsichtlich Hitze und Überflutung gleichermaßen dienen [2]. Ein Ansatz ist das sogenannte „Schwammstadt“-Prinzip [2, 3], bei welchem städtische Oberflächen vermehrt für die Zwischenspeicherung von Niederschlägen genutzt werden. Ziel ist die Annäherung der Wasserbilanz bebauter Gebiete an nicht bebaute Flächen, also im Wesentlichen die Reduzierung der Spitzenwerte des Abflusses nach Starkregenereignissen sowie die Erhöhung der Anteile an ortsnaher Verdunstung und Versickerung zur Grundwasserneubildung im städtischen Wasserkreislauf. Die Verteilung zwischen Verdunstung, Versickerung und Abfluss ist regional und zeitlich variabel, beträgt jedoch im Jahresmittel für nicht bebaute Flächen

hierzulande ca. 60 % für Verdunstung, 25 % für Grundwasserneubildung und 15 % für den direkten Abfluss. Im Vergleich weisen versiegelte Oberflächen mittlere Abflussbeiwerte von meist über 90 % auf.

Besondere Bedeutung potentiell hydroaktiver Flächen kommt den bislang weitgehend brachliegenden horizontalen Dach- und Verkehrsflächen sowie ausgewählten Fassaden zu [4, 5]. Bei Dachflächen und Fassaden wird inzwischen häufiger die Begrünung gewählt, die durch zusätzliche Transpiration der Vegetation die reine Verdunstung des Pflanzsubstrats nochmals deutlich erhöht. Da die Substratdicken extensiv begrünter Dächer nur eine begrenzte Speicherkapazität aufweisen, wird neuerdings eine zusätzliche Pufferebene über Retentionsboxen oder „Spacer“ für bis zu 140 l/m² Niederschlag unterhalb des Gründachaufbaus integriert. Je nach Ausführungsvariante kann der zwischengespeicherte Niederschlag gedrosselt abgelassen oder vollständig der Verdunstung zugeführt werden. Zur nicht bodengebundenen Begrünung von Fassaden gibt es Entwicklungen vor allem im Bereich der Systembegrünung, bei welcher die Substratschicht ähnlich einer vorgehängten Fassade flächig oder in speziellen Substratgefäßen an einer Tragkonstruktion befestigt wird. Ein grundsätzlicher Nachteil dieser Systeme ist die bislang zwingend notwendige Bewässerung. Der auf die Wand treffende Niederschlag zur Versorgung der Vegetationsdecke alleine reicht nicht aus und die Speichermöglichkeit von Wasser ist aufgrund der statischen Gegebenheiten deutlich geringer als im Dachbereich.

Bei Verkehrsflächen gewinnen zunehmend Wasser-rückhaltung und Versickerung an Bedeutung. Bereits seit Jahrzehnten können Pflasterflächen auch als versickerungsfähige Beläge ausgeführt werden. Üblicherweise kommen haufwerksporige Gefüge oder Sickeröffnungen im Regelquerschnitt in Frage oder die Fuge wird selbst mit grobkörnigem Material gefüllt. Um eine vollständige Entwässerung in vertikaler Richtung zu ermöglichen, müssen

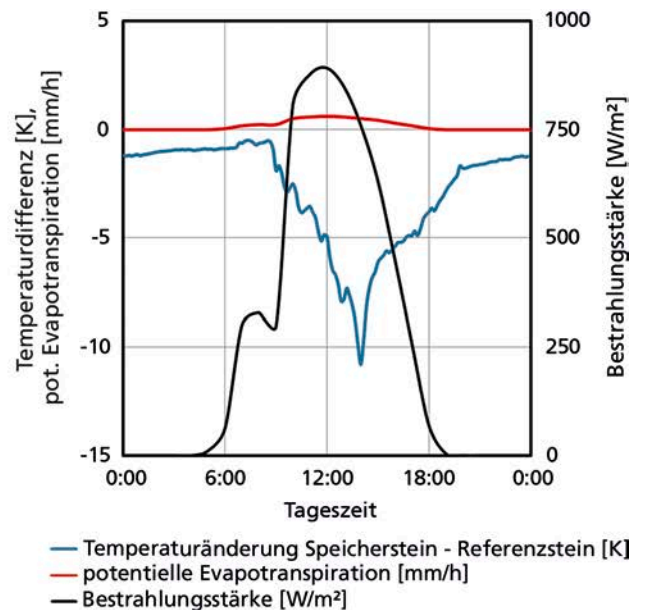
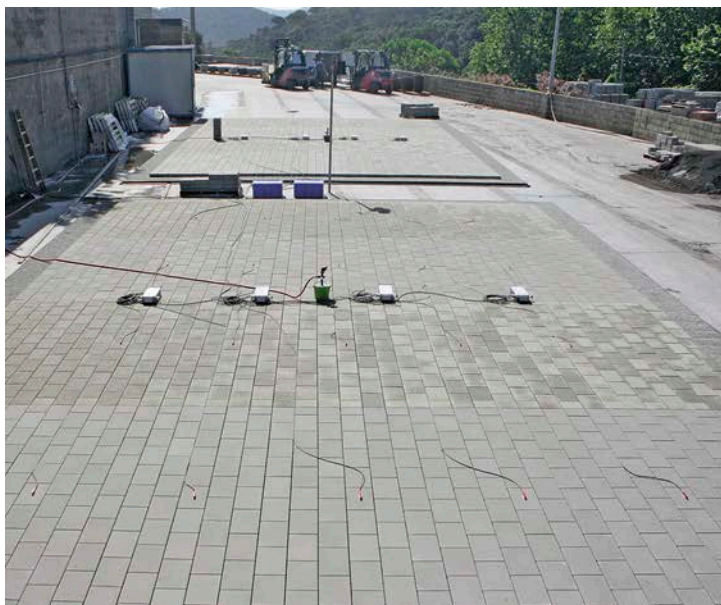


Bild 3. Feldversuch mit unterschiedlich wasserspeichernden Betonpflasterbelägen. (links: Testfeld, rechts: gemessene Temperaturabsenkung eines Speichersteins im Vergleich zu einem Standard-Betonpflaster unter sommerlichen Randbedingungen [11])
 Fig. 3. Field test with different water-storing concrete pavements. (left: test field, right: measured temperature reduction of a storage block compared to a standard concrete pavement under summer boundary conditions [11])



Bild 4. Versuchseinrichtung zur praxisnahen Erwärmungs- und Verdunstungsprüfung von hydroaktiven Bauwerks-oberflächen bei variablen sommerlichen Randbedingungen. (links: Sonnensimulator bei 60 Grad Sonnenhöhenwinkel, rechts: Versuchsfläche)

Fig. 4. Test facility for practical heating and evaporation testing of hydroactive building surfaces under variable summer boundary conditions. (left: sun simulator at a sun elevation angle of 60 degrees, right: test area)

neben der Deckschicht auch alle Schichten im Unterbau dauerhaft durchlässig sein. Aufgrund der dadurch geringeren mechanischen Belastbarkeit erfolgt ein Einsatz nur auf Verkehrsflächen mit geringer Belastung, wie zum Beispiel Anliegerstraßen, Fußgängerzonen, ständig benutzte Parkflächen mit geringem LKW- und Busverkehr, befahrbare Wohnwege [6, 7]. Bislang selten sind Initiativen zur Nutzung der Verkehrsflächen als sommerliche urbane Wärmesenke, zum Beispiel über den Weg der Pufferung von Niederschlägen direkt in Pflastersteinen mit zeitversetzter selbstregelnder Verdunstungskühlung [8]. Während kommerzielle Produkte noch nicht verfügbar sind, zeigen Messungen im Feldversuch, dass je nach Randbedingungen eine Temperaturminderung in der Größenordnung von zehn Kelvin möglich ist (Bild 3). Dies entspricht näherungsweise dem Temperaturunterschied zwischen einer trockenen Betonoberfläche und einer Grasfläche zur Mittagszeit.

Bauwerksoberflächen zur Verbesserung des städtischen Regenwasser- und Temperaturmanagements sind im Bau und Unterhalt meist teurer als konventionelle Ausführungen. Daher setzen sich solche Maßnahmen schneller durch, wenn neben Vorschriften in der Bauleitplanung auch finanzielle Anreize gegeben werden. Ein grundsätzliches Problem ist die Bewertbarkeit der einzelnen Maßnahmen, damit eine ergebnisorientierte Förderung erfolgen kann. Zur Minderung der lokalen Wärmeentwicklung in urbanen Räumen sind bislang kaum quantifizierbare Indikatoren verfügbar. Beim Regenwassermanagement erfolgt eine Bewertung über die Bauwerksoberflächen und deren Ausführungsart. Die inzwischen flächendeckend eingeführte gesplittete Abwassergebühr „bestraft“ die vollständige Versiegelung von Freiflächen mit Niederschlagsgebühren von 0,65 bis 1,9 €/m² · a). Flächen mit wasserdurchlässigen Systemen werden je nach Ausführung und Kommune unterschiedlich berücksichtigt. Laut einer aktuellen Umfrage [9] erfolgt für begrünte Dächer ein Nachlass von meist 50 %, wobei die Bandbreite zwischen 20 und 100

% liegt. Eine direkte Förderung gibt es von einzelnen Kommunen inzwischen für neu angelegte Bauwerksbegrünungen. Die Zuschüsse betragen zwischen 100 und 10 000 € [9], wobei in der Regel maximal 50 % der Herstellkosten gefördert werden.

Es bleibt jedoch das Grundproblem für neue Produktentwicklungen und vermehrte Anwendung: die fehlende Methodik zur Bewertung und Vergleichbarkeit konkurrierender Lösungsansätze, einschließlich der Dauerhaftigkeit. Dieses Defizit ist Anlass für die Weiterentwicklung eines Laborverfahrens zur praxisgerechten und standardisierten Bewertung von hydroaktiven Bauwerksoberflächen unter reproduzierbaren Randbedingungen. Der Versuchsaufbau beruht auf einem Sonnensimulator für transparente Fassaden und Dachbauteile, kombiniert mit einer Waagen-Plattform für Probenflächen von über 5 m². Letztere ist als wasserdichte Wanne ausgebildet, so dass bei Beregnung unterschiedliche Bettungsarten nachgestellt werden können. In Bild 4 ist die Versuchseinrichtung in Arbeitsposition dargestellt. Durch eine Hydraulik können Sonnenhöhenwinkel von 0 bis 90 Grad und die Bestrahlungsstärken zwischen 600 und 1200 W/m² in Probenebene bereitgestellt werden. Die Verwendung eines Arrays aus Tageslichtstrahlern mit Halogen-Metaldampflampen gewährleistet eine hohe Gleichmäßigkeit und ein sonnennahes Spektrum der künstlichen Strahlung. Weitere Klimagrößen wie Temperatur, Luftfeuchte und Wind lassen sich reproduzierbar einstellen.

3 Begrünung von Fassaden

Mit dem „Weißbuch Stadtgrün“ [10] wird das politische Ziel verfolgt, Grün in der Stadt und damit auch begrünte Gebäude bzw. Fassaden zu fördern. Ein naheliegendes Argument ist die effektive mittel- bis langfristige CO₂-Bindung und damit der Beitrag zum Klimaschutz. Bereits heute sind unterschiedliche Systeme für eine Fassadenbegrünung verfügbar und es werden damit mehrere bauphy-

sikalische Nutzeffekte für die urbane Umweltqualität verbunden. Zusätzlich zur Niederschlagsretention, die bereits im vorhergehenden Abschnitt diskutiert wurde, sind Schadstoffreduktion (unter anderem Feinstaub), schalldämmende Eigenschaften und Klimabeeinflussung zu nennen.

Nach Art einer „natürlichen Klimaanlage“ kann die Evapotranspiration durch die Vegetation einen Kühlungseffekt im Sinne einer verminderten sommerlichen Aufheizung bewirken, sozusagen den Hitzestress im urbanen Bereich reduzieren [11]. Vergleichsmessungen von konventionellen und begrünten Fassaden zeigen, dass letztere im Sommer kühlend und im Winter wärmend wirken sowie die Luftfeuchte unmittelbar vor der Wand ausgleichen. So beträgt die Evapotranspiration einer 850 m² großen „Living-Wall“ ca. 1800 l bei entsprechender Kühlleistung [12]. Die Oberflächentemperatur einer Fassade kann durch Begrünung um bis zu 15 K reduziert werden, während die lokale Lufttemperatur vor wand- bzw. bodengebundener Fassadenbegrünung um jeweils 1,3 K bzw. 0,8 K kühler ist als vor unbegrünten Fassaden [13]. In der Horizontalen kann die Temperaturabsenkung sogar höher als bei Speicherpflaster sein. Neben diesen urban wirksamen Effekten verbessern fassadengebundene Begrünungen die resultierende Wärmedämmung und verringern dadurch den Aufwand für die Klimatisierung des Gebäudes. Der Energieverlust im Winter kann um bis zu 50 % reduziert werden [13].

In puncto Luftqualität weisen Modellbetrachtungen [14] eine Minderung von 9 % NO₂ und 13 % PM₁₀ (Particulate Matter ≤ 10 µm) der einströmenden Luftverschmutzung aus, wenn großflächig begrünte Wände unter durchschnittlichen Voraussetzungen in Straßenschluchten platziert werden. Innerhalb der Straßenschlucht sind Minderungswerte bis zu 15 % NO₂ bzw. 23 % PM₁₀ möglich, die bei geringen Windgeschwindigkeiten bis zu ca. 40 % für NO₂ und 60 % für PM₁₀ steigen können. Die modellierte Deposition von PM₁₀ ergab Werte von 6 bis 9 mg/m² bei Windgeschwindigkeiten zwischen 0,5 und 5 m/s [14]. Andere Arbeiten gehen ebenfalls davon aus, dass eine effektive Ablagerung von Feinstaub an Pflanzenoberflächen vor allem bei niedrigen Windgeschwindigkeiten stattfindet [15, 16]. Daten über konkrete Filterungsleistungen von Kletterpflanzen liegen nur vereinzelt vor. Bei Efeu (*Hedera Helix*) sind es zum Beispiel 4 bis 8,4 % des Gesamtstaubs in der Vegetationsperiode bzw. 1,8 bis 3,6 % im Jahr. Davon sind 71 % Partikel kleiner als 15 µm und nur 10 % kleiner als 5 µm [17,18]. In [16] wird für Efeu wiederum eine Feinstaubbindung von bis zu 1,7 kg/(m² · a) an den Blättern angegeben, wobei andere Untersuchungen jedoch zu deutlich abweichenden Werten gelangen [13]. Mit der Dreispitzigen Jungfernebe (*Parthenocissus tricuspidata*) wurde eine Bindung von bis zu 80 % von Metallen aus dem Grobstaub gefunden [19]. All diese Ergebnisse belegen, dass grüne Fassaden eine lokale Reduktion der Staubbelastung bewirken können. Die Angaben reichen von 4 % [20] bis zu Werten zwischen 10 und 20 % [21] und sind vergleichbar mit der „Leistung“ von Straßenbäumen. Die Beispiele zeigen aber auch, dass angesichts von teils verwirrenden Angaben systematische Untersuchungen mit Praxisbezug dringend erforderlich sind. Grundsätzlich ist darauf zu achten, dass die installierten Begrünungseinheiten gut an- bzw. durchströmbar sind. Be-



Bild 5. Dreidimensionale Prüfkörper aus mineralischen Baustoffen und mit Moos begrünt.

Fig. 5. Three-dimensional test specimens made of mineral building materials and planted with moss.

sonders in engen Straßenschluchten wurde in Kombination mit Alleebäumen eine Behinderung der Durchströmung beobachtet, die zu einer Schadstoffakkumulation führen sowie den Austausch der Luftmassen und den Abtransport der Luftverunreinigungen [14, 22] beschränken kann.

Während Dachbegrünungen schon vergleichsweise gut entwickelt und zahlreiche Systeme für unterschiedlichste Aufgaben und Ansprüche bereits am Markt etabliert sind, besteht für Fassadenbegrünungen noch Optimierungsbedarf. Viele Systeme sind anfällig sowie aufwändig bei Installation und Pflege. Eine extensive Begrünung muss mit standortgerechten Pflanzen, wie beispielsweise bei bestimmten Moosen, erfolgen und eine gezielte Steuerung und Förderung der Oberflächenbesiedlung umfassen. Nur so kann auch ein optisch ansprechendes Wachstum erzielt werden, das regelmäßig und homogen verteilt ist. Zugleich fördert sie die heimische Flora und erweitert das Nischenangebot für zahlreiche Tierarten, zumal gerade im urbanen Raum bereits heute ein Naturdefizit besteht. Es ist bekannt, dass sich eine Umwelt mit hoher Biodiversität resilienter gegen das Eindringen von Schädlingen und Krankheitserregern verhält.

Ein Schlüssel zum Erfolg liegt neben innovativer Gestaltung und Umsetzung auch darin, differenziert jeweils die richtigen Pflanzen für die jeweilige Anwendung und Situation auszuwählen. Da sich standortgerechte Pflanzen (überwiegend) selbst versorgen können, ist der Aufwand für die Erhaltung minimal. So weisen Moose mit einer bis zu 30-fachen Oberflächenvergrößerung im Vergleich zur Unterlage eine höhere Feinstaubbindung auf als beispielsweise viele Gräser. Darüber hinaus gibt es Hinweise, dass in einem Moosbestand Luftschadstoffe nicht nur abgesetzt, sondern auch abgebaut werden [23]. Da hierzu jedoch weitere Untersuchungen notwendig sind, wird derzeit eine neue Methode entwickelt, um Moos an Gebäudeoberflächen anzusiedeln. Erste Ergebnisse sind sowohl vielversprechend (Bild 5) als auch wesentlich (Bild 6) für künftige Entwicklungsschritte.

Der Zustand der Prüfaxemplare aus Bild 5 nach der winterlichen Bewitterung im Freiland (Bild 6) verdeutlichen, dass sich an den vor Schlagregen geschützten Oberflächen das Moos etablieren konnte. Der verwendete Baustoff hingegen ist offenbar stark durch Frost-Tauwechsel in Mit-



Bild 6. Prüfkörper nach Bild 5 nach winterlicher Freibewitterung.
Fig. 6. Test specimen according to Fig. 5 after winter outdoor exposure.

leidenschaft gezogen worden. Aus diesen Vorversuchen lässt sich ableiten, dass das gewählte Verfahren grundsätzlich anwendbar ist. In der Anfangsphase, in der die Moospflanzen noch nicht genügend verankert sind, sollte jedoch ein gewisser Schutz vor mechanischer Belastung gewährleistet sein. Bezüglich des Substrates hat sich bestätigt, dass Baustoffoberflächen gute Voraussetzungen für Mooswachstum bieten können. Moos als Fassadenbegrünung ist jedoch nicht nur wegen der möglichen Reduzierung urbaner Feinstaubbelastung interessant. Auch hinsichtlich des Substrats und der Wasserversorgung ist es wesentlich genügsamer als andere Pflanzen [24, 25]. Schließlich inspiriert die Kombination poröser Baumaterialien mit Moos auch die Frage nach einer möglicherweise akustischen Funktionalität.

4 Schallabsorbierende Fassaden

Vor einer funktionalen Erweiterung von Fassaden zur akustischen Beeinflussung insbesondere lärmbelasteter urbaner Räume sei betont, dass dies keinesfalls zu Lasten ihrer Aufgaben als schallschützende Gebäudehülle geschehen darf. Die Praxis zeigt hier unverändert Defizite und Entwicklungsbedarf. Es geht also um den Einklang der Merkmale, um die Fassade akustisch nicht nur als Barriere zwischen urbanem und innerem Raum, sondern als ein Steuerungs- und Gestaltungselement für beide Seiten zu behandeln. Das Potential dazu haben zweifellos viele Fassadensysteme.

In Bezug auf die Hörwahrnehmung im urbanen Kontext steht bei Fassaden einerseits ihr Schall reflektierendes Verhalten im Vordergrund. Nicht nur in ausgeprägten Straßenschluchten verstärken die harten Gebäudeoberflächen alle Schallereignisse. Natürlich wird auch die abschirmende Wirkung von Gebäuden gern zur Kenntnis genommen. Vor einer Erweiterung und Vertiefung dieser Überlegungen ist jedoch die Frage zu beantworten, warum gerade die Fassaden vermehrt und gezielt zur akustischen Stadtgestaltung herangezogen werden sollen. Die unverändert hohe Anziehungskraft der Städte führt auch zu einer steigenden akustischen Beanspruchung der urbanen Systeme und Strukturen. Nach schwer zu revidierenden historischen Entscheidungen in der Stadt- und Verkehrsplanung sind heute die deutlich hörbaren Folgen des unbändigen

Mobilitätsbedarfs und der aktuellen Trends zur Nachverdichtung und Mischnutzung in Städten zu spüren. Dazu hat sich der allgegenwärtige urbane Lärm zu einem zentralen Faktor der empfundenen und tatsächlichen Umwelt- und Lebensqualität entwickelt. Natürlich kann die akustische Funktionalisierung von Fassaden diese Probleme nicht im Alleingang lösen. Um den Nachweis und die Wirtschaftlichkeit akustischer Fassadenfunktionen für den urbanen Raum aufzugreifen, ist eine systematische Betrachtung der erste Schritt. Die praktisch relevanten akustischen Kategorien lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Schallerzeugung/Schallabstrahlung: Es mag nicht als erstrangiges Problem erscheinen, aber dennoch gehen heute von Fassaden erhebliche und vor allem völlig überflüssige Geräusche aus. Lüftungsöffnungen, bewegliche Sonnenschutzsysteme oder Windgeräusche an achtlos gestalteten, aber offenbar aeroakustisch sensiblen Fassadenelementen sind dabei nur einige Beispiele, die vermeidbar zur Lärmexposition beitragen.
- Schallschirmung/Schallbeugung: Diese Begriffe sind wesentlich für die bereits genannte abschirmende Wirkung von Gebäuden im urbanen Umfeld. Hier bietet sich die Möglichkeit der gezielten Einflussnahme auf die Ausbreitung urbanen Schalls durch strukturierte Fassaden, Balkone und dergleichen.
- Schallreflexion/Schallstreuung: In einem unlösbaren Gesamtzusammenhang mit Schirmung und Beugung stehen in urbanen Gebäudekonstellationen die Reflexion und Streuung an den Fassadenoberflächen. Gemeinsam tragen sie zur Verstärkung und Verteilung des Schalls bis in den „letzten Winkel“ bei. Im Gegenzug besteht jedoch eine große Vielfalt an Elementen, Strukturen und auch urbanem Gestaltungsspielraum, um den Schall bewusst in weniger empfindliche Bereiche zu lenken, auch wenn er sich damit nicht aufhalten oder absorbieren lässt.
- Schallabsorption: Die echte Reduzierung von einmal erzeugter Schallenergie ermöglicht einzig die Absorption oder Dissipation von Schallwellen, wenn sie auf entsprechende Oberflächen treffen. Materialien, Schichten und Strukturen sowie auch Öffnungen und Lücken bieten hierfür zahlreiche Möglichkeiten, ohne eine neue Fassade erfinden zu müssen. Nahezu alle Fassadentypen können funktional auf- oder umgerüstet werden, um durchaus hohe Schallabsorptionsgrade zu erreichen.

Als konkretes Beispiel für eine mögliche Umrüstung soll hier die „vorgehängte, hinterlüftete Fassade“ (VHF) dienen. Vielfach zur Verbesserung der Energieeffizienz erprobt, zeichnen sich VHF durch hohe Gestaltungsvielfalt aus, sind bei Bauherren und Architekten akzeptiert und an sich unproblematisch in Bezug auf bauphysikalische Funktionalität (Feuchte-, Wärme-, Brandschutz). Durch geringe Modifikationen ließe sich eine offenporös ausgeführte wärmedämmende Schicht auch zur Absorption von Schall nutzen. In Innenräumen und auf Lärmschutzwänden reichen dafür meist wenige Zentimeter dicke Schichten ohne oder hinter gelochten Schutzabdeckungen. Die zielführende Umsetzung in die Praxis setzt jedoch Kenntnisse des optimalen Verhältnisses von Strömungswiderstand und anderen Eigenschaften der (äußeren) Schichten voraus. Bild 7 zeigt schematisch einen Fassadenaufbau mit schall-

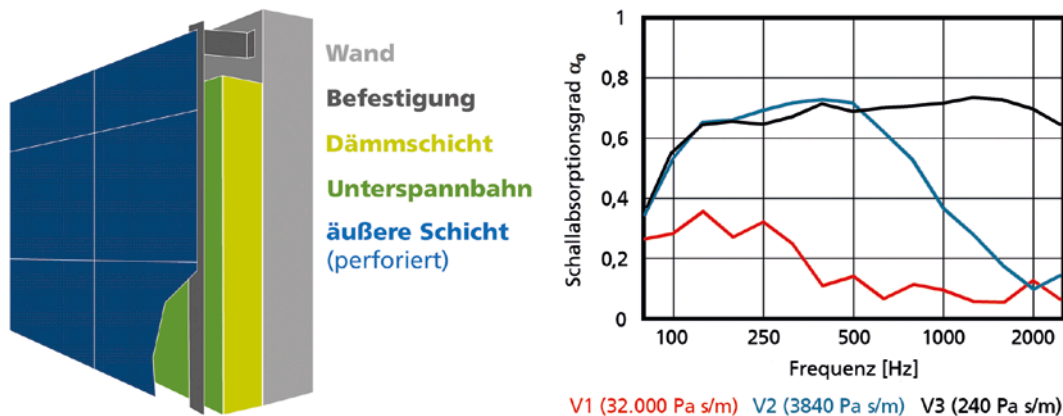


Bild 7. Akustisch modifizierte, vorgehängte hinterlüftete Fassade, schematischer Aufbau (links) und gemessener Schallabsorptionsgrad bei senkrechtem Schalleinfall und Verwendung von drei Unterspannbahnen mit unterschiedlichen Strömungswiderständen (rechts).

Fig. 7. Acoustically modified, rear-vented curtain façades, schematic structure (left) and measured sound absorption coefficient at vertical sound incidence and the use of three underlays with different flow resistances (right).

durchlässiger (zum Beispiel perforierter) Außenlage sowie dessen Schallabsorption bei Verwendung von drei unterschiedlichen Unterspannbahnen vor dem Dämmstoff. Der zentrale Unterschied besteht im Strömungswiderstand der Unterspannbahn-Varianten, die natürlich unverändert die nach DIN EN ISO 13859 [26] geforderten Merkmale erfüllen müssen. Anhand der Schallabsorptionsgrade, bei senkrechtem Schalleinfall im Impedanzrohr gemessen, zeigt sich der Effekt geschickter Modifikation einzelner Parameter. Werden typische innerstädtische Lärmspektren herangezogen, lassen sich nicht nur mit der Variante V3 in Bild 7 hochabsorbierende Lärmschutzfassaden erreichen.

Ausgehend von dieser Schallabsorptionswirkung kann deren Wirkung auf das urbane Umfeld berechnet und bewertet werden. Die heute verfügbaren, vielfach validierten und standardisierten Berechnungswerkzeuge sind dafür zwar noch nicht in allen Belangen ausgestattet, können aber dennoch belastbare Anhaltspunkte liefern. Zur exemplarischen Quantifizierung des Potentials dient die in Bild 8 dargestellte Bebauungssituation mit parallel zur Quelle (Autobahn, dunkelblauer Bereich rechts unten)

ausgerichteten Gebäuden, flankiert von dazu senkrecht positionierten Gebäuden und einer Nebenstraße. Die standardisierten frequenzabhängigen Berechnungen erfolgten nach DIN ISO 9613-2 [27], die Straße (Verkehrszahlen) wurde als Linienquelle in Oktavbändern mit Geräuschspektren aus Vorbeifahrtmessungen charakterisiert. Geometrie und Topologie beruhen auf realen, im Detail etwas vereinfachten Daten, und die Fassaden wurden rechnerisch mit schallabsorbierendem Material bekleidet. Die Ergebnisse ermöglichen den Vergleich von schwacher Absorptionswirkung, also beispielsweise einem normalen Außenputz, und hoch absorbierendem Material, wie zum Beispiel mit der Schichtvariante 3 nach Bild 7. Die Pegelunterschiede sind klar erkennbar und betreffen nicht nur die einzelnen Punkte (bezahlte Pegelwerte), sondern beachtliche Bereiche des Gebietes.

Natürlich stellen sich noch einige Fragen, unter anderem nach dem Vergleich mit Lärmschutzwänden oder nach den Zusatzkosten. Die Antworten werden differenziert ausfallen und zu konkreten Vor- und Nachteilen je nach Situation führen. Mit Blick in die Zukunft gilt es also

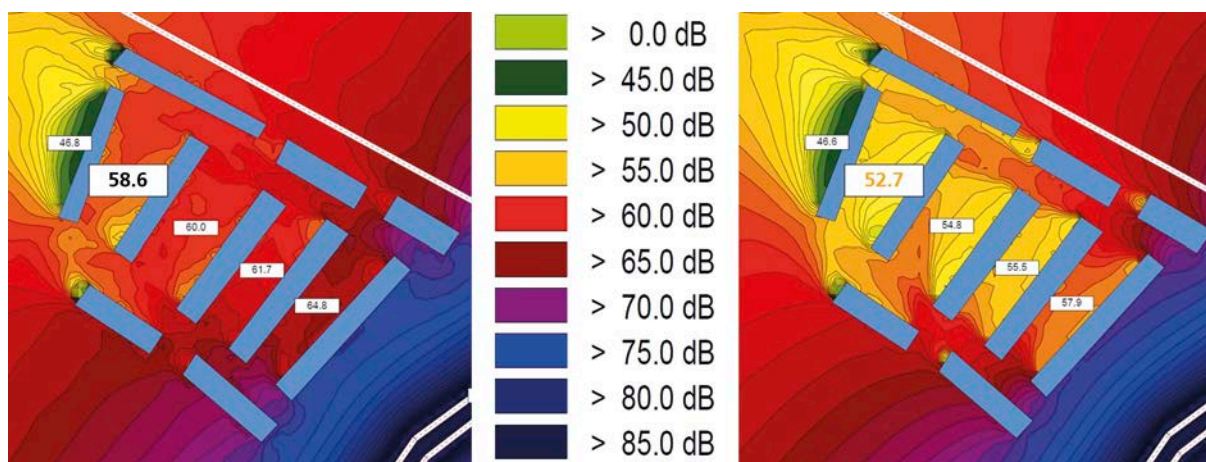


Bild 8. Schallimmissionsberechnung mit gering (links) und hoch (rechts) schallabsorbierenden Fassaden der Gebäude. Die Einzahlwerte in den Karten sind Schalldruckpegel (Summenpegel in dB(A)) an ausgewählten Punkten.

Fig. 8. Sound immission calculation with low (left) and high (right) sound-absorbing façades of buildings. The individual values in the maps are sound pressure levels (total level in dB(A)) at selected points.



Bild 9. Versuchsfläche mit 30 verschiedenen Testflächen auf dem Freilandversuchsgelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP (links) und Beispielflächen mit schematischer Schmutzverteilung (rechts)

Fig. 9. Test area with 30 different test areas on the field test site of the Fraunhofer Institute for Building Physics IBP (left) and example areas with schematic dirt distribution (right)

mehr denn je, die akustischen Umgebungseinflüsse in nahezu allen, auch in den urbanen Lebensräumen, zu erkennen, zu bewerten und geeignet zu behandeln. Dabei ist es ratsam, nicht einzelne Aspekte oder Lebensräume hervorzuheben, sondern eine nachhaltige Gesamtbilanz in den Vordergrund zu stellen, wobei akustisch wirksame Fassaden ein bislang vernachlässigtes Gestaltungselement repräsentieren.

5 Reinigung von Verkehrs- und Freiflächen

Bei der Planung von Verkehrs- und Freiflächen, wie Gehwegen und Fußgängerzonen, werden Aufwand und Effizienz für Reinigung und Instandhaltung viel zu selten berücksichtigt. Dies fällt bei größeren Beständen besonders ins Gewicht, zumal einige umweltbelastende Reinigungsverfahren nicht mehr angewendet werden dürfen. Letztlich geht es auch bei dieser Thematik um eine ganzheitliche Betrachtung der Bewirtschaftung. Die Bedeutung der Materialität der Oberflächen für Reinigungsaufwand und -erfolg war Gegenstand eines aktuellen Projektes. In einem bislang einzigartigen Versuchsaufbau im Freiland dienten dazu 30 verschiedene Betonpflastersteine, verlegt auf einer

Fläche von ca. 400 m² (Bild 9). Über eine Dauer von drei Jahren wurden die einzelnen Flächen nach einem festgelegten Versuchsplan wiederholt verschmutzt und im Anschluss mit kommunaler Reinigungstechnik maschinell gereinigt. Für die Verschmutzung wurden fünf typische Schmutzarten aus Innenstädten verwendet: Cola, Kaugummi, Motoröl, Taubenkot und Ketchup. Bild 9 zeigt eine beispielhafte Versuchsfläche und die Schmutzaufteilung.

Aus den durchgeführten Untersuchungen geht klar hervor, dass die Reinigungsfähigkeit von Pflastersteinen im Wesentlichen durch zwei Merkmale bestimmt wird: Die Qualität der Pflastersteine, beispielsweise definiert durch Betonzusammensetzung und Betonverdichtung, und die Oberflächenbehandlung der Steine während der Produktion. Je dichter das mineralische Betongefüge durch eine optimierte Rezeptur gestaltet wird, desto weniger stark können vor allem flüssige Verschmutzungen wie Öle in den Stein eindringen und Flecken hinterlassen (Bild 10).

Eine Oberflächenbehandlung wie „Schleifen“ oder „Strahlen“ sorgt dafür, dass die poröse Struktur des Betons „geschlossen“ wird. Verschmutzungen können dadurch weniger tief in das Betongefüge eindringen und einen schwächeren Haftverbund mit der Oberfläche eingehen. Öl und Kaugummi sind die Schmutzarten, welche am schwierigsten zu reinigen waren. Bei den Schmutzarten Ketchup, Cola und Taubenkot gab es jedoch jahreszeitlich bedingte Besonderheiten. So neigen Cola und Ketchup bei sehr heißem und trockenem Wetter dazu, auszutrocknen und einen sehr festen Haftverbund mit den Steinoberflächen einzugehen. Diese Flecken konnten in Einzelfällen selbst mit der Nassreinigung nicht in einem Arbeitsschritt von den Pflastersteinen entfernt werden (Bild 11). Zudem können Ketchup und Taubenkot deutlich sichtbare Ätzflecken auf den Pflastersteinen hinterlassen (Bild 11). Durch Witterungseinflüsse verschwanden diese Ätzflecken im Laufe einiger Wochen zwar wieder, jedoch stellen sie in den ersten Tagen einen optischen Makel dar.

Die verschmutzten Steine wurden mit einer Kleinkehrmaschine trocken (Tellerbesen mit Kunststoff-Stahlmischborstung) und nass (Schrub-Bürsten mit Kunststoffborsten) gereinigt. Mit der Nassreinigung (57,9 %) konnten leicht bessere Reinigungsergebnisse als mit der Trockenreinigung (54,9 %) erreicht werden. Die Zahlen geben an, wieviel Prozent des gesamten aufgetragenen Schmutzes durch die jeweilige Reinigungsmethode entfernt werden konnte. Dabei ist zu beachten, dass Kau-



Bild 10. Ölfleck auf einem Pflasterstein mit beschichteter Oberfläche (links) und unbehandelter Oberfläche (rechts) etwa zehn Minuten nach dem Aufbringen.

Fig. 10. Oil stain on a paving stone with coated surface (left) and untreated surface (right) about ten minutes after application.



Bild 11. Hartnäckige Flecken von Cola nach Reinigung (links) und Ätzflecken durch Ketchup und Taubenkot (rechts).

Fig. 11. Persistent stains of coke after cleaning (left) and etching stains from ketchup and pigeon excrements (right).

gummi mit den gewählten Reinigungsmethoden lediglich zu maximal 30 % von den Pflasteroberflächen entfernt werden konnte.

Oberflächenschutzsysteme, die während der Steinproduktion aufgetragen werden, können die Reinigungsfähigkeit von Betonpflasterflächen zusätzlich verbessern. Bild 12 zeigt ölverschmutzte Flächen mit und ohne Oberflächenschutz. Auf Pflastersteinen mit Oberflächenschutz kann Öl kaum in den Stein eindringen und lässt sich daher besser reinigen. Zudem sorgt ein Oberflächenschutz für eine beschleunigte natürliche Reinigung durch Regen, Wind und UV-Strahlung.

Während des Projektes wurde auch eine mögliche Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit der Steine überwacht. Dazu diente eine Messung der Griffigkeit der Pflastersteine mittels SRT-Pendel (Skid-Resistance-Tester) in regelmäßigen Abständen. Die erhobenen Daten zeigen jedoch, dass allein durch die maschinelle Reinigung keine messbare Beeinflussung der Pflasteroberflächen stattfindet.

Eine weitere Fragestellung für die Versuche war der Einfluss verschiedener Fugensysteme. Neben der üblichen Verfüllung mit Sand wurde eine zement- und eine epoxidharzbasierte Fuge bei einzelnen Flächen verwendet. Es zeigte sich, dass eine feste Verfugung ein sehr wirksames Mittel zur „Bekämpfung“ von Wildkraut ist. Insbesondere

an schwer zu bearbeitenden Stellen, wie etwa an Fahrradständern oder Bushaltestellen, resultiert daraus eine signifikante Reduzierung des Reinigungsaufwands.

Mit diesen Versuchseinrichtungen, mit der Methodik und den ersten Ergebnissen für Betonpflastersteine eröffnen sich Möglichkeiten, die Aspekte Reinigung, Instandhaltung und letztlich Bewirtschaftung von Anfang an in die Auswahl und Planung urbaner Oberflächen einzubeziehen. Aber auch für die gezielte Entwicklung anspruchsvoller und dauerhafter Materialien und Bauteile sind die Voraussetzungen geschaffen. Die Erweiterung auf Natursteine und andere Werkstoffe, die Bewertung material- und umweltgerechter Reinigungsverfahren sowie Überlegungen zu korrosionsfreien, ökologisch verträglichen Enteisungsmitteln bieten wissenschaftliche und technologische Ansatzpunkte.

6 Bewirtschaftung und Ökobilanz

Um auch die Nachhaltigkeit der gerade an einem Beispiel erläuterten Prozesse, wie Reinigung und Instandhaltung urbaner Oberflächen, konkret zu quantifizieren, bietet sich das Instrumentarium der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und 14044 an. Für die damit verbundenen Stoffstrom- bzw. Materialflussanalysen müssen einerseits sämtliche Input- und Output-Flüsse nach Art und Menge bilanziert werden [28]. Andererseits entstehen überall dort, wo Materialien oder Energie eingesetzt werden, Umweltwirkungen, die zu erfassen und zu bewerten sind, um auch mögliche Optimierungsansätze verfolgen zu können. Der Kreislaufführung insbesondere der relevanten Stoffströme kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Neben den meist unterirdisch verlaufenden Stoff- und Energieströmen zur Versorgung, wie zum Beispiel Wasser, Abwasser, Wärme, Strom und dergleichen, spielen auch diejenigen Stoffströme eine Rolle, die an, auf oder durch urbane Oberflächen entstehen und bewirtschaftet werden müssen. Für kommunale Oberflächen, wie sie auch in Bild 2 genannt sind, ist in der Regel der Bauhof oder die Abfallwirtschaft zuständig. Ihre Aufgaben umfassen die Unterhaltung, Pflege und Reinigung aber auch die Durchführung des Winterdienstes. Dafür werden unterschiedliche Betriebsstoffe benötigt, wie Reinigungsmittel oder Streusalz im Winter. Die zum Teil erheblichen Stoffmengen müssen beschafft, gelagert, transportiert, auf- und abgetragen und gegebenenfalls gereinigt und recycelt werden.



Bild 12. Vergleich von Ölflecken auf Flächen ohne (links) und mit (rechts) Oberflächenschutz.
Fig. 12. Comparison of oil stains on surfaces without (left) and with (right) surface protection.



Bild 13. Verknüpfung von Stoffstromanalyse und GIS-Datenbanken (angelehnt an [32]).

Fig. 13. Linking material flow analysis and GIS databases (based on [32]).

Allein unter dem ökologischen Aspekt und mit Blick auf die Ressourceneffizienz sind Anknüpfungspunkte für detaillierte Bilanzierung und Optimierung gefragt. Zugleich wachsen die Anforderungen an das kommunale Flächenmanagement durch die Auswirkungen des Klimawandels.

Ein mehr und mehr geeignetes Werkzeug für die räumliche und zeitliche Analyse urbaner Stoffströme bietet die Verbindung von Materialflussanalyse mit Geographischen Informationssystemen (GIS). In [30] sind diese Möglichkeiten der Verknüpfung für das „Urban Mining“ identifiziert worden. Räumliche Informationen zu wertvollen Beständen von recycelbaren Materialien werden im städtischen Bereich analysiert und gemessen sowie in GIS-Datenbanken gespeichert. Zudem ist es möglich mit Geographischen Informationssystemen die urbanen Hotspots solcher Materialien aufzuzeigen und über Karten zu visualisieren. Die Ähnlichkeit zu einer Anwendung von GIS für die Stoffstromanalyse urbaner Oberflächen und deren Bewirtschaftungsprozesse erscheint naheliegend. Optimierungspotential ergibt sich durch Flächen-, Energie- und Ressourceneffizienz sowie durch die Reduktion von Emissionen und Abfällen, wie etwa bei der Verwertung von organischen Abfallströmen als Biomasse in Heizkraftwerken. Im Idealfall lassen sich Energie- und Stoffkreisläufe urbaner Oberflächen sogar schließen. Mittels GIS können jedenfalls die Quellen und Senken der Stoffströme urbaner Oberflächen sowohl räumlich als auch zeitlich genau analysiert werden [31]. In entsprechenden GIS-Datenbanken können diese Informationen mit statistischen, sozio-ökonomischen, demographischen und kommunalen Daten (städtische Infrastruktur) verknüpft werden (Bild 13). Neben Stadtgrenzen, Art und Ort urbaner Oberflächen zählen dazu Bewirtschaftungsprozesse, Landbedeckungs- und Landnutzungsinformationen sowie topographische Informationen. So ergibt sich eine Datengrundlage der relevanten Stoffströme der kommunalen urbanen Oberflächen.

Eine solchermaßen integrierte Datenanalyse mit GIS ermöglicht somit die räumliche Simulation von Stoffstromszenarien, die Modellierung verschiedener Standorte, die Bewertung von Transportrouten und eine regelrechte Strategieplanung im Sinne des Stoffstrommanagements. Angesichts der fortschreitenden Digitalisierung werden damit konkrete Handlungsempfehlungen für den täglichen kommunalen Gebrauch geschaffen. Als beson-

dere Aussicht für informative, kommunikative und partizipative Prozesse ist die verständliche Visualisierung nicht zu unterschätzen.

7 Ausblick

Die Herausforderungen der urbanen Systeme sind zwar nicht in allen Städten gleichermaßen ausgeprägt, die Betroffenheit der elementaren urbanen Strukturen ist aber überall vorzufinden – ob Metropole oder Kleinstadt, ob wachsende oder schrumpfende Stadt. Dazu zählen auch die chronischen und akuten Folgen der Klimaveränderung auf lokaler Ebene, wie beispielsweise Wassermangel oder Überflutung, ungewöhnlich heiße und kalte Wetterlagen, Hitzeinseln und Dunstglocken. Bei der Reaktion und Transformation der Städte werden die urbanen Oberflächen eine wesentliche Rolle spielen und ihr bauphysikalischer Wirkungsgrad ist deutlich größer als bislang ausgeschöpft. Künftig sind Innovationen und Investitionen genauso erforderlich wie Regeln, Anreize und Informationen. Die dargestellten Aspekte und Beispiele zeigen, dass die Bauphysik urbaner Oberflächen dazu wertvolle Beiträge leisten kann.

Danksagung

In diesem Beitrag werden Ergebnisse aus mehreren Projekten vorgestellt. Das Projekt „Bauphysikalische Gestaltung urbaner Oberflächen für nachhaltige Lebens- und Umweltqualität in Städten – BUOLUS“ wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF gefördert. Zugleich gilt der Dank der Gips-Schüle-Stiftung Stuttgart für die wertvolle Unterstützung.

Literatur

- [1] DIN 1986-100:2016-12, Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke – Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056.
- [2] Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung: Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte. Herausgeber Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). April 2015, Bonn.

- [3] DWA Regelwerk Arbeitsblatt DWA-A 102 Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. Entwurf 10-2016. DWA Hennef.
- [4] Städtebauliche Klimafibel: Hinweise für die Bauleitplanung. Herausgeber Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg. Neuauflage 2012, Stuttgart.
- [5] Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Außenanlagen von Bundesliegenschaften. Herausgeber Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. 2012, Berlin.
- [6] *Borgwardt, S., Gerlach, A., Köhler, M.*: Versickerungsfähige Verkehrsflächen. Springer Verlag. 2000. Berlin.
- [7] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. Herausgeber Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. 2012. Köln.
- [8] *Würth, M.* et al.: Self cooling concret Pavers – Entwicklung eines Betonpflasters mit integriertem Wasserspeicher. Fraunhofer IBP Bericht HTB-14/2014, Stuttgart.
- [9] Förderumfrage des Fachverbands Bauwerksbegrünung e.V. 2016, Webseite <http://www.gebaeudegruen.info/aktuelles/news/details/news/ergebnisse-der-foerder-umfrage-dach-und-fassadenbegrueung-2016-liegen-vor/>, Abruf 2/2017.
- [10] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg., 2017): Weißbuch Stadtgrün. Grün in der Stadt – Für eine lebenswerte Zukunft. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Referat SW I 7, Berlin.
- [11] *Wilhelm, X.*: (2017) Klimaanpassung durch städtisches Grün und Wasser. GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis 138(2): 138-144.
- [12] *Scharf, B.*: (2012) Beitrag zum Klimaschutz oder teure Dekoration? Garten + Landschaft 5/2012: 24–27.
- [13] Magistrat der Stadt Wien (Hrsg.) (2013): Leitfaden Fassadenbegrünung.
- [14] *Pugh, T. A. M., MacKenzie, A. R., Whyatt, J. D., Hewitt, C. N.*: (2012) Effectiveness of Green Infrastructure for Improvement of Air Quality in Urban Street Canyons. Environ. Sci. Technol. 46: 7692–7699.
- [15] *Reznik, G., Schmidt, E.*: (2009) Immissionsminderung durch Pflanzen – Abscheidung und Abwaschung von Feinstaub an Efeu. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 69(10): 434–438.
- [16] *Thönnessen, M.*: (2007) Staubfilterung durch Gehölzblätter. Beispiele aus Düsseldorf, Essen und Köln. In: Endlicher, W., Gorbachevskaya, O., Kappis, C., Langner, M. (Hrsg.), Tagungsband zum Workshop über den wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterpotential (qualitativ und quantitativ) von Pflanzen am 1. Juni 2007 in Berlin-Adlershof. Berliner Geographische Arbeiten 109: 13-26.
- [17] *Bartfelder, F., Köhler, M.*: (1987) Experimentelle Untersuchungen zur Funktion der Fassadenbegrünung. Technische Universität Berlin, Fachbereich Landschaftsentwicklung. pp. 612.
- [18] *Gorbachevskaya, O., Herfort, S.*: (2012) Feinstaubbindungsvermögen der für Bauwerksbegrünung typischen Pflanzen. Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e. V. (FBB), Saarbrücken: pp. 31.
- [19] *Broadmeadow, M., Beckett, P., Jackson, S., Freer-Smith, P., Taylor, G.*: (1998) Trees and Pollution Abatement. In: Forest Research Organisation (Hrsg.): Forest Research Annual Report and Accounts 1997 – 98: 41–45.
- [20] *Gorbachevskaya, O., Schreiter, H., Kappis, C.*: (2007) Wissenschaftlicher Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterpotential von Pflanzen (qualitativ und quantitativ) – Ergebnisse der Literaturstudie. In: Endlicher, W., Gorbachevskaya, O., Kappis, C., Langner, M. (Hrsg.): Tagungsband zum Workshop über den wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterpotential (qualitativ und quantitativ) von Pflanzen am 1. Juni 2007 in Berlin/Adlershof. Berliner Geographische Arbeiten 109: 71–81.
- [21] *Scheuermann, R., Armour, T., Pauli, M., Law, A.* (Hrsg.): (2016) Cities Alive. Green Building Envelope. Arup Deutschland GmbH, Berlin.
- [22] *Flohr, S.*: (2010) Untersuchungen zum Fangvermögen von Mittel- und Feinstaub (PM10 und PM2.5) an ausgesuchten Pflanzenarten unter Berücksichtigung der morphologischen Beschaffenheit der Blatt und Achsenoberflächen und der Einwirkung von Staubauflagen auf die Lichtreaktion der Photosynthese. Dissertation, Universität Duisburg-Essen.
- [23] *Frahm, J.-P., Sabovljevic, M.*: (2007) Feinstaubreduzierung durch Moose. Immissionsschutz 4/2007: 152–156.
- [24] *Hofbauer, W., Forrest, L.L., Hollingsworth, M.L., Rennebarth, T., Breuer, K.*: (2014) Unerwartete Vielfalt bei Moosen an modernen Gebäuden. IBP-Mitteilung 41 (2014)/532.
- [25] *Hofbauer, W. K., Forrest, L. L., Hollingsworth, P. M., Hart, M. L.*: (2016) Preliminary insights from DNA barcoding into the diversity of mosses colonising modern building surfaces. Bryohyete Diversity & Evolution 38(1): 1–22.
- [26] DIN EN ISO 13859 Abdichtungsbahnen – Definitionen und Eigenschaften von Unterdeck- und Unterspannbahnen – Teil 1: Unterdeck- und Unterspannbahnen für Dachdeckungen
- [27] Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien – Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren
- [28] *Ayres, R. U., Ayres, L.*: (2002) A Handbook of Industrial Ecology. Online unter http://pustaka.unp.ac.id/file/abstrak_kki/EBOOKS/A%20Handbook%20of%20Industrial%20Ecology.pdf#page=100, zuletzt geprüft am 15.05.2018.
- [29] *Bai, X.*: (2016) Eight energy and material flow characteristics of urban ecosystems. In: Ambio 45 (7), S. 819–830. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0785-6>.
- [30] *Zhu, X.*: (2014) GIS and Urban Mining. In: Resources 3 (1), S. 235–247. <https://doi.org/10.3390/resources3010235>.
- [31] *Shafie, F. A., Omar, D., Karuppannan, S. Shariffuddin, N.*: (2016) Urban-scale Material Flow Analysis for Cities in Greater Kuala Lumpur, Malaysia. In: Procedia – Social and Behavioral Sciences 234, S. 424–433. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.10.260>.

Autoren dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner, philip.leistner@ibp.fraunhofer.de
 M. Eng. Andreas Kaufmann, andreas.kaufmann@ibp.fraunhofer.de
 M. Bp., Dipl.-Ing. (FH) Mark Koehler, mark.koehler@ibp.fraunhofer.de
 Dipl.-Ing. Michael Würth, michael.wuerth@ibp.fraunhofer.de
 Dr. rer. nat. Wolfgang Karl Hofbauer, wolfgang.hofbauer@ibp.fraunhofer.de
 Dr. rer. nat. Sebastian Dittrich, sebastian.dittrich@ibp.fraunhofer.de

Alle:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
 Institut Stuttgart
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
www.ibp.fraunhofer.de

M. Sc., Dipl.-Biol. Stephanie Maier, stephanie.maier@iabp.uni-stuttgart.de
 M. Sc. Antonia Gordt, antonia.gordt@iabp.uni-stuttgart.de
 Dipl. oec. Michael Jäger, michael.jaeger@iabp.uni-stuttgart.de

Alle:

Universität Stuttgart, Institut für Akustik und Bauphysik
 Pfaffenwaldring 7, 70569 Stuttgart
www.iabp.uni-stuttgart.de