

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht HTB-025/2017

Potentiale von Gebäudehüllen zur Reduzierung der Hitzeentwicklung und der Verbesserung der Luft- qualität im urbanen Kontext

Kurzstudie im Auftrag des Bundesverbands
energieeffiziente Gebäudehülle e.V. BUVEG.

Der Bericht umfasst
37 Seiten Text
3 Tabellen
9 Abbildungen

Prof. Dr. Hartwig Künzel
Dr. Wolfgang Hofbauer
Dr. Christian Scherer
Christoph Mitterer

Valley, 5. Oktober 2017

Abteilungsleiter



Prof. Dr. Hartwig Künzel

Bearbeiter



Dr. Wolfgang Hofbauer

Bearbeiter



Christoph Mitterer

Inhalt

1	Einführung	4
2	Ansatz und Aufbau der Studie	5
3	Herausforderungen im Fokus dieser Studie	6
3.1	Urbane Hitze	6
3.2	Luftschadstoffe	8
4	Bautechnische Lösungsansätze	12
4.1	Reflektierende Oberflächen	14
4.2	Wärme- und Feuchtespeicherstrategien	15
4.3	Technologien zur Beseitigung von Luftschadstoffen	16
5	Gebäudebegrünung	18
5.1	Bestehende Systeme der Fassadenbegrünung (Auswahl)	19
5.2	Neue Entwicklungen (Beispiele)	19
5.3	Mikroklima: Einfluss auf die Oberflächen- und Umgebungstemperatur	21
5.4	Einfluss auf die Luftqualität	21
5.5	Weitere Wirkungen der Fassadenbegrünung	23
5.5.1	Wasserabfluss / Retention	23
5.5.2	Lärminderung	23
5.5.3	Biodiversität	23
5.5.4	Biophiles Design	23
5.5.5	Weitere Nutzeffekte durch Fassadenbegrünung	24
5.6	Kosten der Gebäudebegrünung	24
6	Implementierung	25
6.1	Verfügbarkeit der Technologien	25
6.2	Bestehende Hemmnisse	25
6.3	Beurteilung, und Erprobung und Demonstration	26
6.3.1	Simulationsmodelle zur Analyse möglicher Lösungsstrategien	26
6.3.2	Maßgeschneiderte Klimasimulation	28
6.4	Weiterführende Forschung	30
7	Fazit	30
7.1	Potentiale bautechnischer Lösungen	30
7.2	Potentiale der Gebäudebegrünung	31

8	Bildverzeichnis	33
9	Tabellenverzeichnis	34
10	Literatur	35

1 Einführung

Die Schadstoffbelastung der Luft in deutschen Großstädten ist im Sommer 2017 ein vorherrschendes Thema in Nachrichtensendungen. Bei Messungen an vielbefahrenen Straßen werden Grenzwerte der Luftqualitätsnormen regelmäßig überschritten. Ein Großteil der Emissionen wird durch den Straßenverkehr verursacht, und Diesel-Fahrzeuge stehen dabei aufgrund der Feinstaub- und NO_x -Emissionen besonders in der Kritik. Städte sehen sich mit Klagen zur Einhaltung der Luftreinhaltung konfrontiert, und Fahrverbote für Diesel-Fahrzeuge werden in besonders betroffenen Städten wie Stuttgart und München diskutiert. Eine Entschärfung der städtischen Verkehrsbelastung ist nicht in Sicht – im Gegenteil: Die Zahl der Berufspendler erreicht im selben Zeitraum einen neuen Rekordwert. Ein Grund sind die hohen Miet- und Immobilienpreise in den Metropolen. Ungeachtet dessen setzt sich in Deutschland die städtebauliche Innenraumentwicklung, die von Nachverdichtung und Mischnutzung geprägt ist, fort. Weltweit hält der Trend wachsender Städte an. Dadurch ist zu erwarten, dass sich bereits bestehende Problemfelder weiter verstärken und innovative Lösungen gefragt sind.

Neben der mangelnden Luftqualität sind Bewohner von Städten zunehmend auch geplagt von extremen Wetterereignissen in Folge der Klimaveränderung. So sagt zum Beispiel das New York Panel on Climate Change voraus, dass in New York die Durchschnittstemperatur bis 2050 um 2,3 – 3,2 °C steigen wird, dadurch werden dort dreimal so viele Hitzewellen als bisher stattfinden [1]. Auch für städtische Gebiete in Mitteleuropa zeigen Klimaprojektionen für die kommenden Jahrzehnte eine Erhöhung der Wärmebelastung. Die mittlere Anzahl der jährlichen Sommertage wird voraussichtlich (abhängig vom Klimaszenario) um 20-50 Tage, im Vergleich zum Zeitraum von 1971 bis 2000, zunehmen. [2] Eine Studie zur Thematik Klimaveränderung in der Stadt Bochum [3] gibt an, dass die Anzahl der Sommertage ($T \geq 25 \text{ °C}$) und der Tropennächte (nicht unter 20 °C) bereits in den letzten 100 Jahren um 150 % gestiegen ist und dass erwartet wird, dass es in den nächsten 50 Jahren nochmals zu einem Anstieg von über 200 % kommt. Somit steigt die Anzahl der extremen Temperaturereignisse von 4 Tagen (vor 100 Jahren) auf erwartete 31 Tage bis ins Jahr 2060. Die Studie „Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Berlin – AFOK – Zusammenfassung“ [4] besagt, dass die durchschnittliche Temperatur in Berlin in der nahen Zukunft (bis 2060) um ca. 1,2 °C und um bis zu 3,2 °C in der fernen Zukunft (bis 2100) ansteigen wird. Des Weiteren werden die Starkregenereignisse ebenfalls ansteigen, hier wird davon ausgegangen, dass sich die Anzahl von aktuell 11 Tagen im Jahr auf 15 bis 2060 und 17 bis 2100 erhöht. Ähnliche Zahlen wurden auch für die Stadt Frankfurt/M. prognostiziert. Ein aktualisierter Klimaplanatlas soll Stadtplanern, Architekten und Bauherren aufzeigen, wie sie sich bei der künftigen städtebaulichen Entwicklung in Frankfurt darauf einstellen können [5].

Direkte und indirekte Konsequenzen dieser klimatischen Veränderung sind beispielsweise urbane Hitze bei ungewöhnlich heißen Wetterlagen sowie Überflutungen nach Starkregen. Um die Lebensqualität und die städtische Umweltqua-

lität zu erhalten bzw. zu erhöhen, stehen die Stadtentwickler vor enormen Herausforderungen, die nach entsprechenden Anpassungsstrategien verlangen. Der Gestaltung urbaner Oberflächen kommt dabei eine zunehmende Bedeutung zu. Auf öffentlichen Flächen und bei Neubauprojekten werden planerische Maßnahmen wie beispielsweise die Schaffung von Frischluftschneisen, Begrünung und Entsiegelung getroffen. Eine wichtige, bisher oft wenig genutzte Komponente sind die Oberflächen der Gebäudehüllen (Fassaden und Dachflächen), die insbesondere bei verdichteter Bebauung einen effektiven Beitrag zur Verbesserung zur Qualität im urbanen Raum leisten können.

2 Ansatz und Aufbau der Studie

In aller Regel fokussiert sich die Planung einer Gebäudehülle auf die Schutzwirkung für den Gebäudeinnenraum sowie auf die Schadensfreiheit der Konstruktion selbst. Beispielsweise wird mit Wärmedämmung die energetische Qualität der Gebäudehülle verbessert, um bei möglichst geringem Energieeinsatz ein komfortables Raumklima zu erzielen. Bezogen auf den Außenraum werden allenfalls ästhetische Aspekte berücksichtigt, jedoch kaum oder gar nicht die funktionale Wirkung auf den urbanen Raum.

Ein zentraler Ansatz dieser Studie ist daher, im Kontext deutscher Großstädte die Eigenschaften und Funktionen der Gebäudehülle mit dem Außenraum in Beziehung zu setzen. Denn das Mikroklima im unmittelbaren Grenzbereich an der Gebäudehülle sowie das Mesoklima im gebäudenahen urbanen Raum werden maßgeblich von der physikalischen Wirkung der urbanen Oberflächen beeinflusst. Bei ungünstigen Verhältnissen können so in Straßenzügen und auf Plätzen verdichteter Siedlungsstrukturen unbehaglich hohe Temperaturen resultieren. Darunter leidet nicht nur die Aufenthaltsqualität im urbanen Raum sondern unmittelbar auch die effiziente Klimatisierung der Innenräume, die wesentlich von den klimatischen Randbedingungen abhängt. Im Idealfall kann die Gebäudehülle jedoch Eigenschaften aufweisen, die eine positive Wirkung auf den gebäudenahen urbanen Raum hat mit dem Ziel, dem übermäßigem Aufheizen der Oberflächen und der Lufttemperaturen entgegen zu wirken, die Schadstoffbelastung der Luft zu reduzieren und das Abfließen von Regenwasser zu verzögern.

Die vorliegende Studie beleuchtet das Wirkpotential von urbanen Gebäudehüllen in Bezug auf a) Regulierung des Mikroklimas und b) Verbesserung der Luftqualität im urbanen Raum. Dabei werden einerseits Potentiale betrachtet, die sich auf die Konstruktion von Wänden und Dächern und deren Materialien beziehen und darüber hinaus die Wirkpotentiale von Begrünungen dieser Flächen.

Auf weitere Funktionen, z. B. im Bereich der Akustik, der Sicherheit, der Resilienz bei Starkregenereignissen und gestalterische Aspekte, wird ggf. verwiesen, aber nicht näher eingegangen.

Die vorliegende Studie gliedert sich wie folgt. In Kapitel 3 werden die Grundlagen der in dieser Studie fokussierten urbanen Herausforderungen erörtert. Lö-

sungsansätze und Wirkpotentiale der Gebäudehülle werden in Kapitel 4 aufgezeigt. Potentiale der Gebäudebegrünung werden separat in Kapitel 5 betrachtet. Zum Stand der Implementierung gibt Kapitel 6 Auskunft, gefolgt von einem Fazit in Kapitel 7.

3 Herausforderungen im Fokus dieser Studie

3.1 Urbane Hitze

Der Begriff Hitzeinsel / Urban Heat Island beschreibt ein typisches Merkmal eines Stadtklimas. Hierbei handelt es sich um eine inselartigen Überhitzung in der Stadt im Vergleich zum kühleren Umland. In den städtischen Bereichen kommt es tagsüber zu einer stärkeren Erwärmung und einer eingeschränkten Abkühlung in den Nachstunden. In Bild 1 ist beispielhaft ein typischer Temperaturverlauf einer Hitzeinsel über einer Stadt dargestellt. Die Ursache für die Erhöhung der Temperatur im Stadtbereich ist auf verschiedene Ursachen, die nachfolgend erläutert werden, zurückzuführen.

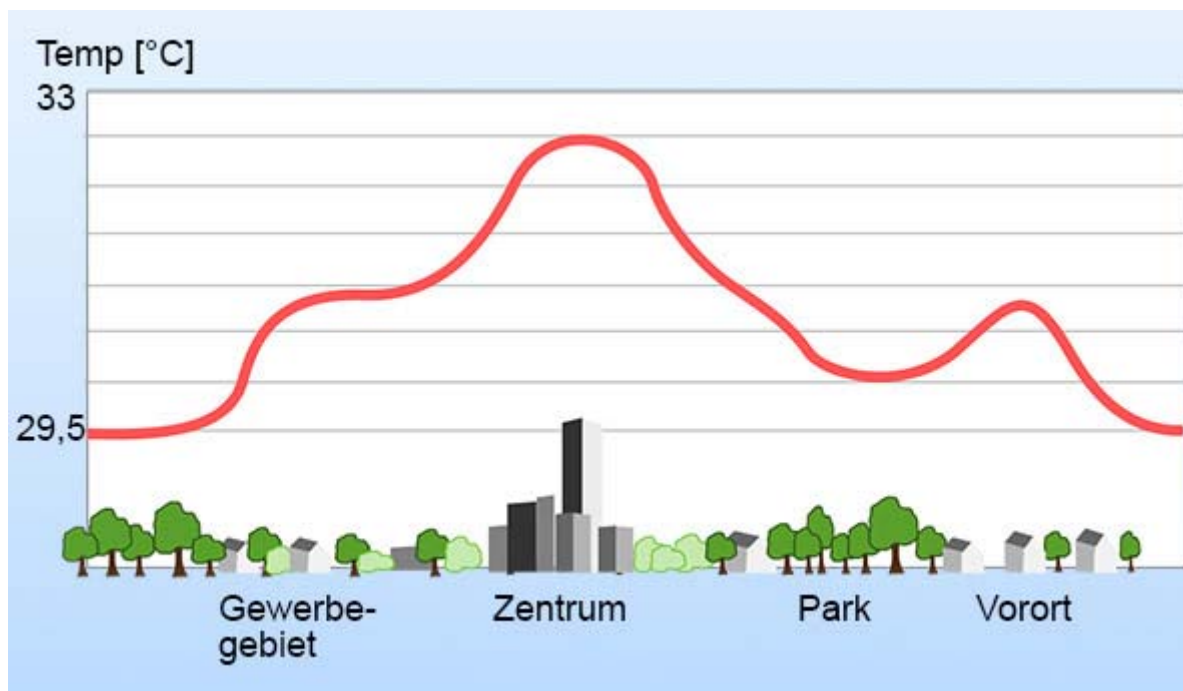


Bild 1:
Schematisches Temperaturprofil einer Stadt, Quelle [6].

In Stadtgebieten kommt es durch die Bebauung zu einer deutlich vergrößerten Oberfläche. Urbane Strukturen absorbieren im Vergleich zu unbebauten Umlandflächen einen höheren Anteil der solaren Einstrahlung. Durch die Bauwerke vergrößert sich die Absorptionsoberfläche, zudem begünstigt die erhöhte Luftverschmutzung in der bodennahen Grenzschicht die Ausbildung eines Volumenabsorbers, d.h. Partikel und Gase in bodennahe Luftschichten wirken als kleine Strahlungsabsorber und erwärmen dadurch diese Luftschicht. Gleichzeitig vermindern Horizonteneinengungen, z. B. bei Straßenschluchten, die Wärmeabgabe über natürliche Abstrahlung. Die Gebäudestrukturen und Verkehrsflä-

chen selbst sind aufgrund der meist massiven Baustoffe erhebliche Wärmespeicher. Dies führt bei strahlungsreichen Witterungsperioden immer häufiger zu einer anhaltenden Erwärmung.

Die hohe Absorption von Sonnenstrahlung und die Wärmespeicherung der versiegelten Flächen sowie die zusätzliche Freisetzung anthropogener Wärme führen zu einer vergleichsweise starken Erwärmung der gebauten Strukturen und der urbanen Räume. Die enge Bebauung verursacht außerdem eine langsamere Abkühlung. Zum einen wegen der geringeren langwelligen Abstrahlung zum kühlen Nachthimmel aufgrund geometrischer Einschränkungen der Sichtfaktoren durch die Bebauung und durch die Luftverschmutzung. Zum anderen auf Grund von Verhinderung der natürlichen Luftzirkulation, wenn das Einströmen von kühler Luft aus dem Umland oder von großen Grünflächen eingeschränkt ist. Ein weiterer Faktor für die Ausbildung von Hitzeinseln ist die weitreichende Flächenversiegelung, denn Niederschlagswasser wird schnell in die Kanalisation abgeleitet und steht somit nicht für die natürliche Kühlung durch Verdunstung des Wassers an der Oberfläche zur Verfügung. Die Veränderung des natürlichen Wasserhaushalts durch einen hohen Versiegelungsanteil [7, 8] hat im Wesentlichen zwei Folgen:

Zum einen fließen Niederschläge nahezu vollständig und ohne Zeitverzögerung ab. Insbesondere in Verbindung mit o.g. Starkregenereignissen mit 40 bis 60 l/m² führt dies rasch zu einer Überlastung der Entwässerungssysteme in den betroffenen Kommunen selbst, jedoch kann dies auch indirekt zu Problemen für flussabwärts gelegene Städte werden.

Zum anderen stehen in Trockenzeiten kaum Wassermengen zur Verdunstung zur Verfügung. Der Verdunstungsprozess stellt jedoch durch den hohen Energiebedarf von 2250 kJ/kg eine große Wärmesenke im Wärmehaushalt eines Siedlungsgebiets dar. In Mittel- und Südeuropa beträgt die potentielle Evapotranspiration, also die bei ausreichender Wasserversorgung klimatisch mögliche Verdunstung, zwischen 400 und 1200 mm/a [9] und birgt somit ein erhebliches Potential zur Abmilderung sommerlicher Kühllasten.

In Bild 2 sind Isothermenkarten dargestellt, die im Rahmen einer Studie der TU Berlin zum Stadtklima in Mannheim 2010 [10] erstellt wurden. Darauf ist zu erkennen, wie sich die nächtliche Auskühlung im städtischen Bereich im Vergleich zu Stadtrandbezirken verhält und im Stadtkern die Temperaturen deutlich höher liegen als im Umland.

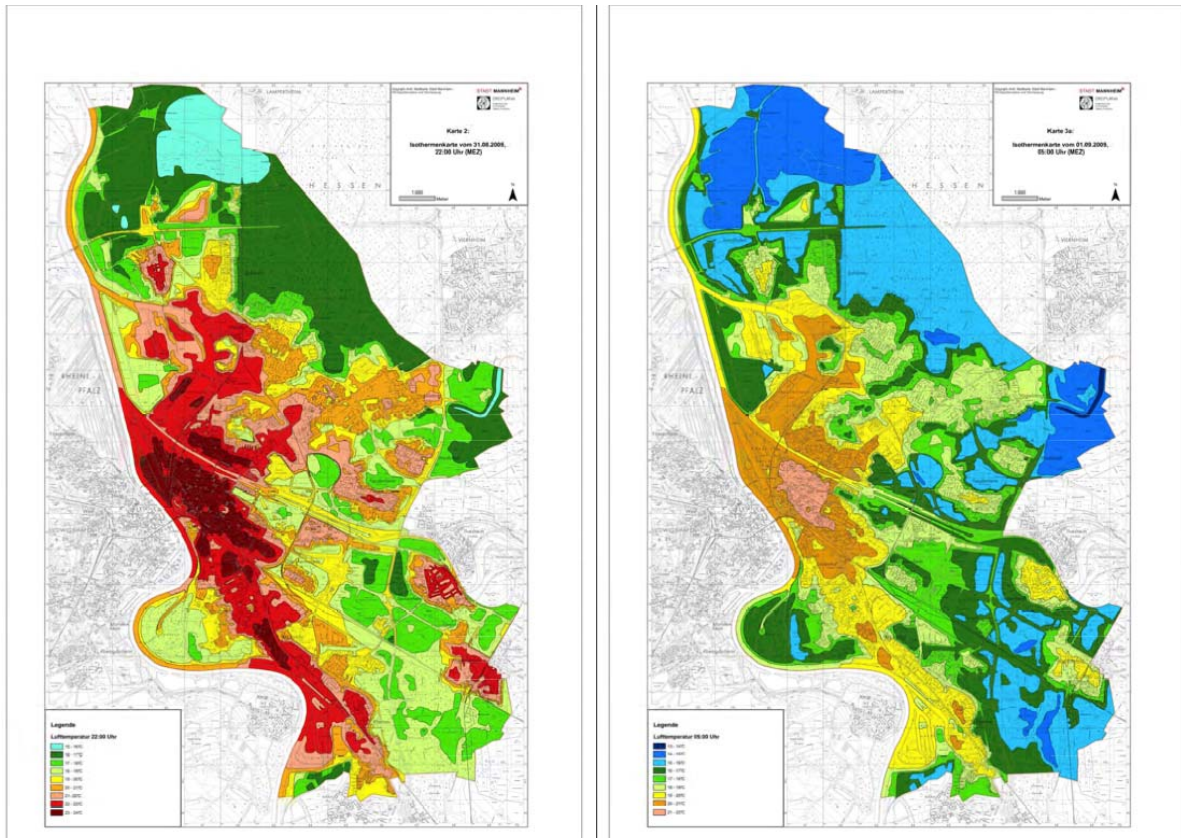


Bild 2:
Isothermenkarten 31.08.2009 22 Uhr (links) und 01.09.2009 5 Uhr (rechts)
(ÖKOPLANA, 2010 Karte 2 und Karte 3a) [10].

3.2 Luftschadstoffe

Für die lufthygienische Belastung in den Städten sind Schadgase und Stäube verantwortlich. Als gesundheitlich besonders kritisch gelten die alveolengängigen Feinstäube mit aerodynamischen Durchmessern von $1\ \mu\text{m}$ bis $7\ \mu\text{m}$. Feinstäube entstehen zum einen durch Verbrennungsprozesse und zum anderen durch den Straßenverkehr. Feinstaub besteht aus einem komplexen Gemisch fester und flüssiger Partikel (Aerosole) und wird abhängig von deren Größe in unterschiedliche Fraktionen eingeteilt. Unterschieden werden PM₁₀ (PM, particulate matter) mit einem maximalen Durchmesser von 10 Mikrometer (μm), PM_{2,5} ($2,5\ \mu\text{m}$) und ultrafeine Partikel mit einem Durchmesser von weniger als $0,1\ \mu\text{m}$.

Unter dem Begriff Feinstaub werden der primär emittierte und sekundär gebildete Feinstaub zusammengefasst. Primärer Feinstaub wird unmittelbar aus einer Quelle (z. B. Verbrennungsprozess) freigesetzt. Anthropogener Feinstaub wird durch menschliches Handeln erzeugt: Primärer Feinstaub entsteht durch Emissionen aus Kraftfahrzeugen, Kraft- und Fernheizwerken, Öfen und Heizungen in Gebäuden, bei der Metall- und Stahlerzeugung, auch beim Umschlagen von Schüttgütern. In Ballungsgebieten ist der Straßenverkehr eine wesentliche Staubquelle. Dabei gelangt Feinstaub nicht nur aus Motoren – vorrangig aus

Dieselmotoren – in die Luft, sondern auch durch Bremsen-, Reifen- und Straßenbelagsabrieb sowie durch die Aufwirbelung des Staubes von der Straßenoberfläche.

Natürliche Feinstaubquellen sind u. a. Winderosion, Vulkanausbrüche, Brandereignisse wie Waldbrände, etc.

Entstehen die Partikel durch die chemische Reaktion gasförmiger Vorläufersubstanzen, wie Ammoniak, Schwefel- und Stickoxide oder Kohlenwasserstoffe, so werden sie als sekundärer Feinstaub bezeichnet. Eine wichtige Quelle hierfür ist die Landwirtschaft: Die Emissionen gasförmiger Vorläuferstoffe, insbesondere die Ammoniakemissionen aus der Tierhaltung, tragen zur sekundären Feinstaubbildung bei.

Die lufthygienische Belastung durch Schadgase geht hauptsächlich von Stickstoffoxiden (NO_x) und Ozon aus. Ozon ist hierbei ein sekundärer Schadstoff. In Bodennähe wird Ozon nicht direkt freigesetzt. Es bildet sich in komplexen photochemischen Prozessen durch Wechselwirkung von Stickstoffoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen mit Sonnenlicht. Die Stickstoffoxide entstehen vor allem beim Betrieb von Verbrennungs-, insbesondere älteren Dieselmotoren ohne NO_x-Reduktionstechnik mittels Harnstoffeinspritzung. Die flüchtigen organischen Verbindungen werden entweder aus Polymermaterialien emittiert oder durch Verdunstung aus Kraftfahrzeugen freigesetzt bzw. stammen aus unverbranntem Kraftstoff. Die Hauptquellen von Stickstoffoxiden sind Verbrennungsmotoren und Feuerungsanlagen für Kohle, Öl, Gas, Holz und Abfälle. In Ballungsgebieten ist der Straßenverkehr die bedeutendste NO_x-Quelle.

Durch die übermäßige Freisetzung reaktiver Stickstoffverbindungen können natürliche Stoffkreisläufe und Ökosystembeziehungen empfindlich gestört werden. Laut Umweltbundesamt ist mit erheblichen nachteiligen Wirkungen für Mensch und Umwelt zu rechnen, wie:

- Eine weiträumige Nährstoffübersättigung (Eutrophierung) und Versauerung von Ökosystemen hat nachhaltige Folgewirkungen, wie den Verlust an biologischer Vielfalt.
- Die Auswaschungen von gesundheitsschädlichem Nitrat gefährden die Qualität des Trinkwassers.
- Erhöhte Emissionen von Lachgas führen zu einer zusätzlichen Verschärfung des Klimawandels.
- Gasförmige Stickstoffverbindungen sind Vorläuferstoffe von bodennahem Ozon und sekundären Feinstäuben und damit ein Risiko für die menschliche Gesundheit.
- Erhöhte Ammoniak- und Ozonkonzentrationen in der Atmosphäre führen in Europa zu weiträumigen Schädigungen empfindlicher Pflanzen.
- Stickstoffdioxid schädigt die Atemwege und so die menschliche Gesundheit.

Neben Feinstaub, Ozon und den reaktiven Stickstoffverbindungen wie NO, NO₂, N₂O und Ammoniak können folgende Substanzen als primäre oder sekundäre Schadgase zur Verschlechterung der Luftqualität beitragen:

- Schwefeldioxid
- Ruß-Aerosole
- Kohlenmonoxid
- organische Stickstoff-Verbindungen z. B. Peroxyacynitrate
- Benzo(a)pyren
- Benzol
- Blei
- Aldehyde
- flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC)

Auslöser für die aktuelle Diskussion um Fahrverbote in Innenstädten waren in erster Linie die Überschreitungen der Tagemittelwerte für PM10 und die NO_x-Werte an verkehrsreichen Straßen in Innenstädten.

Tabelle 1:

NO₂ und PM₁₀ - Überschreitungen von Stunden- bzw. Tagesmittelwerten im Zeitraum 01.01 – 03.10.2017 an bayerischen Messstationen [11]. Es wurden nur die Messstationen berücksichtigt wurden, bei denen mindestens eine Überschreitung in 2017 angegeben wurde. Bei keiner der Messstationen wurde der 1 h Mittelwert bzw. der Tagesmittelwert für Schwefeldioxid überschritten.

Station	NO ₂ 1h-MW > 200 µg/m ³	PM ₁₀ TMW > 50 µg/m ³
Andechs, Rothenfeld	0	2
Burghausen, Marktler Straße	0	14
Ingolstadt, Rechbergstraße	0	11
München, Johanneskirchen	0	10
München, Landshuter Allee	12	20
München, Lothstraße	0	11
München, Stachus	0	24
Oberaudorf, Inntal-Autobahn	0	14
Trostberg, Schwimmbadstraße	0	10
Kelheim, Regensburger Straße	0	15
Landshut, Podewilsstraße	0	15
Passau, Stelzhamerstraße	0	17
Regensburg, Rathaus	0	13
Sulzbach-Rosenberg, Lohe	*)	9
Tiefenbach, Altenschneeberg	0	1
Bamberg, Löwenbrücke	0	11
Bayreuth, Hohenzollernring	0	13
Kulmbach, Konrad-Adenauer-Straße	0	11
Ansbach, Residenzstraße	0	13
Fürth, Theresienstraße	*)	11
Nürnberg, Von-der-Tann-Straße	0	22
Schwabach, Angerstraße	0	10
Schweinfurth, Obertor	0	5
Würzburg, Kopfklinik	0	8
Würzburg, Stadtring Süd	0	23
Augsburg, Bourges-Platz	0	13
Augsburg, Karlstraße	1	19
Augsburg, Königplatz	0	15
Augsburg, LfU	0	11
Lindau (Bodensee), Friedrichshafener Straße	0	6
Neu-Ulm, Gabelsbergerstraße	0	11

*) Es liegen keine Messwerte vor.

Tabelle 2:

NO₂ und und PM₁₀ - Überschreitungen von Stunden- bzw. Tagesmittelwerten im Jahr 2017 in Stuttgart [12]. Es wurden bei der Zusammenstellung nur die Messstationen berücksichtigt, bei denen Überschreitungen registriert wurden.

Station	NO ₂ 1h-MW > 200 µg/m ³	PM ₁₀ TMW > 50 µg/m ³
Stuttgart-Mitte, Eberhardstraße	0 1)	5 1)
Stuttgart-Bad Cannstatt, Seubertstraße	0 1)	11 1)
Stuttgart-Mitte, Arnulf-Klett-Straße	0 1)	17 2)
Stuttgart-Mitte, Hohenheimer Straße	3 1)	16 2)
Stuttgart-Mitte, Am Neckartor	3 1)	39 2)

1) 01.01. – 30.09.2017

2) 01.01. – 12.09.2017

4 Bautechnische Lösungsansätze

Zur Analyse möglicher Gegenmaßnahmen für die eingangs beschriebenen Probleme werden unterschiedliche Maßnahmenoptionen zur Verbesserung des Stadtklimas in Bezug auf den Heat-Island-Effekt und die Luftqualität genauer betrachtet. Dazu werden zunächst mögliche Konzepte und Lösungsansätze vorgestellt und eine Vorauswahl in Bezug auf die Wirkpotentiale von Fassaden und anderen Gebäudeoberflächen getroffen. Folgende Lösungsprinzipien werden in der Öffentlichkeit diskutiert:

- a) Verbesserte Luftdurchströmung der Bebauungsstruktur zur Kühlung und Verdünnung der Problemstoffe in der Stadtluft.
- b) Niederschlagswasserspeicherung durch Reduzierung von versiegelten Oberflächen durch Flächenentsiegelung (Schwammstadt-Prinzip [13]) zur Entlastung der städtischen Entwässerungssysteme und zur Kühlung durch Wasserverdunstung.
- c) Reduktion des solaren Energieeintrags in städtische Strukturen und Steigerung der Wärmeabgabe.
- d) Luftreinigung durch Absorption und Umwandlung von Schadstoffen durch städtische Oberflächenstrukturen.
- e) Verbesserung von Luftqualität und Vermeidung von Überhitzung durch Stadtbegrünung.

Zu a)

Die Verbesserung der Luftdurchströmung von städtischen Strukturen setzt eine Vielzahl von Maßnahmen voraus, wie z.B. die Erzeugung von Bebauungsschneisen in der Hauptwindrichtung und eventuell eine Verbesserung der Zuflusssituation durch topographische Veränderungen der städtischen Randgebiete. Solche Maßnahmen kommen in erster Linie bei der Planung neuer Städte oder Stadtteile in Betracht und stellen nur sehr bedingt eine Verbesserungsmöglichkeit existierender Strukturen dar. Dieses Prinzip soll deshalb hier nicht weiter verfolgt werden, wobei allerdings bei der Beurteilung anderer Maßnah-

men (z. B. das Pflanzen von Bäumen) darauf zu achten ist, dass sie die städtische Luftdurchströmung nicht verschlechtern.

Zu b)

Das Schwammstadt-Prinzip basiert auf einer Entsiegelung der städtischen Oberflächen. Dies betrifft in erster Linie horizontale Flächen, wie z.B. Straßen, Plätze und Flachdächer. Da Fassaden in der Regel nur eine geringe Wasseraufnahmefähigkeit haben, kommen sie in diesem Zusammenhang kaum in Betracht. Eine Ausnahme bilden hier eventuell wassersaugende Vormauerungen bei zweischaligen Außenwänden. Ihre Verbreitung ist jedoch in modernen Innenstädten begrenzt. Die Entsiegelung horizontale Oberflächen kann durch eine Begrünung dieser Flächen oder durch das Verlegen wasserrückhaltender poröser Oberflächenschichten, wie z. B. Sande oder spezielle Pflastersteine [14] realisiert werden.

Zu c)

Die Reduktion des solaren Energieeintrags in städtische Strukturen mithilfe reflektierender Dachoberflächen (Cool Roofs) ist ein weitverbreitetes und vielfach validiertes Konzept. Dasselbe gilt für die Oberflächenkühlung durch Verdunstung gespeicherten Regenwassers. Beide Konzepte und ihre Wirkpotentiale werden deshalb im Folgenden genauer analysiert und bewertet.

Zu d)

Die Luftreinigung durch das Umwandeln von Schadgasen in harmlose Substanzen mithilfe photokatalytischer Oberflächenreaktionen ist in Fachkreisen ein viel diskutiertes Thema. Das Konzept hätte für den innerstädtischen Bereich viele Vorteile, wenn es in der Lage wäre eine spürbare Reduktion der Schadgaskonzentrationen zu bewirken. Das Potential der Photokatalyse an Gebäudeoberflächen für die Luftreinigung in Städten wird im Folgenden auf der Basis von Literaturstudien und eigenen Erfahrungen beurteilt.

Zu e)

Die Begrünung von Gebäuden und städtischen Strukturen liegt international im Trend. Begrünungsmaßnahmen helfen nicht nur bei der Bekämpfung des Heat-Island-Effekts. Sie können auch die Luft in Innenstadtbereichen verbessern helfen. Außerdem hat sie eine positive Wirkung auf die menschliche Wahrnehmung der Umgebung. Deshalb wird der Begrünung hier ein eigenes Kapitel gewidmet.

Anhand der oben genannten Konzepte und Vorschläge zur Verbesserung des Stadtklimas zeigt sich, dass es nicht allein durch die bauliche Situation und die Gestaltung der Fassaden möglich ist, ein besseres Stadtklima zu erzeugen. Dennoch können einige Ansätze und Ideen auch an die Fassade bzw. auf die Dächer gebracht werden, die in diesem Rahmen erwähnt werden sollen. Die Verbesserung des Mikroklimas an der Fassade eines Gebäudes soll einerseits die nähere freie Umgebung positiv beeinflussen, andererseits soll damit auch ein positiver Einfluss auf das Innenraumklima des Gebäudes erzielt werden, wie z. B. reduzierte Temperatur der eingebrachten Frischluft ins Gebäude.

4.1 Reflektierende Oberflächen

Reflektierende Oberflächen für Dächer sind bereits in einigen Bundesstaaten der USA für bestimmte Gebäude vorgeschrieben. Dadurch soll der Kühlenergiebedarf von Gebäuden mit geringer Wärmedämmung reduziert werden. Die für Dächer verwendeten Reflexionsschichten zeichnen sich durch einen geringen kurzwelligen Absorptionsgrad aus, so dass sie bis zu 70 % der solaren Einstrahlung reflektieren. Gleichzeitig haben sie im Bereich der thermischen Infrarotstrahlung einen hohen Emissionsgrad, d.h. metallische Beschichtungen scheiden hier meist aus. Am besten schneiden extrem weiße Beschichtungen ab, die eine geringe Verschmutzungsneigung zeigen. Leider neigen leuchtend weiße Oberflächen häufig zu ausgeprägten Blendungseffekten. Deshalb ist ihr Einsatz neben höheren Gebäuden oft problematisch. Ähnliches gilt auch für Steildächer und Fassaden. Eine Lösungsmöglichkeit besteht in der Auswahl selektiv wirkender Beschichtungen, deren Reflexionsgrad sich mit der Wellenlänge der Strahlung verändert (sog. Cool-Color-Technologie). Da der Mensch Blendungen nur im sichtbaren Wellenlängenbereich wahrnimmt und etwa die Hälfte der energetischen Solarstrahlung im unsichtbaren nahinfraroten Bereich (NIR 780 – 2500 nm) liegt, sind Beschichtungen günstig, deren Reflexionsmaximum im NIR-Bereich liegt. Diese Beschichtungen können im sichtbaren Bereich unterschiedliche Farben aufweisen. Da sie im NIR-Bereich jedoch stark reflektieren, erwärmen sie sich deutlich weniger als gleichaussehende Oberflächen ohne diesen Effekt. Dies wird durch spezielle Mischphasenmetalloxid-Pigmente erreicht, deren Beigabe die Aufheizung sonnenbeschienener Oberflächen deutlich reduziert [15].

Entwickelt wurden diese Farben hauptsächlich, um die Erwärmung der Konstruktion, den sogenannten Hitzeaufbau (Heat up Effekt) in Gebäuden, zu reduzieren. Die niedrigere Oberflächentemperatur hat aber auch in Hinblick auf die Hitzeinsel-Problematik einen positiven Nebeneffekt auf das Mikroklima an der Fassade im Außenbereich, denn die geringeren Oberflächentemperaturen führen gleichzeitig zu einer geringeren Wärmespeicherung und somit niedrigeren Fassadentemperaturen als bei herkömmlichen Beschichtungen. In Bild 3 ist exemplarisch der Verlauf der gemessenen Oberflächentemperaturen an verschiedenartig beschichteten Farbproben dargestellt. Das Material Titanoxid ist eine Beschichtung mit Pigmenten, die die NIR-Reflexion deutlich erhöhen und somit zu niedrigeren Oberflächentemperaturen führen.

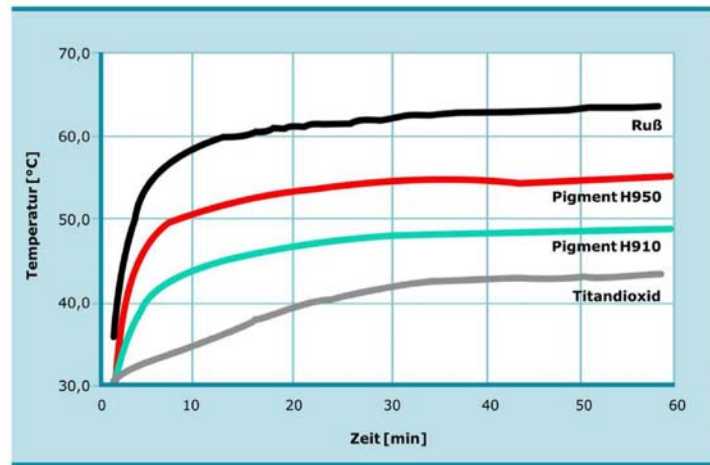


Bild 3:

Messung des Hitzeaufbaus, bei künstlicher Infrarotbestrahlung, an verschiedenen pigmentierten Alkyd/Melamin-Einbrennlacken auf Aluminium-Panels in Anlehnung an ASTM D 4803-97 [15].

Der energetisch wirksame Anteil der kurzwelligigen Solarstrahlung im NIR-Bereich an der gesamten Solarstrahlung liegt für Deutschland bei ca. 47 %. Der sichtbare Anteil ist etwa genauso groß (ca. 46 %) und der UV-Anteil liegt bei ca. 7 %. Damit wird klar, dass die Reflexion der NIR-Strahlung den Wärmeeintrag durch Besonnung auf einer entsprechend ausgerüsteten Oberfläche deutlich vermindert. Allerdings wird der Wärmeeintrag auf die gesamte Stadtstruktur durch die NIR-Reflexion einer Oberfläche nur durch den Anteil vermindert, der direkt zum Himmel zurückreflektiert wird. Der Rest wird an andere städtische Oberflächen weitergegeben. Deshalb zeigt die NIR-Reflexionsstrategie die größte Wirkung bei horizontalen Oberflächen. Allerdings können gerade bei dichter Bebauung auch NIR-reflektierende vertikale Oberflächen für das Gesamtkonzept einen wertvollen Beitrag leisten.

4.2 Wärme- und Feuchtespeicherstrategien

Ein weiterer Ansatz im Bereich der Fassadentechnologie wäre der Einsatz von speziellen wärme- oder feuchtespeichernden Materialschichten. Solche Materialschichten sind bereits aus der Raumklimatechnik bekannt. Es handelt sich hier zum einen um Phasenwechselmaterialien, sog. PCM (Phase Change Material), die raumseitig zur Vermeidung sommerlicher Überhitzung eingesetzt werden. Auf der Außenseite wurde ihr Einsatz ebenfalls bereits zur Reduzierung der Tauwasserbildung auf Fassadenoberfläche [16] untersucht. Ziel war es hier, das Risiko von Algenwachstum auf der Fassade zu reduzieren. Unabhängig von dieser Zielstellung kann der Einsatz von geeigneten PCM zu einer Reduzierung der Maximaltemperaturen an der Fassadenoberfläche führen. Durch die Wirkung von PCM-Anteilen im Putz oder anderen außen liegenden Bauteilschichten sinken die Oberflächentemperaturen tagsüber, und in den kühleren Nachtstunden wird die gespeicherte Energie wieder an die Umgebung abgegeben. Allerdings wird die mittlere Oberflächentemperatur dadurch kaum beeinflusst. Im Gegenteil, diese könnten sich sogar leicht erhöhen, da die Intensität der

nächtlichen Abstrahlung mit der 4. Potenz der Temperatur ansteigt. Ein Abmildern der Temperaturspitzen hat deshalb auch eine Reduktion der mittleren Abstrahlungsintensität zur Folge.

Neben Materialien mit wärmespeichernden Eigenschaften könnten auch solche mit stark feuchtespeichernden Eigenschaften, sog. Feuchtepuffermaterialien eingesetzt werden. Im raumklimatischen Kontext haben solche Materialien ihr positives Wirkpotential bereits mehrfach unter Beweis gestellt. Untersuchungen mit stark feuchtepuffernden Innenraumbekleidungen haben eine dämpfende Wirkung auf Luftfeuchteschwankungen im Raum und verbessern dadurch die Behaglichkeit und reduzieren das Schimmelpilzwachstumsrisiko [17]. Inwieweit dieser Effekt auch zu einer Verbesserung des Mikro- oder Mesoklimas in der Stadt führen kann wurde bislang nicht wissenschaftlich untersucht. Allerdings ist zu befürchten, dass es sich in Bezug auf die mittlere Temperatur im Innenstadtbereich um ein Nullsummenspiel handelt. Wenn Feuchte aus der Luft durch Feuchtepuffermaterialien absorbiert wird, erwärmen sich diese aufgrund von Latentwärmeeffekten (Kondensations- und Sorptionswärme). Das Gegenteil passiert, wenn die Feuchte wieder abgegeben wird. Dazu wird dem Material bzw. der Umgebung dieselbe Wärmemenge wieder entzogen. Man kann durch diesen Effekt zwar Temperaturschwankungen bis zu einem gewissen Grad reduzieren, die mittlere Temperatur bleibt aber gleich.

Ein positiver Effekt zur Kühlung von städtischen Oberflächen ist jedoch zu verzeichnen, wenn an den städtischen Oberflächen in erster Linie eine Verdunstung und so gut wie keine Kondensation auftritt. Dies ist möglich, wenn die Kondensation hoch in den Wolken stattfindet und das Kondensat anschließend von den städtischen Oberflächen in Form von Regen aufgenommen wird. Die Temperatur von Fassaden aus wasseraufnahmefähigen Vormauersteinen wird durch diesen Effekt bei starker Schlagregenbeanspruchung um ca. 5 % im Mittel vermindert. D.h. die Verdunstung des aufgenommenen Regenwassers kompensiert zu einem großen Teil die Erwärmung des Mauerwerks durch die solare Einstrahlung (Voraussetzung helle Farbgebung, die Angaben beziehen sich auf Kalksandstein). Dies gilt jedoch nur für die Wetterseite; die wetterabgewandten Fassaden profitieren nicht von diesem Effekt. Bei Dächern mit wärmespeichernden Deckschichten ist ein noch größerer Effekt zu erwarten.

4.3 Technologien zur Beseitigung von Luftschadstoffen

Die klassischen Methoden zur Beseitigung von Stäuben und Luftschadstoffen sind Filtration und Sorption. Beide Methoden eignen sich auch zur Anwendung auf einer Gebäudefassade.

Schadgaskonzentrationen können prinzipiell durch katalytische oder adsorptive Verfahren verringert werden. Im Bereich urbaner Oberflächen (Straßenbeläge, Fassadenbaustoffe, Bedachungen) wird häufig die Photokatalyse als geeignetes Verfahren genannt. Im Falle der katalytischen Oxidation von Stickoxiden erfolgt eine Umwandlung von NO und NO₂ in der Gegenwart eines Photokatalysators (z. B. Titandioxid) zu Nitrat (NO₃⁻). Dieses löst sich gut in Wasser und wird z. B.

mit dem Regenwasser von der Oberfläche abgeführt. Auf dem Markt sind diverse photokatalytisch aktive Farben und Putze, photokatalytisch aktive Keramikfliesen für den Fassadenbereich, photokatalytisch aktiver Beton oder photokatalytisch aktive Straßenbeläge.

Daneben kommt die Photokatalyse bei sogenannten „selbstreinigenden Oberflächen“ zum Einsatz [18]. Hierbei handelt es sich vornehmlich um Glasoberflächen, die mit Titandioxid beschichtet sind.

Die folgende Tabelle fasst die Vor- und Nachteile der jeweiligen Technologie zusammen.

Tabelle 3:
Vor- und Nachteile der einzelnen Luftreinigungstechnologien [19].

Technologie	Luftschadstoffe	Vorteile	Nachteile
Filtration	Partikel	Wirksam bei Partikeln zwischen 0,1 µm und 4 µm	Filtermedien dienen als Quelle für die Bildung von Geruchskomponenten; Filtermedien haben keine Wirkung auf VOC-Entfernung (Ausnahme: Kombination mit Aktivkohle)
Sorption	Anorganische Gase: NO _x , SO ₂ , O ₃ , H ₂ S und VOC	Keine Bildung von Zwischenprodukten, hohe Effizienz bei gasförmigen Luftschadstoffen	Benötigt Regenerationszyklen; Bildung von Luftschadstoffen insbesondere in Kombination mit Ozon
UV-C	Mikroorganismen	Hohe Wirksamkeit bei luftgetragenen Mikroorganismen wie Bakterien, Pilzen und Viren	Bildung von Ozon und Dioxin; Anwendung hauptsächlich im Innenräumen
Katalytische Oxidation inklusive Photokatalyse	Anorganische Gase, VOC, Mikroorganismen	Wirkt bei Raumtemperatur Abbau von NO _x , Aldehyden, Aromaten, Alkanen, Olefinen, chlorierten Kohlenwasserstoffverbindungen, Geruchskomponenten und Mikroorganismen	Bildung von Zwischenprodukten wie Formaldehyd, Acetaldehyd und Aceton Abnahme der katalytischen Wirksamkeit durch Vergiftung des Katalysators
Plasma	Anorganische Gase, VOC, Mikroorganismen	Gleichzeitige Entfernung von Luftschadstoffen, Mikroorganismen und Partikeln	Bildung von Ozon, NO _x und anderen Zwischenprodukten, hoher Energieverbrauch, Hochspannung, keine Anwendung im Außenbereich
Ozonisation	Anorganische Gase, VOC, Mikroorganismen	Reduziert Geruchsstoffe, beschleunigt katalytische Oxidations-Reaktionen	Ozon ist ein Luftschadstoff, Bildung von Zwischenprodukten wie Carbonyl- und Dicarbonylverbindungen und Carbonsäuren sowie organischen Aerosolen

Laborversuche haben gezeigt, dass gasförmige organische und anorganische Stoffe durch die photokatalytische Oxidation umgesetzt werden können. Dies ist jedoch sehr stark von den gewählten Rahmenbedingungen abhängig.

Neben der Konzentration des Schadstoffs hängt die Wahrscheinlichkeit für eine chemische Reaktion auch von der aktiven Oberfläche des Katalysators ab. Die Photokatalyse ist nicht selektiv. Unterschiedliche Stoffe konkurrieren um die aktiven Zentren der photokatalytisch aktiven Fläche. Neben den Zielsubstanzen können unter realen Bedingungen auch andere Stoffe katalytisch oxidiert werden. I. a. kommt es nur unter kontrollierten Bedingungen (Temperatur, Feuchte, Anströmgeschwindigkeit, Verweildauer an der Oberfläche, Lichtintensität) zu einer vollständigen Umsetzung der Schadstoffe. In Standardprüfungen zur

Bestimmung der photokatalytischen Aktivität [20–24] herrschen solche kontrollierten Prüfbedingungen. In der wissenschaftlichen Literatur sind zahlreiche Veröffentlichungen über die Ergebnisse von Laborversuchen zur photokatalytischen Aktivität von Bauprodukten bzw. von Abbauraten von Umweltschadstoffen an photokatalytisch aktiven Oberflächen zu finden [25–27]. Zur Wirksamkeit und Effektivität der Photokatalyse im Fassadenbereich sind derzeit keine Ergebnisse zu Feldversuchen publiziert, in denen ein direkter Vergleich zwischen Produkten mit und ohne photokatalytischer Ausrüstung unter Realbedingungen beschrieben wird. Die Ergebnisse eines im Rahmen des EU-Programms LIFE+ geförderten Projekts PhotoPAQ über die Wirksamkeit von Photokatalyse im Tunnelbau (Leopold-II-Tunnel in Brüssel) [28] waren negativ. Dieses Resultat [29] wurde u. a. mit der Kontamination der katalytisch aktiven Oberfläche in Verbindung gebracht.

Bei der Photokatalyse mit nicht kontrollierten Zuständen an der aktiven Oberfläche können Nebenprodukte (z. B. Zwischenstufen durch unvollständige Oxidation) gebildet werden, die wiederum in der Umwelt unerwünscht sind. Darüber hinaus entstehen durch die Photokatalyse von Stickoxiden wasserlösliche Nitrate, die vom Regen abgewaschen werden und in die Umwelt gelangen. Mit der Abwaschung des wasserlöslichen Nitrats von der Katalysatoroberfläche stehen die aktiven Stellen wieder für die Anlagerung der Schadstoffe und damit für photokatalytische Aktivität zur Verfügung. Stoffe, die die aktive Oberfläche dauerhaft blockieren, können zu einer Inaktivierung beitragen. Der Eintrag von Nitrat in das Grundwasser wird angesichts steigender Nitratwerte im Grundwasser kritisch gesehen.

5 Gebäudebegrünung

In Ergänzung zu den bautechnischen Lösungen gewinnt die Gebäudebegrünung wegen ihrer positiven Effekte hinsichtlich Minderung der urbanen Hitze und der städtischer Luftverschmutzung zunehmend an Bedeutung. Abgesehen von den ästhetischen Effekten können diese auch zu einer Verbesserung der Stadtumwelt beitragen.

In Bezug auf den Heat Island Effekt zeichnen sich gesunde Pflanzen dadurch aus, dass sie nur das blaue und rote Licht, das sie für die Photosynthese benötigen, absorbieren. Der grüne Anteil des sichtbaren Lichts sowie große Teile der energetischen Sonnenstrahlung im Nahinfrarotbereich (NIR) werden reflektiert. Gleichzeitig geben Pflanzen gespeichertes Wasser (zugeführt durch Niederschläge, nächtliche Betauung oder gießen) in dampfförmiger Form ab. Dieser Vorgang führt zur sog. Verdunstungskühlung, da für den Übergang vom flüssigen in den dampfförmigen Zustand große Energiemengen erforderlich sind. Beide Vorgänge, die starke Reflexion der kurzwelligen Strahlung und die Verdunstungskühlung haben eine starke Reduktion der Oberflächentemperatur von begrüntem Systemen zu Folge.

Bereits heute werden von diversen Herstellern unterschiedliche Systeme für eine Fassadenbegrünung angeboten.

5.1 Bestehende Systeme der Fassadenbegrünung (Auswahl)

Bodengebundene Begrünung

ist im Wesentlichen dadurch gekennzeichnet, dass die verwendeten Pflanzen allermeist Kletterpflanzen (rankende Pflanzen) sind und eine direkte Verbindung zum „gewachsenen“ Boden haben. Je nach Klettermodus wird die bodengebundene Begrünung mit oder ohne Kletterhilfe ausgeführt. In der Regel bedarf diese Art der Gebäudebegrünung nur geringer aber fachgerechter Pflege. Mit einer gewissen Anlaufzeit, bis sich die Pflanzen hinreichend entwickelt haben, ist zu rechnen.

Fassadengebundene Systeme

bilden in der Regel den Abschluss der Fassade. Sie werden in Form einer vorgehängten Fassade oder unmittelbar an der Wand angebracht. Darüber hinaus wird noch unterschieden, ob es sich um vollflächige oder um teilflächige Vegetationsträger handelt [30]. Fassadengebundene Systeme benötigen in der Regel keinen Bodenanschluss und eignen sich daher ganz besonders für städtische Bereiche. Das Design der Ausführung und die Auswahl der Pflanzen erlauben große Gestaltungsspielräume. Die Versorgung der Vegetation erfolgt meist durch eine automatisierte Anlage. Begrünung und Konstruktion sollen aufeinander abgestimmt sein. Der Aufwand für Pflege und Erhaltung ist systemabhängig stark unterschiedlich, aber deutlich größer als bei der bodengebundenen Begrünung. Zur Pflanzenentwicklung benötigen sie, je nach Ausführung, eine vergleichsweise kurze oder keine Anlaufzeit.

5.2 Neue Entwicklungen (Beispiele)

Derzeit befinden sich zahlreiche Systeme im Experimental- bzw. Entwicklungsstadium. Beispiele dafür sind:

„Grünes Zimmer Ludwigsburg“

Hierbei handelt es sich um ein Pilotprojekt vom Verband Region Stuttgart. Spezielle Baumwände werden nachträglich auf Plätzen installiert und bieten dort Schatten; die Bewässerung soll langfristig mit aufgefangenem Regenwasser umgesetzt werden [31].

„Moosbegrünung“

Mit der bis zu 30-fachen Oberflächenvergrößerung im Vergleich zur Unterlage weist Moos eine höhere Feinstaubbindung als z. B. viele Gräser auf. Darüber hinaus gibt es Hinweise, dass in einem Moosbestand Luftschadstoffe nicht nur abgesetzt sondern auch abgebaut werden [32]. Dazu sind jedoch weitere systematische wissenschaftliche Messungen notwendig.

Am IBP wird derzeit eine neue Methode entwickelt um Moos an Gebäudeoberflächen anzusiedeln, erste Ergebnisse sind vielversprechend (Bild 4). Moos als Fassadenbegrünung ist nicht nur wegen seiner Eigenschaften in Zusammenhang mit einer Reduzierung der Feinstaubbelastung interessant, sondern auch, weil es in Bezug zu Substrat und Wasserversorgung wesentlich genügsamer ist

als andere Pflanzen [33, 34]. Ziel der Moosbegrünung ist es, eine neue Möglichkeit der extensiven Begrünung für Vertikalflächen zu schaffen.



Bild 4:
Dreidimensionale Prüfkörper mineralischer Baustoffe, begrünt mit Moos.

Mooswand in der Cannstatter Straße in Stuttgart:
Diese Begrünung wird von der Stadt Stuttgart und dem Land Baden-Württemberg gefördert. Derzeit wird erprobt, ob eine große Mooswand zur Feinstaubreduktion und Luftverbesserung geeignet ist. Dazu werden regelmäßige Schadstoffmessungen durchgeführt.



Bild 5:
Mooswand in Stuttgart, kurz nach der Fertigstellung [36].

5.3 Mikroklima: Einfluss auf die Oberflächen- und Umgebungstemperatur

Durch die Verdunstung von Wasser entsteht ein Kühlungseffekt (Verminderung der sommerlichen Aufheizung), und begrünte Fassaden wirken daher als natürliche Klimaanlage. Die Deutsche Klimaanpassungsstrategie geht davon aus, dass Fassadenbegrünungen den Hitzestress im urbanen Bereich reduzieren können [31]. Kürzlich wurde der sogenannte „Green Cooling Factor (GCF)“ vorgeschlagen, um die Kühlleistung von begrünten Gebäuden und Städten zu berechnen, er stellt das Verhältnis der begrünten Kühlleistung zur Gebäude-HVAC dar [38].

Vergleichsmessungen von konventionellen Fassaden und Fassaden mit fassadengebundener Begrünung zeigen, dass die Fassadenbegrünung im Sommer kühlend und im Winter wärmend wirkt; auch die Schwankungen der Luftfeuchte unmittelbar vor der Wand werden gedämpft. So beträgt die Evapotranspiration einer 850 m großen „Living-Wall“ 1800 l, bei entsprechender Kühlleistung [40]. Die Oberflächentemperatur einer Fassade kann durch Begrünung um bis zu 15 °C reduziert werden. Die lokale Lufttemperatur vor einer fassadengebundenen und einer bodengebundenen Fassadenbegrünung ist um 1,3 °C bzw. 0,8 °C geringer, als vor einer unbegrünten Fassade [30].

Für dicht bebaute Stadtzentren, wie in Hong Kong oder Melbourne wurden bei den Temperatur-Peaks Reduktionen bis zu 10 °C modelliert [1]. Bei einem Höhen/Weiten Verhältnis von weniger als 1 und einem sonnigen Klima wurde eine Reduktion von 8 % für ein niedriges Gebäude in Los Angeles vorausgesagt, wohingegen dichtere europäische oder asiatische Städte in der Modellierung lediglich Reduktionen von 2 - 3 % erreichten [1].

5.4 Einfluss auf die Luftqualität

Aus der Literatur sind unterschiedliche Hinweise auf eine Verbesserung der Luftqualität durch Fassadenbegrünung bekannt, systematische Untersuchungen die eine belastbare Quantifizierung erlauben, sind derzeit aber noch wenige durchgeführt. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Bisher sind vor allem Einzelobjektbetrachtungen oder Modellrechnungen verfügbar.

Die Effizienz von Begrünung im Zusammenhang mit der Reduktion von Luftschadstoffen hängt von zahlreichen Faktoren ab, wie z. B. Blattflächenindex (LAI), bewachsener Fläche, Nähe zur Quelle, Geometrie des Raumes, Luftbewegung, etc.. In Modellierungen nach [42] können durch großflächig begrünte Wände in Straßenschluchten (bei großer Vegetationsbedeckung der Wände und „mittleren“ Voraussetzungen von LAI, Luftgeschwindigkeit, etc.) bis zu 9 % NO₂ und 13 % PM10 der einströmenden Luftverschmutzung reduziert werden, innerhalb der Straßenschlucht bis 15 % NO₂ und 23 % PM10, bei geringen Windgeschwindigkeiten können innerhalb der Straßenschlucht sogar Reduktionen von NO₂ bis zu ca. 40 % und von PM10 bis zu ca. 60 % erreicht werden. Die modellierte Deposition von PM10 ergab Werte von 6 – 9 mg/m² bei Windgeschwindigkeiten von 0,5 – 5 m/s [42].

Die stärkste Deposition von Staubpartikeln kann grundsätzlich an fein gegliederten und/oder haarigen Pflanzenblättern bzw. Pflanzenstrukturen beobachtet werden [43], [44], egal ob es sich dabei um Holzgewächse oder andere Pflanzen handelt. In anderen Arbeiten wird offenbar, dass eine effektive Ablagerung von Feinstaub an Pflanzenoberflächen vor allem bei niedrigen Windgeschwindigkeiten stattfindet [45] [46].

Daten über konkrete Filtrationsleistungen von Kletterpflanzen liegen nur vereinzelt vor, z. B. 4 % bis 8,4 % des Gesamtstaubs in der Vegetationsperiode, dementsprechend 1,8 - 3,6 % im Jahr beim Efeu, davon 71 % Partikel $<15 \mu\text{m}$ und nur 10 % $<5 \mu\text{m}$ [47], [48], in [46] wird für Efeu eine Feinstaubbindung von bis zu $1,7 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ an den Blättern angegeben, wobei bei anderen Untersuchungen jedoch stark unterschiedliche Werte festgestellt wurden [30]. Bei der Dreispitzigen Jungfernebe (*Partheocissus tricuspidata*) wurde eine Bindung von bis zu 80 % von Metallen aus dem Grobstaub gefunden; die Staublast gemessen an Eichenblättern (*Quercus* spp.) betrug im Jahresschnitt ca. $0,25 \text{ g}/\text{m}^2$ [49]. Die genannten Beispiele zeigen, dass hier noch recht verwirrende Angaben bestehen und systematische Untersuchungen mit Praxisbezug wünschenswert sind.

Die Filterungsleistung von Feinstäuben PM10 kann laut [50] bei Straßenbäumen allgemein zwischen 1 und 20 % betragen. Grüne Fassaden können ebenso eine lokale Reduktion der Staubbelastung bewirken, typischerweise zwischen 10 und 20 % [1], also gut vergleichbar mit der Leistung von Straßenbäumen.

In Bezug auf die Filterleistung von Begrünung ist darauf zu achten, dass die installierten Begrünungseinheiten gut anströmbar bzw. durchströmbar sind. Besonders in engen Straßenschluchten wurde in Kombination mit Alleebäumen eine Behinderung der Durchströmung beobachtet (Abb. 2), was zu einer Schadstoffakkumulation führen kann, da ein Austausch der Luftmassen und ein Abtransport der Luftverunreinigungen verringert sein kann [42, 43, 51].

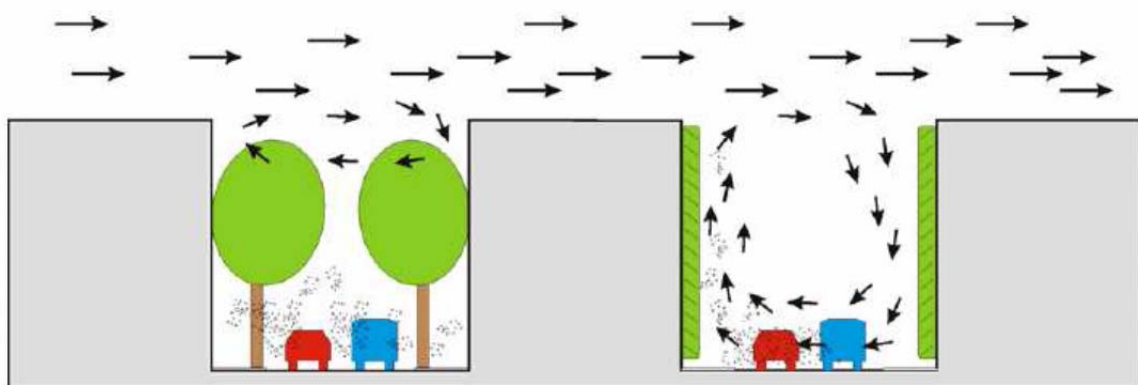


Bild 6:
Verschiedene Szenarien der Luftzirkulation bei unterschiedlicher Bepflanzung. Links: dichtkronige Straßenbäume, der Luftaustausch mit dem Verkehrsraum ist behindert und Schadstoffe werden verringert abgeführt, rechts: vollflächige

Fassadenbegrünung mit ungehindertem Luftaustausch bei gleichzeitig guter Filterleistung (aus [43] nach [51]).

Weitere Vorteile einer Gebäudebegrünung als Teil des Stadtbildes sind dadurch gegeben, dass Pflanzen CO₂ binden (Reduktion von klimaschädlichen Gasen) und im Gegenzug O₂ freisetzen. Dadurch ist eine zusätzliche Verbesserung der Luftqualität gegeben. Da Fassadenbegrünung effektiv CO₂ mittel- bis langfristig bindet, leistet die Fassadenbegrünung einen Beitrag zum Klimaschutz.

5.5 Weitere Wirkungen der Fassadenbegrünung

Neben den oben ausgeführten Wirkungen haben Fassadenbegrünungen noch weitere Effekte, die nicht im Fokus dieser Kurzstudie stehen, die aber trotzdem erwähnt werden sollen:

5.5.1 Wasserabfluss / Retention

Begrünte Fassaden bilden eine zusätzliche Kapazität zur Wasserrückhaltung (Retention) und helfen somit, Starkregenereignisse besser zu bewältigen.

5.5.2 Lärminderung

Begrünte Wände können auch einen Beitrag zur Minderung von Lärm leisten. Dieser Effekt wird z. B. bereits in Form von begrünten Lärmschutzwänden umgesetzt. Dazu wurden auch am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP Konzepte entwickelt und Untersuchungen durchgeführt, in deren Rahmen durch gezielte Bepflanzung mit ausgewählten Arten und Sorten eine Verringerung der Lärmproblematik erreicht werden soll.

5.5.3 Biodiversität

Pflanzen bilden die Primärproduktion in fast allen bekannten Ökosystemen. Daher bildet auch eine Fassadenbegrünung Nischen und Lebensraum für zahlreiche weitere Organismen. Neben verschiedenen Kleintieren (v. a. Insekten), die direkt oder indirekt von einer Fassadenbegrünung profitieren, siedeln sich auch diverse weitere Organismen an, die einen Betrag zum Abbau von Schadstoffen leisten können.

5.5.4 Biophiles Design

Von ihrem Ansatz her fällt eine Fassadenbegrünung auch in den Bereich des so genannten „biophilen Designs“, bei dem nicht nur Natur Analogien, sondern auch die Gestaltung mit der Natur selbst Berücksichtigung findet. Die Gegenwart von Natur in der unmittelbaren Umgebung des Menschen wirkt sich positiv auf zahlreiche Funktionen aus:

- emotionale Wirkungen
- Steigerung des Wohlbefindens

- Verbesserung der Einstellung
- Verbesserung der Leistungsfähigkeit
- Steigerung von Aufmerksamkeit und der Konzentration
- Verbesserung der kognitiven Leistungsfähigkeit
- Physiologische Wirkungen
- u. a. Senkung des Blutdrucks
- Senkung der Pulsfrequenz
- Reduktion der Konzentration an Stresshormonen [52].

5.5.5 Weitere Nutzeffekte durch Fassadenbegrünung

Eine sorgfältig geplante und ausgeführte Pflanzenhülle ist ein natürlicher Schutzschild gegen Schlagregen, Hagel und UV-Strahlung und erhöht somit die Lebensdauer einer Fassade. Auch der Erholungsfaktor für Bewohner und Besucher einer angenehm gestalteter Gebäudeoberflächen ist als Zusatznutzen zu sehen.

5.6 Kosten der Gebäudebegrünung

Die Kosten für die Ausführung einer Fassadenbegrünung hängen sehr stark von der Art des verwendeten Systems sowie der Detailausfertigung ab. Naturgemäß sind bodengebundene Begrünungen deutlich günstiger zu realisieren und kosten laut [30] und [53] etwa € 15 – 35 je m². Eine telefonische Nachfrage bei einzelnen Herstellern, persönliche Gespräche sowie eine Internetrecherche [53] haben Preise ab ca. € 400 – 500 – 2000 (nach oben offen) für Fassaden gebundene Systeme ergeben. Dazu kommen Pflege- und Wartungskosten, die sehr unterschiedlich ausfallen können, etwa von € 5 – 70 je m² und Jahr; dazu kommen ggf. noch Erneuerungsmaßnahmen (nach ca. 15 – 20 Jahren müssen oft ein Teil der Pflanzen und des Substrates/Struktur erneuert werden) mit einem Aufwand von bis zu € 100 – 300 je Laufmeter [30]. Derzeit ist davon auszugehen, dass die mittleren Kosten in Zukunft sich tendenziell eher verringern werden, bei gleichzeitiger Zunahme der Leistungen. Sollten jedoch regulatorische Eingriffe den Aufwand für eine ordnungsgemäße Ausführung deutlich erhöhen, so wird sich dies auch im Preis niederschlagen. Insgesamt muss festgestellt werden, dass eine konkrete Kosten-Nutzenrechnung von vielen Faktoren abhängt und nur jeweils für den Einzelfall durchgeführt werden kann.

Darüber hinaus darf nicht vergessen werden, dass durch Gebäudebegrünungen verschiedene ökosystemische Leistungen bereitgestellt werden, die im Gegenzug den Aufwand für andere technische Gegenmaßnahmen verringern (Luftreinigungsgeräte, Abflusssysteme, etc.).

Neben den Herstellungskosten und den Nutzeffekten von Fassadenbegrünung an sich bestehen auf unterschiedlichen Ebenen bis hin zu den einzelnen Kommunen verschiedene Initiativen und Förderungen für Gebäudebegrünungen.

Mit der „Strategie der Bundesregierung zur vorbildlichen Berücksichtigung von Biodiversitätsbelangen auf allen Flächen des Bundes“ (StrÖff) wurden wichtige

Ziele der „Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt“ umgesetzt, die 2007 von der Bundesregierung beschlossen wurde. Die Strategie gilt auch für die Bundesliegenschaften, Bundeswasserstraßen, Bundesfernstraßen, das Schienennetz der Deutschen Bahn sowie Truppenübungsplätze der Streitkräfte. Sie umfasst Maßnahmen und Programme, mit denen die verschiedenen zuständigen Stellen des Bundes die Biodiversität heute und in den kommenden Jahren schützen, erhalten und fördern. Dies könnte, zumindest teilweise, auch über Gebäudebegrünung umgesetzt werden.

6 Implementierung

6.1 Verfügbarkeit der Technologien

Was die technischen Ansätze und die Umsetzungen betrifft, so findet derzeit eine massive Weiterentwicklung statt.

Die Baustoffindustrie hat verschiedene Technologien und Produkte auf dem Markt, um den Gebäudehüllen und deren Oberflächen Eigenschaften zu verleihen, die der Hitzeentwicklung in verdichteten städtischen Strukturen entgegen wirken. Dabei können diese Lösungen, z. B. die Cool-Color-Technologie immer nur eine Teilkomponente der Gesamtlösung sein und nur dann ihre Wirkung entfalten, wenn die verschiedenen Strategien aufeinander abgestimmt sind. Der ganzheitlichen Planung, die sich auch auf den Außenraum bezieht, kommt dabei eine große Bedeutung zu.

Im Bereich der Gebäudebegrünung spezialisieren sich zunehmend diverse Anbieter für die Bepflanzung unterschiedlichster Oberflächen. Leider hinkt hier die Nutzung botanischer und vegetationskundlich-ökologischer Fachkenntnisse noch beträchtlich nach. Daher ist es in vielen Fällen noch nicht optimal gelungen die richtige Pflanze am richtigen Ort, oder besser den richtigen Pflanzenbestand am richtigen Ort für den richtigen Zweck, einzusetzen. Gerade hier sind aber für die Zukunft noch entscheidende Potentiale verfügbar (z. B. [54]).

6.2 Bestehende Hemmnisse

Für den Einsatz der Cool-Color-Technologie sind keine großen Hemmnisse zu erkennen, zumal diese auch die Fassaden selbst vor zu hohen Temperaturen schützt. Da sich Cool-Color-Beschichtungen farblich so gut wie nicht von herkömmlichen Anstrichen unterscheiden wird ihr Einsatz von einem normalen Betrachter gar nicht wahrgenommen.

Im Fall der Begrünungstechnologie bestehen Hemmnisse einerseits noch immer in der Akzeptanz, dem Verständnis, dem konsequenten Handeln sowie im Bereich der regulatorischen Voraussetzungen. Während beispielsweise einige Städte mit gutem Beispiel vorgehen und die Dachbegrünung für neu gebaute Flachdächer obligatorisch machen, so ist bei der Fassadenbegrünung noch keine entsprechende hoheitliche Förderung immanent.

Darüber hinaus bestehen weiterhin technische Schwierigkeiten in der Ausführung, und es fehlen noch wissenschaftliche Studien, die es erlauben, die positiven Leistungen der unterschiedlichen Systeme konkret zu bewerten. Dies zeigt sich beispielsweise auch im Bereich der Fassadenelemente mit Moosbegrünung. Hier werden in Einzelfällen, leider ohne wissenschaftliche Grundlage, unglaubliche Leistungen versprochen. Dies verunsichert Planer und Nutzer und könnte in der Zukunft auch die weitere Etablierung und Akzeptanz gefährden. Aus diesem Grund erscheint es dringend geboten, fundierte wissenschaftliche Untersuchungen dieser Fragestellungen zu fördern, um eine solide Datengrundlage zu schaffen und Spekulationen zu vermeiden.

6.3 Beurteilung, und Erprobung und Demonstration

Ein Grundproblem für neue Produktentwicklungen und vermehrte Anwendung von bautechnischen Lösungen, beispielsweise zur Pufferung von Niederschlägen durch Gebäudebegrünungen, ist die derzeit fehlende Bewertbarkeit und somit Vergleichbarkeit konkurrierender Lösungen. Auch die Dauerhaftigkeit alternativer Ansätze ist bislang kaum untersucht und eine Umsetzung in Pilotvorhaben dementsprechend risikoreich. Den Kommunen fehlen damit Hilfestellungen, z. B. in Form von konkreten Kriterien für die Ausgestaltung der Bauleitplanung sowie spezifische Fördermaßnahmen. Ohne kommunale Vorgaben und Förderprogramme wiederum ist der Anreiz zu neuen Produktentwicklungen derzeit noch gering.

Zur Planung sowie zur Analyse von Lösungsstrategien können verschiedene Verfahren herangezogen werden. Beispielhaft und ohne Anspruch auf Vollständigkeit sind im folgenden Ansätze zur Beurteilung und Erprobung aufgezeigt.

6.3.1 Simulationsmodelle zur Analyse möglicher Lösungsstrategien

Mit numerischen Simulationsmodellen lassen sich physikalische Austauschprozesse abbilden und so klimatische Bedingungen berechnen, die eine Beurteilung der resultierenden Auswirkungen auf die Behaglichkeit im urbanen Raum sowie der Effizienz (Kosten-Nutzen-Analyse) von verschiedenen Maßnahmen ermöglichen.

a) Stadtklimamodelle

Die Analyse von atmosphärischen Prozessen über der Stadt sowie von Oberflächenprozessen in bebauten Bereichen sind mit Stadtklimamodellen, wie beispielsweise ENVI-met [35] oder MUKLIMO_3 [37], möglich. Auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen können diese Modelle den spezifischen Bedürfnissen der Stadtplanung gerecht werden. Beispielsweise können bestehende städtische Wärmeinsel-Effekte abgebildet und kritische Zonen mit erhöhten Umweltrisiken innerhalb des Stadtgebietes identifiziert werden. Die Effektivität von städtebaulichen Maßnahmen sowie die Auswirkungen bestimmter Eigenschaften von

Oberflächen der Gebäudehüllen zur Reduzierung der Wärmebelastung können bewertet werden. Stützen sich diese Simulationsrechnungen auf städtische Klimaprojektionsdaten, so lässt sich auch die künftige Entwicklung der spezifischen Aufenthaltsqualität von urbanen Räumen prognostizieren.

b) Zonale Modelle und Komfortbewertung

Ziel zonaler Modelle sind schnelle Simulationen der Strömungsverhältnisse und der Temperaturverteilungen in Räumen oder in begrenzten Zonen. Dazu wird das Luftvolumen in mehrere einzelne Zonen unterteilt. Zonale Modelle stellen einen Kompromiss zwischen komplexen CFD-Berechnungen und der Annahme einer perfekten Luftdurchmischung dar. Mit dem VEPZO-Modell (velocity propagating zonal model) [39] wurde eine neue Formulierung entwickelt. Das VEPZO-Modell nutzt die Strömungsgeschwindigkeit als Zoneigenschaft sowie ein viskoses Verlustmodell, um die Physik der Strömung besser zu erfassen. Ein Anwendungsbeispiel zeigt Bild 7. Auf der Grundlage von Ergebnisdaten einer Simulation mit einem Stadtklimamodell wurden mit dem zonalen Modell das Mikroklima in einem Straßenzug berechnet, um den thermischen Komfort zu bewerten.

c) Gründachmodell und hygrothermische Bauteilsimulation

Neben den Vorteilen wie sommerlicher Wärmeschutz, Regenwasserrückhalt, Schutz der Dachabdichtung oder Lärm- bzw. Schallschutz, bergen Gebäudebegrünungen auch ein gewisses Schadensrisiko. Beispielsweise haben begrünte Dachkonstruktionen in Holzbauweise aufgrund der effektiven Kühlwirkung der begrünten Deckschicht im Sommer ein geringes Trocknungspotential. Im Rahmen eines Forschungsprojekts konnte das Fraunhofer IBP die Grundlagen schaffen, um den Feuchtehaushalt von Dachbegrünungen und der Dachkonstruktion mit Hilfe hygrothermischer Simulationen zuverlässig zu berechnen [41]. Basierend auf vorhandenen und neu durchgeführten Messungen in Holzkirchen, Leipzig, Wien, Kassel und Mailand wurden die spezifischen Oberflächenübergangskoeffizienten und die Materialeigenschaften verschiedener Substrate ermittelt. Die auf diese Weise entwickelten Gründachmodelle bieten Planern und Bauprodukterherstellern eine genaue und zuverlässige Grundlage für die Planung der Feuchtesicherheit von extensiv begrünten Dächern.

Zur Beurteilung der Behaglichkeit im Bereich eines Dachgartens können mit diesem Modell auch die thermischen Auswirkungen einer Begrünung im Vergleich zu einer herkömmlichen Deckschicht mit hoher Genauigkeit prognostiziert werden. Außerdem kann der Wassergehalt im Pflanzensubstrat in Abhängigkeit von den lokalen Klimabedingungen und der Jahreszeit für unterschiedliche Gründachaufbauten vorhergesagt werden.

Dies hilft bei der Auswahl geeigneter Pflanzen und bei der Quantifizierung eines eventuellen Bewässerungsbedarfs.

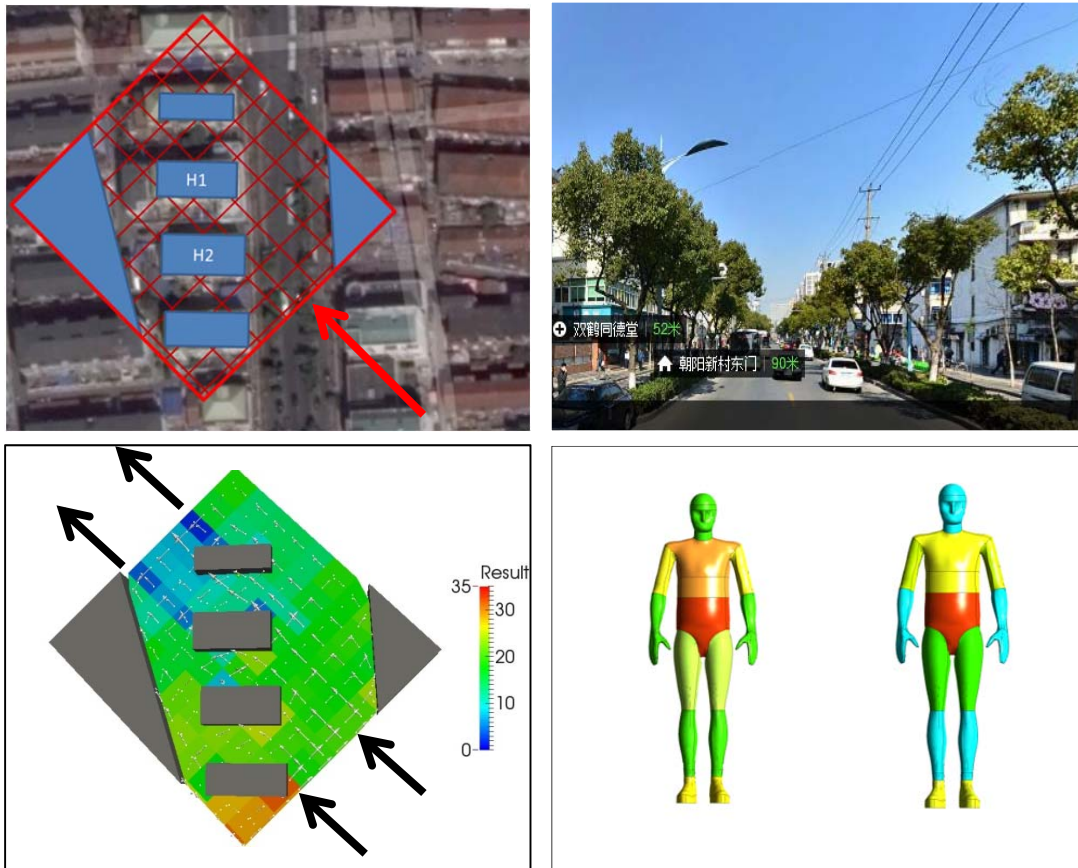


Bild 7:
Simulationsstudie mit zonalem Modell VEPZO zur Komfortbewertung im urbanen Raum. Quelle: Fraunhofer IBP.

6.3.2 Maßgeschneiderte Klimasimulation

Unter maßgeschneiderter Klimasimulation wird hier die Simulation von klimatischen Randbedingungen und die künstliche Bewitterung bei Bauteiluntersuchungen im Labor oder im Freiland verstanden. Um zukünftige Produktentwicklungen schneller und besser bewerten zu können, wurde beispielsweise am Fraunhofer IBP ein Laborverfahren zur praxisgerechten und standardisierten Bewertung von hydroaktiven Bauwerksoberflächen entwickelt. Die Versuchseinrichtung basiert auf einem Sonnensimulator für transparente Fassaden und Dachbauteile, kombiniert mit einer Waagenplattform für Probenflächen von über 5 m². Die Waagenplattform wurde als wasserdichte Wanne ausgebildet, auf der Probekörper (z.B. Elemente der Gebäudehülle oder auch Straßenbeläge) eingebaut werden können. Durch künstlich Beregnung und Besonnung können realitätsnahe Szenarien nachgestellt werden.

In Bild 8 ist die Versuchseinrichtung in Arbeitsposition dargestellt. Durch eine Hydraulik können Sonnenhöhenwinkel von 0 bis 90° und über die Vorschalt-elektronik Bestrahlungsstärken zwischen 600 und 1200 W/m² in Probenebene

bereitgestellt werden. Durch den Aufbau mit 42 Einzelstrahlern und Verwendung von HMI-Leuchtmitteln werden eine hohe Gleichmäßigkeit und ein sonnennahes Spektrum der künstlichen Strahlung erzielt. Weitere Klimagrößen wie Temperatur, Luftfeuchte und Wind lassen sich reproduzierbar einstellen.



Bild 8:
Versuchseinrichtung für praxisnahe Erwärmungs- und Verdunstungsprüfung von Verkehrsflächen bei variablen sommerlichen Randbedingungen (dargestellt sind 60°) [14].

Mit dieser Anlage wurde im Rahmen eines vom BMWi geförderten Verbundvorhabens vom Fraunhofer IBP in Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) und Industriepartnern ein neuartiges Steinkonzept für Verkehrsflächen entwickelt [14].

Die Grundidee besteht darin, in den Pflasterstein einen Wasserspeicher zu integrieren. Das dort eingelagerte Wasser wird bei hochsommerlichen Randbedingungen bei Bedarf an die Steinoberfläche transportiert und kühlt durch die aufgenommene Verdunstungsenthalpie die Steinoberfläche ab. So soll einerseits eine mögliche Wärmeeinlagerung in die Betonschicht gleich bei der Entstehung verhindert werden, welche in den Abendstunden und nachts die erforderliche Auskühlung oft stark abschwächt. Andererseits wird das Behaglichkeitsempfinden bei der Nutzung und beim Aufenthalt in der Nähe versiegelter Flächen signifikant verbessert, da beim Energietransport durch Strahlung die Temperaturdifferenz zwischen den Oberflächen (Pflaster/Passant) in vierter Potenz einfließt.

Erste Messungen haben gezeigt, dass je nach Randbedingungen eine Temperaturminderung in der Größenordnung von zehn Kelvin realistisch erscheint, was näherungsweise dem Temperaturunterschied zwischen einer trockenen Betonoberfläche und einer Grasfläche zur Mittagszeit entspricht.

6.4 Weiterführende Forschung

Im Rahmen der BMBF-Leitinitiative Zukunftsstadt, die Teil des 3. Rahmenprogramms „Forschung für nachhaltige Entwicklung“ (FONA³) ist, wird Forschung zu drei großen Bereichen gefördert: die Entwicklung von nachhaltigen Städten in Deutschland, die Wechselwirkung zwischen Stadt und Land im demografischen Wandel und die Entwicklung urbaner Zentren in globaler Perspektive. Weitere Informationen unter: www.fona.de. Das Fraunhofer IBP hat sich gemeinsam mit Partnerkommunen und Partnern aus der Industrie für ein Projekt beworben: „Bauphysikalische Gestaltung urbaner Oberflächen für nachhaltige Lebens- und Umweltqualität in Städten (Kennwort: BUOLUS)“. Teil dieses Vorhabens ist es unter anderem, Gebäudebegrünung und Fassadenbegrünung weiter zu entwickeln.

7 Fazit

2025 werden ca. 56 % der Weltbevölkerung in Städten leben, die ca. 70 % der gesamten Energieerzeugung verbrauchen werden [11]. Die Bevölkerung der Städte wird also noch deutlich zunehmen und es ist an der Zeit, jetzt an die zukünftigen Erfordernisse zu denken und vorzusorgen. Neben anderen notwendigen Einrichtungen im Bereich Versorgung und Verkehr sind bauteilbezogene Konzepte zur Verbesserung des Stadtklimas ein möglicher Bestandteil der nachhaltigen Gestaltung des Stadtraumes

7.1 Potentiale bautechnischer Lösungen

Die bautechnischen Lösungen haben das Ziel, den urbanen Oberflächen, insbesondere den Oberflächen der Gebäudehülle, Eigenschaften zu verleihen, die einerseits die urbane Erwärmung reduzieren und andererseits den Problemen der Luftschadstoffbelastung entgegenwirken. Die urbane Erwärmung lässt sich durch die Begrenzung des Wärmeeintrags durch solare Einstrahlung sowie durch gesteigerte Wärmeabgabe reduzieren. Eine aussichtsreiche Möglichkeit zur Reduktion des strahlungsbedingten Wärmeeintrags ist die sog. Cool-Color-Technologie, die sich die Trennung des sichtbaren und nicht-sichtbaren Strahlungsspektrums der Sonne zunutze macht. Dadurch kann selbst bei farbigen Oberflächen bis zur Hälfte der energiereichen kurzwelligen Einstrahlung reflektiert werden. Ein spürbarer Effekt zur Reduzierung der Erwärmung ist allerdings nur zu erwarten, wenn ein Großteil des – von den urbanen Wärmeinseln betroffenen – Bereichs mit dieser Technologie ausgerüstet ist.

Neben dem Austausch von Luftmassen durch verbesserte Luftdurchströmung des Innenstadtbereichs ist der Prozess der Verdunstung von Wasser die effektivste Möglichkeit der Wärmeabgabe. Dazu muss Niederschlagswasser von den

urbanen Strukturen aufgenommen und gespeichert werden. In diesem Zusammenhang kommen den horizontalen Oberflächen – beim Gebäude z. B. Flachdächer – die größte Bedeutung zu. Wasserspeichernde Fassadensysteme können hier ebenfalls einen gewissen Beitrag leisten.

Mit der Photokatalyse steht prinzipiell eine relativ preisgünstige Technologie zur Verringerung von gasförmigen Schadstoffen zur Verfügung. Bislang existieren jedoch keine belastbaren Feldstudien, mit denen der wissenschaftliche Beweis erbracht worden wäre, dass die Ausrüstung urbaner Oberflächen mit photokatalytisch aktiven Stoffen einen wesentlichen und dauerhaften Beitrag zur Lösung der Luftschadstoffproblematik in Ballungsgebieten liefern kann.

7.2 Potentiale der Gebäudebegrünung

Bereits jetzt leisten Fassadenbegrünungen einen Beitrag dazu, Temperaturen in den Städten auszugleichen und Luftverschmutzung zu verringern. Zurzeit findet eine intensive Entwicklung des Bereiches Gebäude- und Stadtbegrünung statt. Die Fassadenbegrünung ist ein wichtiger Teil davon und das Interesse an vielfältigen Lösungen und Applikationen steigt rapide. Der „Evolutiondruck“ zur innovativen Weiterentwicklung und Verbesserung bestehender und neuer Techniken ist derzeit sehr stark, sodass zu erwarten ist, dass sich die positiven Leistungen von Fassadenbegrünung hinsichtlich Temperaturnivellierung und Schadstoffreduktion in den nächsten Jahren (Fokus 2030) noch entscheidend verbessern werden. Darüber hinaus werden durch eine Fassadenbegrünung noch weitere Leistungen vollbracht, wie Lärmreduktion, Wasserretention, Erhöhung der lokalen Biodiversität, etc., auch diese Leistungen werden in Zukunft noch ausgebaut werden.

Mit dem „Weißbuch Stadtgrün“ [55] hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit sich deutlich deklariert, Grün in der Stadt und damit auch begrünte Gebäude/Fassaden zu fördern. Unter den genannten Ansätzen sollen hervorgehoben werden: Urbanes Grün wird fester Bestandteil von Baukultur und integrierter Stadtentwicklung. Urbanes Grün und urbane grüne Infrastruktur werden in der Städtebauförderung und in Förderprogrammen gestärkt, städtebauliche Musterentwürfe für die klimaangepasste Entwicklung von städtischen Grün- und Freiflächen werden entwickelt. Mit der Nationalen Klimaschutzinitiative und dem Förderprogramm „Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels“ soll die Bedeutung des Stadtgrüns für den Klimaschutz gefördert werden. Bauwerksbegrünung soll in Zertifizierungssysteme eingebracht werden. Qualitätsvolle Begrünung von Bauwerken soll unterstützt werden. Die Forschung soll verstärkt und vernetzt werden, Modellvorhaben zu den Ökosystemleistungen urbaner grüner Infrastruktur sollen durchgeführt und ein Forschungscluster „Grün in der Stadt“ als Teil der Innovationsplattform Zukunftsstadt eingerichtet werden. Ein verstärktes Bewusstsein für Stadtgrün soll durch Öffentlichkeitsarbeit und Bildung geschaffen werden, der Austausch und Dialog zwischen den Akteuren mit einem Dialogforum unterstützt werden und im Dialog mit Verbänden, Kammern und Hochschulen prüfen, wie die Fachkompetenzen rund um das Thema „Grün in der Stadt“ er-

weitert werden können. Die Absichten sind sehr umfangreich und heben damit auch die Fassadenbegrünung auf eine neue Ebene.

Aktueller Forschungsbedarf/Wissenslücken bestehen derzeit besonders in folgenden Bereichen (siehe auch [56]):

- Feinstaubbindung durch Dach- und Fassadenbegrünungen
- Verdunstungsleistungen verschiedener Dachbegrünungs- und Fassadenbegrünungsformen
- Klimaverbesserung durch Gebäudebegrünung
- Wasserrückhalt und Abflussverhalten bei Stark- und Dauerregen
- Lärm- und Schallschutz durch begrünte Dächer und Fassaden
- Biodiversität begrünter Gebäudeelemente
- Vorkommen und Ausbreitung von Tieren an (begrünten) Fassaden und angrenzenden Innenräumen
- Kosten-Nutzen-Betrachtung Dach- und Fassadenbegrünung

Wie aus den bisher vorliegenden Studien und Betrachtungen hervorgeht könnten mittels Gebäudebegrünungen Reduktionen der Staubbelastung im Bereich von 10-20% in der näheren Umgebung der Gebäude bzw. Temperaturnivellierungen von ca. 2 – 3 °C erreicht werden. Diese Zahlen sollten jedoch durch gezielte Untersuchungen evaluiert und präzisiert werden.

8 Bildverzeichnis

Bild 1:	Schematisches Temperaturprofil einer Stadt, Quelle [6].	6
Bild 2:	Isothermenkarten 31.08.2009 22 Uhr (links) und 01.09.2009 5 Uhr (rechts) (ÖKOPLANA, 2010 Karte 2 und Karte 3a) [10].	8
Bild 3:	Messung des Hitzeaufbaus, bei künstlicher Infrarotbestrahlung, an verschiedenen pigmentierten Alkyd/Melamin-Einbrennlacken auf Aluminium-Panels in Anlehnung an ASTM D 4803-97 [15].	15
Bild 4:	Dreidimensionale Prüfkörper mineralischer Baustoffe, begrünt mit Moos.	20
Bild 5:	Mooswand in Stuttgart, kurz nach der Fertigstellung [36].	20
Bild 6:	Verschiedene Szenarien der Luftzirkulation bei unterschiedlicher Bepflanzung. Links: dichtkronige Straßenbäume, der Luftaustausch mit dem Verkehrsraum ist behindert und Schadstoffe werden verringert abgeführt, rechts: vollflächige Fassadenbegrünung mit ungehindertem Luftaustausch bei gleichzeitig guter Filterleistung (aus [43] nach [51]).	22
Bild 7:	Simulationsstudie mit zonalem Modell VEPZO zur Komfortbewertung im urbanen Raum. Quelle: Fraunhofer IBP.	28
Bild 8:	Versuchseinrichtung für praxisnahe Erwärmungs- und Verdunstungsprüfung von Verkehrsflächen bei variablen sommerlichen Randbedingungen (dargestellt sind 60°) [14].	29

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: NO ₂ und und PM ₁₀ - Überschreitungen von Stunden- bzw. Tagesmittelwerten im Zeitraum 01.01 – 03.10.2017 an Bayerischen Messstationen [11]. Es wurden nur die Messstationen berücksichtigt wurden, bei denen mindestens eine Überschreitung in 2017 angegeben wurde. Bei keiner der Messstationen wurde der 1 h Mittelwert bzw. der Tagesmittelwert für Schwefeldioxid überschritten.	11
Tabelle 2: NO ₂ und und PM ₁₀ - Überschreitungen von Stunden- bzw. Tagesmittelwerten im Jahr 2017 in Stuttgart [12]. Es wurden bei der Zusammenstellung nur die Messstationen berücksichtigt, bei denen Überschreitungen registriert wurden.	12
Tabelle 3: Vor- und Nachteile der einzelnen Luftreinigungstechnologien [19].	17

10 Literatur

- [1] Scheuermann, R.; Pauli, M.; Armour, T.; Law, A.: Cities Alive. Green Building Envelope 2016.
- [2] Brigitta, H.: ZAMG Urban Modeling. Wissenschaftliche Basis klimasensitiver Stadtplanung 2017.
- [3] Steinrücke, M.: Kommunales Handlungs- und Controllingkonzept zur Klimaanpassung in Bochum 2013.
- [4] Fritz Reusswig; Carlo Becker; Wiebke Lass: Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Berlin – AFOK (2016). Abrufdatum 04.10.2017.
- [5] Burkhart: FRANKFURT.de – Bildansicht.
URL: <http://frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=31592851&template=bildanzeige>. Abrufdatum 02.10.2017.
- [6] Frater, H.: scinexx | Temperatur in verschiedenen Stadtgebieten und im Umland.
URL: <http://www.scinexx.de/dossier-bild-680-4-24421.html>. Abrufdatum 04.10.2017.
- [7] Dosch, F.: Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung. Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte ; Ergebnisbericht der fallstudiengestützten Expertise " Klimaanpassungsstrategien zur Überflutungsvorsorge verschiedener Siedlungstypen als kommunale Gemeinschaftsaufgabe", Stand April 2015. Bonn 2015.
- [8] Baden-Württemberg: Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung (1977). Stuttgart.
- [9] Middleton, N.; Thomas, D.: World atlas of desertification, Repr. London [u.a.] 1993.
- [10] Stolz, P.: Bioklimatische Belastung einer Stadt -Am Fallbeispiel der Stadtklimaanalyse Mannheim 2010 am Beispiel des Campus der Technischen Universität Berlin.
URL: https://www.klima.tu-berlin.de/dokuwiki-op14/doku.php?id=wiki:stadtklimaanalyse_mannheim. Abrufdatum 04.10.2017.
- [11] Bayrisches Landesamt für Umwelt: Überschreitungshäufigkeit für Stickstoffdioxid, Feinstaub-PM10 und Schwefeldioxid.
URL: www.lfu.bayern.de/luft/immissionsmessungen/ueberschreitungen_pm10_so2_no2/index.htm. Abrufdatum 04.10.2017.
- [12] https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?luft_messdaten_ueberschreitungen, aufgerufen am 04.10.2017 (2017). URL: www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?luft_messdaten_ueberschreitungen.
- [13] Faltermaier, M.; Stock, H.; Tonndorf, T.: StEP Klima KONKRET 2016.
- [14] Würth, M.; Decker, T.: Verbundvorhaben SeCCoPa - Teilprojekt Entwicklung eines Betonpflasters mit integriertem Wasserspeicher. Programm: InnoNet des BMWi : Laufzeit des Vorhabens: 1.7.2010-30.11.2013. URL: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb17/877268630.pdf>.
- [15] Frischmann, L.: Schwarz und trotzdem kalt (2008) 114(8), S. 30–43.
- [16] Krus, M.; Fitz, C.; Künzel, H. M.: Bautenschutz durch Funktionalität. Bauphysikalisch optimierte Außenschichten gegen mikrobiellen Bewuchs: Bautenschutz. Berlin u.a. 2014.
- [17] Künzel, H. M.; Holm, A.; Sedlbauer, K.; Antretter, F.; Ellinger, M.; Vesely, J.: Feuchtepufferwirkung von Innenraumbekleidungen aus Holz oder Holzwerkstoffen. Stuttgart 2006.
- [18] Guo, M.-Z.; Maury-Ramirez, A.; Poon, C. S.: Self-cleaning ability of titanium dioxide clear paint coated architectural mortar and its potential in field application. In: Journal of Cleaner Production 112 (2016), S. 3583–88.
- [19] Zhang, Yiping.; Mo, Jinhan; Yuguo, Li. et al.: Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review.in: Atmospheric Environment, 45(26), 2011, S. 4329-4343. (2011).

- [20] DIN ISO 22197-1:2016-04: Hochleistungskeramik - Prüfverfahren zur Bestimmung des Luftreinigungsvermögens von halbleitenden photokatalytischen Werkstoffen - Teil 1: Entfernung von Stickstoffmonoxid (ISO 22197-1:2007) (2016).
- [21] ISO 22197-4:2013-04: Hochleistungskeramik - Prüfverfahren zur Bestimmung des Luftreinigungsvermögens von halbleitenden photokatalytischen Werkstoffen - Teil 4: Entfernung von Formaldehyd.
- [22] ISO 22197-5:2013-04: Hochleistungskeramik - Prüfverfahren zur Bestimmung des Luftreinigungsvermögens von halbleitenden photokatalytischen Werkstoffen - Teil 5: Entfernung von Methylmercaptan (2013).
- [23] ISO 22197-2:2011-04: Hochleistungskeramik - Prüfverfahren zur Bestimmung des Luftreinigungsvermögens von halbleitenden photokatalytischen Werkstoffen - Teil 2: Entfernung von Acetaldehyd (2011).
- [24] ISO 22197-3:2011-04: Hochleistungskeramik - Prüfverfahren zur Bestimmung des Luftreinigungsvermögens von halbleitenden photokatalytischen Werkstoffen - Teil 3: Entfernung von Toluol (2011).
- [25] Guo, M.-Z.; Poon, C.-S.: Photocatalytic NO removal of concrete surface layers intermixed with TiO₂. In: *Building and Environment* 70 (2013), S. 102–09.
- [26] Guo, M.-Z.; Ling, T.-C.; Poon, C.-S.: TiO₂-based self-compacting glass mortar. Comparison of photocatalytic nitrogen oxide removal and bacteria inactivation. In: *Building and Environment* 53 (2012), S. 1–6.
- [27] Chen, J.; Kou, S.-c.; Poon, C.-S.: Photocatalytic cement-based materials. Comparison of nitrogen oxides and toluene removal potentials and evaluation of self-cleaning performance. In: *Building and Environment* 46 (2011) 9, S. 1827–33.
- [28] Boonen, E.; Akylas, V.; Barmpas, F.; Boréave, A.; Bottalico, L.; Cazaunau, M.; Chen, H.; Daële, V.; Marco, T. de; Doussin, J. F.; Gaimoz, C.; Gallus, M.; George, C.; Grand, N.; Grosselin, B.; Guerrini, G. L.; Herrmann, H.; Ifang, S.; Kleffmann, J.; Kurtenbach, R.; Maille, M.; Manganelli, G.; Mellouki, A.; Miet, K.; Mothes, F.; Moussiopoulos, N.; Poulain, L.; Rabe, R.; Zapf, P.; Beeldens, A.: Construction of a photocatalytic de-polluting field site in the Leopold II tunnel in Brussels. In: *Journal of environmental management* 155 (2015), S. 136–44.
- [29] Gallus, M.; Akylas, V.; Barmpas, F.; Beeldens, A.; Boonen, E.; Boréave, A.; Cazaunau, M.; Chen, H.; Daële, V.; Doussin, J. F.; Dupart, Y.; Gaimoz, C.; George, C.; Grosselin, B.; Herrmann, H.; Ifang, S.; Kurtenbach, R.; Maille, M.; Mellouki, A.; Miet, K.; Mothes, F.; Moussiopoulos, N.; Poulain, L.; Rabe, R.; Zapf, P.; Kleffmann, J.: Photocatalytic de-pollution in the Leopold II tunnel in Brussels. NO_x abatement results. In: *Building and Environment* 84 (2015), S. 125–33.
- [30] Magistrat der Stadt Wien: Leitfaden Fassadenbegrünung. (2013).
- [31] Wilhelm, X.: Klimaanpassung durch städtisches Grün und Wasser. In: *GI - Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis* 138 (2017) 2, S. 138–44.
- [32] Frahm, J.-P.: Naturpatent Moos. In: *Umwelt & Gesundheit* (2008) 1, S. 13–16.
- [33] Hofbauer, W.K., Forrest, L.L., Hollingsworth, P.M., Hart, M.L.: Preliminary insights from DNA barcoding into the diversity of mosses colonising modern building surfaces. In: *Bryo-hyte Diversity & Evolution* 38 (2016) 1, S. 1–22.
- [34] Hofbauer, W.; Forrest, L.; Hollingsworth, M. L.; Rennebarth, T.; Breuer, K.: Unerwartete Vielfalt bei Moosen an modernen Gebäuden 41 (2014) 532.
- [35] Bruse, M.: Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima. Entwicklung des prognostischen numerischen Modells ENVI-met zur Simulation der Wind- Temperatur- und Feuchteverteilung in städtischen Strukturen, Bochum, Univ., Diss., 1999 2000.
- [36] Stuttgarter Mooswand.
URL: www.gartenpraxis.de/Vorlagen/Webapp/Cache/CMS/10028/2017-03-mooswand-vossen-43_NTM4ODY5MVo.JPG. Abrufdatum 20.07.2017.

- [37] SIEVERS, U.: Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3. Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basis- version und Validierung.
- [38] Betzler, F.: Green Density Factor (GDF) & Green Cooling Factor (GCF). In: Jahrbuch Bauwerksbegrünung (2017), S. 24–25.
- [39] Norrefeldt, V.: VEPZO - Velocity propagating zonal model: A locally refined airflow model for confined spaces to use in optimization applications. Stuttgart 2013.
- [40] Scharf, B.: Beitrag zum Klimaschutz oder teure Dekoration? In: Garten + Landschaft Garten + Landschaft (2012) 5, S. 24–27.
- [41] Zirkelbach, D. M.: Wärme- und Feuchteverhalten von begrünten Dachkonstruktionen. Stuttgart 2017.
- [42] Pugh, T.A.M., MacKenzie, A.R., Whyatt, J.D., Hewitt, C.N.: Effectiveness of Green Infrastructure for Improvement of Air Quality in Urban Street Canyons. In: Environ. Sci. Technol. 46 (2012), S. 7692–99.
- [43] Flohr, S.: 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, 2010.
- [44] Mitchell, R., Maher, B.A., Kinnery, R.: Rates of particulate pollution deposition onto leaf surfaces: Temporal and interspecific magnetic analyses. In: Environmental Pollution 158 (2010), S. 1472–78.
- [45] Reznik, G.; Schmidt, E.: Immissionsminderung durch Pflanzen – Abscheidung und Abwaschung von Feinstaub an Efeu. In: Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 69 (2009) 10, S. 434–38.
- [46] Thönnessen, M.: Staubfilterung durch Gehölzblätter. Beispiele aus Düsseldorf, Essen und Köln. In: (Hrsg.), am 1. Juni 2007 in Berlin-Adlershof. In: Endlicher, W., Gorbachevskaya, O., Kappis, C., Langner, M. (Hrsg.): Tagungs-band zum Workshop über den wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilter-potenzial (qualitativ und quantitativ) von Pflanzen.
- [47] Bartfelder, F. und Köhler, M.: Experimentelle Untersuchungen zur Funktion der Fassadenbegrünung.
- [48] Gorbachevskaya, O.; Herfort, S.: Feinstaubbindungsvermögen der für Bau-werksbegrünung typischen Pflanzen (2012). Saarbrücken.
- [49] Broadmeadow, M., Beckett, P., Jackson, S., Freer-Smith, P., Taylor, G.: Trees and Pollution Abatement. In: Forest Research Organisation (Hrsg.): Forest Research Annual Report and Accounts 1997 – 98.
- [50] Thönnessen, M.; Hellack, B.: Staubfilterung durch Gehölzblätter. Anreicherung und Vermeidung von Stäuben bei Wildem Wein und Platane. In: Stadt + Grün 12 (2005), S. 10–15.
- [51] Bruse, M.: Stadtgrün und Stadtklima. In: LÖBF-Mitteilungen (2003) 1/03, S. 66–70.
- [52] Browning, W. D.; Ryan, C. O.; Clancy, J. O.: 14 Patterns of Biophilic Design (2014).
- [53] Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V. FBB:: Grüne Innovation Fassadenbegrünung. URL: www.fbb.de. Abrufdatum 19.07.2017.
- [54] Lundholm, J. T.: Green Roof and Facades: A Habitat Template Approach. In: Urbanhabitats 4 (2006) 1, S. 87–101.
- [55] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Weißbuch Stadtgrün. Grün in der Stadt - Für eine lebenswerte Zukunft. Berlin 2017.
- [56] <http://www.gebaeudegruen.info/gruen/forschung/aktuell-projekte-bedarf/>. URL: <http://www.gebaeudegruen.info/gruen/forschung/aktuell-projekte-bedarf/>. Abrufdatum 20.07.2017.