Klimaresilienz, Ressourcen- und Energieeffizienz von der Utopie zur Baupraxis

Textile Gebäudefassadenelemente zur Regenwasseraufnahme und Verdunstungskühlung

Die vorliegende Dissertation untersucht einen neuartigen, integralen Ansatz zur effektiven und wirtschaftlichen Steigerung der urbanen Klimaresilienz: Hydroaktive Hüllen (kurz „HydroSKIN“) verbinden Hitze- und Hochwasserschutz mit einem minimalen Ressourcenaufkommen. Die textilen Fassadenelemente zur Regenwasseraufnahme und Verdunstungskühlung stellen den natürlichen Wasser- und Wärmehaushalt des Abregnens und Verdunstens wieder her, der aufgrund von Oberflächenversiegelung in urbanen Gebieten aus dem Gleichgewicht geraten ist und unsere Städte zunehmend in urbane Hitzeinseln und Hochwasserwannen verwandelt. Dank ihres geringen Gewichtes sind die textilen Elemente universell im Neubau wie auch im Gebäudebestand nachrüstbar.

Christina Eisenbarth hat an der Universität Stuttgart im Fachgebiet Fassadentechnik promoviert.

Christina Eisenbarth

Deutscher Studienpreis
1. Preis Sektion Natur- und Technikwissenschaften

Körber Stiftung

Der vorliegende Beitrag wurde beim Deutschen Studienpreis 2025 mit dem 1. Preis in der Sektion Natur- und Technikwissenschaften ausgezeichnet. Er beruht auf der 2024 an der Universität Stuttgart eingereichten Dissertation „Grundlagen zur funktionalen Gestaltung hydroaktiver Hüllen“ von Prof. Dr. Christina Eisenbarth.

Grundlagen zur funktionalen Gestaltung hydroaktiver Hüllen

Abbildung 1: Funktionsprinzip textil- und folienbasierter hydroaktiver Gebäudehüllen zur Minderung städtischer Hochwasser- und Hitzerisiken durch dezentrale Regenwasseraufnahme und Verdunstungskühlung

Hitze- und Hochwasserereignisse stellen Metropolen weltweit zunehmend vor Herausforderungen: Während die steigenden Populations- und Urbanisierungsraten mit einer nahezu ungebremsten Flächenversiegelung und dem Bau immer weiter in den Himmel ragender Hochhausgebäude einhergehen, verlangen die Folgen eines sich wandelnden Klimas nach einer Entsiegelung dichter innerstädtischer Räume.

Die vorliegende Dissertation stellt einen neuartigen, integralen Ansatz zur effektiven und wirtschaftlichen Steigerung der urbanen Klimaresilienz vor – ohne kostbare städtische Bodenfläche zu beanspruchen. Bei minimalem Ressourcen- und Energieaufkommen stellen hydroaktive Hüllen (Abbildung 1) eine synergetische Verbindung von Klimaschutz und Klimaanpassung in den Bereichen Hitze- und Hochwasserschutz dar.

Hydroaktive Hüllen, aus hýdōr$_{griech}$ *Wasser* sowie agere$_{lat}$ *in Bewegung setzen*, nehmen das windgetrieben schräg auf die Gebäudefassade treffende Regenwasser auf und entlasten damit die Kanalisation. Die Nutzung des gesammelten Regenwassers im Gebäude reduziert den gebäudeinternen Frischwasser- und Energieverbrauch. In Hitzeperioden wird Wasser in die textilen Elemente zurückgeführt, um durch Verdunstung Gebäudeinnen- und Stadtraum nachhaltig zu kühlen. Ihr minimales Flächengewicht impliziert, nebst einer signifikanten Reduktion der bauteilgebundenen Masse, grauen Energie und CO_2-Emissionen, eine universelle Anwendbarkeit im Neubau wie auch im Gebäudebestand sowie vielfältige Gestaltungsoptionen durch Form-, Farb- und Mustervariationen.

Relevanz

Vermehrte Starkregenereignisse in Zusammenhang mit hohen Flächenversiegelungsanteilen überfordern die hydraulische Kapazität urbaner Kanalisationssysteme und verwandeln innerstädtische Gebiete immer häufiger in *pluviale Hochwasserwannen*. Tausende Personenopfer und Sachschäden in Milliardenhöhe sind die Folge. Im Jahr 2021 haben Starkregenereignisse allein in Deutschland zu Schäden in Höhe von mehr als 40 Milliarden Euro geführt (Quelle: Bundesumweltministerium).

Auf der anderen Seite absorbieren die versiegelten Straßen- und Gebäudeoberflächen *städtischer Hitzeinseln* einen Großteil der eintreffenden Solarstrahlung und heizen sich an heißen, sonnigen Sommertagen auf Temperaturen von bis zu 50 K über der Lufttemperatur auf. Dies bewirkt einen Anstieg der städtischen Lufttemperatur von bis zu 12 K im Vergleich zum ruralen Umland. Unter dieser städtischen Hitzebelastung leiden gesundheitlich insbesondere ältere Bevölkerungsgruppen, deren thermoregulatorische Fähigkeiten eingeschränkt sind. Im Jahr 2023 wurden in Europa 47.000 Hitzetote verzeichnet (Quelle: Der Spiegel, August 2024). Die Nutzung von Klimaanlagen als Reaktion auf die steigenden Temperaturen verstärkt paradoxerweise den städtischen Wärmeinseleffekt und erhöht den Kühlbedarf.

Beide klimatischen Extrema werden durch die Folgen des Klimawandels künftig verstärkt. Projektionen zufolge werden selbst bei Erreichen des ambitionierten Ziels eines globalen Netto-Null-Emissionsaufkommens bis 2050 die weltweiten Oberflächentemperaturen bis zum Jahr 2100 um weitere 25 % ansteigen – mit fatalen Folgen für die gebaute Umwelt.

Indessen sind laut Feinberg[1] durchschnittlich etwa 11 bis 16 % der Erderwärmung auf Landnutzungsänderungen zurückzuführen – in China sogar etwa 30 %. Feinberg

[1] Feinberg (2020): Urban heat island amplification estimates on global warming using an albedo model

prognostiziert: „*Bleibt der Einfluss von UHI (Urban Heat Islands) in Verbindung mit dem erwarteten Wachstum der Verstädterung unbeachtet, wird er die Bemühungen zur CO_2-Reduzierung weiterhin zunichtemachen und zunehmend zur Erwärmung und zu Rückkopplungsproblemen beitragen.*“

Hitzewellen und Starkniederschläge treffen Städte mit besonderer Härte, was auf ihre spezifischen Interaktionen mit dem Klimasystem zurückzuführen ist. Die Urbanisierung korreliert mit einer progressiven Flächenversiegelung, charakterisiert durch die Applikation impermeabler Materialien wie Asphalt und Beton.

Diese Bodendegradation beeinträchtigt das natürliche thermische und hydrologische Gleichgewicht: Durch die Böden und Pflanzen evapo(transpi)rieren 60 % des eintreffenden Regenwassers mit resultierender Verdunstungskühlung, während etwa 25 % in das Grundwasser infiltrieren. Bebaute Flächen hingegen erfordern die direkte Abführung von bis zu 90 % des Niederschlagswassers als Oberflächenabfluss in die Kanalisation.

Die Kapazitäten städtischer Kanalisationsinfrastrukturen wurden zumeist auf der Basis von vor Jahrzehnten erfassten Niederschlagsraten und abflusswirksamen Flächen berechnet und sind aufgrund der im Zuge des Klimawandels steigenden Niederschlagsraten sowie der weiteren Versiegelung der Böden zunehmend unterdimensioniert. Die Gesamtlänge des Abwasserkanalnetzes allein in Deutschland beträgt (Stand 2018) mit rund 594.000 Kilometern die fast 15-fache Äquatorlänge. Eine Redimensionierung der globalen Abwasserinfrastruktur an die steigenden Niederschlagsabflüsse würde eine kaum bewältigbare ökonomische wie auch ökologische Herausforderung darstellen, die an planetare und monetäre Grenzen stößt.

Mit einer Weltbevölkerung, die 2022 die Acht-Milliarden-Marke überschritt und voraussichtlich bis 2100 auf über zehn Milliarden Menschen anwachsen wird, von denen Prognosen zufolge 85 % in Städten leben werden, wird die klimaresiliente Transformation urbaner Strukturen ein historisch beispielloses Ausmaß erreichen.

Dem Bausektor wird in den Bereichen Klimaschutz wie auch Klimafolgenanpassung eine signifikante Hebelwirkung zugeschrieben. Ein Angleichen des Wasser- und Wärmehaushaltes bebauter Flächen an natürliche Flächen durch die Reduktion des Oberflächenabflusses und die zeitverzögerte Verdunstungskühlung birgt das Potenzial einer nachhaltigen Neutralisierung dieser Dysbalance urbaner Architektur. Im Kontext einer Ökonomisierung der knappen urbanen Flächenressourcen wird den Gebäudehüllen, die einen erheblichen Anteil der städtischen Flächen einnehmen, eine zentrale Bedeutung zur klimatischen Aktivierung zuteil.

Ziel

Die vorliegende Arbeit legt die technologischen und werkstoffspezifischen Grundlagen zur funktionalen Gestaltung und baupraktischen Anwendung hydroaktiver Hüllen. Sie adressiert dabei die folgenden wissenschaftlichen Frage- und Zielstellungen.

[1] Vermögen hydroaktive Hüllen die Dysbalance des natürlichen Wasser- und Wärmehaushaltes in urbanen Räumen zu neutralisieren?

[2] Welchen Beitrag können hydroaktive Hüllen zur Minderung von Hitze- und Überflutungsrisiken leisten?

[3] Wie sollten hydroaktive Hüllen zur Maximierung ihrer Effizienz in den Bereichen Regenwasseraufnahme und Verdunstungskühlung funktional gestaltet werden?

Die Ergebnisse dieser Forschung zielen darauf ab, das Verständnis für die Entwicklung klimaresilienter urbaner Architektur zu erweitern. Sie sollen Architekten, Fassaden- und Stadtplanern sowie politischen Entscheidungsträgern dazu verhelfen, eine Sensibilisierung für die Gestaltung urbaner Hüllflächen zu erlangen, um nachhaltigere und lebenswertere Städte zu kreieren, deren Temperatur- und Wasserbilanz sich derer natürlicher Flächen anzugleichen vermag.

Methodik

Grundlage der Arbeit bildet eine Analyse der globalen gesellschaftlichen, baulichen und klimatischen Wechselwirkungen. In Verbindung mit einem Abgleich zum Stand der Technik wurde der Bedarf einer neuen Technologie zur Klimaanpassung quantifiziert und lokalisiert. Die Hypothese einer Eignung mehrlagiger textil- und folienbasierter Fassadenelemente zur Regenwasseraufnahme und zur Verdunstungskühlung wurde aufgestellt und ein konzeptueller Systemaufbau mit 1.134 Kombinationsmöglichkeiten entwickelt, der individuell nach Klimabedingungen, Gebäudekontext und Nutzeranforderungen konfigurierbar ist.

Die Materialisierung dieses Hüllkonzeptes mit geeigneten textil- und folienbasierten Systemlagen (Außenlage, Abstandslage, optionaler Zwischenlage und Folienlage) erfolgte auf der Basis eines experimentellen, sukzessiven und iterativen Forschungs- und Entwicklungsprozesses. Die empirischen Untersuchungen dieser Arbeit umfassen mehr als 600 Versuche an knapp 40 verschiedenen Textilien in diversen Prüfeinrichtungen. Ein Großteil der durchgeführten Versuche setzte dabei die Realisierung nach derzeitigem Stand der Technik nicht vorhandener Prüfstände und Versuchsinfrastrukturen voraus.

Die empirischen Studien zum Verdunstungskühlvermögen erstreckten sich von Untersuchungen an natürlichen und synthetischen Rohstoffen, diversen textilen Flächengebilden und deren Funktionalisierungsmöglichkeiten bis hin zur Auswahl und Auswertung der spezifischen Systemaußen-, -abstands- und -zwischenlagen. Untersuchungen zum Tropfenaufprallverhalten auf textile Außenlagen wurden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera durchgeführt, um jene Textilien mit minimalem Tropfenrückprall und maximaler -durchlässigkeit zu identifizieren.

Auf Basis der experimentellen Ergebnisse wurden fünf verschiedene mehrlagige Hüllsysteme gebildet, die in ein speziell entwickeltes Aluminiumrahmenprofil mit entsprechender Be- und Entwässerungstechnik integriert wurden. Die mehrlagigen Hüllsysteme wurden im Verbund weiteren empirischen Untersuchungen unter Labor- und Freilandkonditionen unterzogen. Die Einflüsse fluktuierender, realer Witterungsbedingungen wurden durch die messtechnische Evaluierung von fünf Prototypfassaden im Maßstab 1:1 am Demonstrator-Hochhausgebäude des Sonderforschungsbereiches 1244 untersucht. Hiermit wurde Technologiereifegrad (TRL) 7 erreicht.

Die resultierenden Potenziale auf Quartiersebene zur Minderung urbaner Hochwasser- und Hitzerisiken sowie auf Gebäudeebene zur Reduktion des gebäudeinternen Trinkwasser- und Kühlenergiebedarfes wurden anhand einer Fallstudie bilanziert. Abschließend wurden die architektonischen Gestaltungs- und Anwendungsszenarien aufgezeigt.

Ergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein universell anwendbares und individuell nach lokalen Klimabedingungen, Gebäudekontext sowie Nutzeranforderungen konfigurierbares Fassadensystem entwickelt. Dieses verbindet die Aspekte des Klimaschutzes durch einen minimalen Material-, Energie- und CO_2-Fußabdruck mit erweiterten Funktionen zur Klimaanpassung an Hitze und Starkregen.

Zentrales Differenzierungsmerkmal zum Stand der Technik ist das geringe Flächengewicht von 1,2 bis 4,7 kg/m² im wassergesättigten Zustand. Diese Leichtigkeit eröffnet vielfältigste Möglichkeiten der Gebäudeintegration im Neubau wie auch die Nachrüstung im Bestand, dessen Kapazitäten zur Aufnahme additiver Lasten häufig limitiert sind.

Die transluzent bis opak gestaltbaren Hüllsysteme bestehen aus einem speziellen Textil- und Folienaufbau, der in einen Aluminiumrahmen gespannt ist. Die Regentropfen treffen auf eine wasserdurchlässige, textile Außenlage, welche vor Schmutz und Insekten schützt. Eine Abstandslage dient der Wasserweiterleitung und

verstärkt durch ihre hohe Luftzirkulation den Verdunstungskühleffekt. Durch eine optionale Zwischenlage kann vermehrt Wasser gespeichert und die Verdunstungskühldauer in besonders trocken-heißen Klimata verlängert werden. An einer wasserführenden Folienlage fließt das Regenwasser in eine Rinne im unteren Rahmenprofil ab. Von dort kann es in ein Reservoir geleitet oder im Gebäude als Brauchwasser genutzt werden, um den Frischwasserverbrauch in einem Wohngebäude um bis zu 46 % zu senken. An heißen Tagen wird entsprechend aufbereitetes Wasser über Sprühdüsen im oberen Rahmenprofil in die Textilien zurückgeführt, um durch Verdunstung den Stadtraum und das Gebäudeinnere zu kühlen sowie den Gebäudekühlenergiebedarf drastisch zu senken.

Textilien zeichnen sich nicht nur durch ihre Leichtigkeit aus, sondern weisen durch ihre gezielt anpassbare Faser- und Flächengebildestruktur zudem eine einzigartige Effektivität im Bereich der Regenwasseraufnahme wie auch der Verdunstungskühlung auf. Mit minimalem Materialaufkommen kann eine maximale Oberfläche zur Wasseraufnahme und -verdunstung generiert werden. Ihre funktionalen Eigenschaften können dabei präzise an die spezifischen Anforderungen in der Architektur angepasst werden. Polyestertextilien lassen sich zudem aus 100 % PET-Flaschenabfällen fertigen und nach ihrem Lebensende zu 100 % rezyklieren.

Dank der feinmaschigen Struktur der textilen Außenlagen können hydroaktive Hüllen nahezu das gesamte windgetriebene Regenwasser, das auf die Gebäudefassade trifft, aufnehmen. Freilandmessungen dieser Arbeit ergaben, dass die Regenwasseraufnahme der hydroaktiven Hüllen bei senkrechter Windanströmung in etwa der Niederschlagsmenge pro Quadratmeter auf die Dachfläche eines selben Gebäudes entspricht. Bei seitlicher Windanströmung kann von der Fassade sogar mehr als das Doppelte der auf die Dachfläche fallenden Niederschlagsmenge aufgenommen werden. Während eines Starkregenereignisses im August 2024 nahmen die hydroaktiven Hüllprototypen am Demonstrator-Hochhaus in weniger als einer halben Stunde mehr als 24 Liter pro Quadratmeter auf.

An einem heißen Sommertag kann das gesammelte Regenwasser zur Verdunstungskühlung genutzt werden. Bei Außentemperaturen von ca. 29 °C im Schatten und 25 % Luftfeuchte erreicht die textile Oberfläche der hydroaktiven Hüllen im trockenen Zustand eine Temperatur von etwa 35 °C. Zum Vergleich: Eine schwarze Metallfassade heizt sich unter äquivalenten Bedingungen auf 80 bis 90 °C auf. Durch die Bewässerung der Textilfläche wird die Oberflächentemperatur auf bis zu 17,0 °C gesenkt. Die durch Verdunstung erzielbaren Oberflächentemperaturreduktionen betragen bis zu 26,2 K zwischen trockenem und feuchtem Zustand bei Kühlleistungen von bis zu 492 W/m². Damit weisen 50 bis 100 m² hydroaktive Hüllfläche die

äquivalente Kühlleistung einer 50 Jahre alten Eiche auf, und 5,7 m^2 könnten in der Theorie eine Klimaanlage ersetzen.

Die Verdunstungskühlung stellt eine sich selbst regulierende Kühltechnologie dar, die unter sommerlichen Bedingungen eine signifikante Abkühlung erzielt, jedoch unter niedrigen Außentemperaturen keinen feststellbaren Kühleffekt bewirkt, wie die Messung an einem kalten Herbsttag zeigte. Unerwünschte Auskühleffekte und Energieverluste des Gebäudes an kalten Regentagen sind in der Folge auszuschließen.

Besonders effektiv ist die Anwendung hydroaktiver Hüllen an hohen Gebäuden: Die Regenerträge auf eine vertikale Gebäudefassade steigen mit der Gebäudehöhe unter den zunehmenden, auf die Fassade wirkenden Windlasten an. Ab einer Gebäudehöhe von 29 m übersteigen die quadratmeterbezogenen Regenerträge auf die Gebäudefassade die Niederschlagserträge auf die Boden- oder Dachfläche desselben Gebäudes. So trifft beispielsweise auf die Fassade des Demonstrator-Hochhausgebäudes die 17-fache Regenmenge im Vergleich zu seiner Dachfläche. Die mit der Gebäudehöhe zunehmende Windgeschwindigkeit konnte zudem als maßgebender Antriebsfaktor der Verdunstungskühlung identifiziert werden, die auch höhere Luftfeuchten beispielsweise tropischer Standorte zu kompensieren vermag. Mit der Durchfeuchtung der Fassadenelemente geht nicht nur eine unmittelbare und spürbare Temperaturreduktion einher, sondern auch ein kühler Abwind, der bei Anwendung hydroaktiver Hüllen an hohen Gebäuden in den Stadtraum zieht.

Die Ergebnisse nach 15-monatiger Exposition unter freier Bewitterung deuten auf eine Eignung hydroaktiver Hüllen für den praktischen Einsatz in der Architektur hin. Mit einer Lichttransmission von 8 bis 25 % liegen hydroaktive Hüllen in dem für den Tageslichtkomfort im Innenraum empfohlenen Bereich und eignen sich auch für die Anwendung als Sonnen- und Blendschutzelemente vor verglasten Fassadenbereichen.

Für die Rekordregenfälle im Juli 2023, die in Chicago schwere Überschwemmungen verursachten, wurde an einem Hochhausquartier die Wirksamkeit hydroaktiver Hüllen zur Reduktion des Oberflächenabflusses und ihr Beitrag zum Hochwasserschutz untersucht. Eine partielle Anbringung hydroaktiver Hüllen auf der Nord- und Ostseite des Gebäudes vermochte den Oberflächenabfluss und damit verbundene Hochwasserrisiken um 54,3 % zu reduzieren, während eine vollflächige Dachbegrünung nur zu einer Reduktion von 30,8 % beitrug. Hydroaktiven Hüllen kann folglich, insbesondere in dicht besiedelten Stadtzentren, ein hohes Potenzial zugeschrieben werden, die begrenzte Retentionskapazität der Dachflächen effektiv und wirtschaftlich zu erweitern.

Das Wirkpotenzial hydroaktiver Hüllen zur Minderung urbaner Hitzeinseln wurde am ebengenannten Chicagoer Hochhaus für den Folgetag mit einem Wetterhoch und sommerlichen Temperaturen um die 30 °C betrachtet, an dem die Bürger ironischerweise aufgefordert wurden, Wasser einzusparen, um die Stadt reinigen zu können. Konventionelle urbane Oberflächen wie Beton-Gehwege, asphaltierte Straßen und dunkle Metallfassaden heizen in der Theorie ein immenses Stadtraumluftvolumen von 2.746.292 m^3/h, sprich das Volumen von 10 Fußballfeldern unter ca. 38 m Lufthöhe, um 10 K auf, wobei die Straßen- und Verkehrsflächen mit 21,3 % sowie die dunkle Westfassade des Gebäudes mit 31,2 % einen signifikanten Anteil beitragen. Durch die partielle Anbringung hydroaktiver Hüllen mit einem Flächenanteil von 50 % ausschließlich an der Westfassade des Gebäudes kann diese städtische Hitzeinsel um 19,3 % reduziert werden, und mit einer hydroaktiven Hüllfläche von 42,7 %, der Gesamtfassade des Gebäudes ließe sich die Aufheizung des kompletten Quartiers vollständig kompensieren. Ein Quadratmeter hydroaktive Hüllfläche neutralisiert dabei die Aufheizung von ca. 1,8 Quadratmetern Beton-, 1,4 Quadratmetern Asphalt- sowie 1,6 Quadratmetern dunkler Metallfassade. Die Erträge eines einzelnen, wie des zuvor betrachteten, Regenereignisses sind ausreichend, um den mit der Gebäudekühlung einhergehenden Wasserverbrauch ca. ein Jahr zu decken.

Als vorgehängte Fassadenelemente kühlen hydroaktive Hüllen den Innenraum indirekt. Durch die Kühlung der Gebäudeaußenseite bewirken sie eine Reduktion des Wärmeeintrags in das Gebäude, der abhängig von der Isolation der Fassade den Innenraum aktiv kühlt. Eine Anwendung vor transparenten und transluzenten Fassaden als Sonnenschutz mindert zusätzlich den Wärmeeintrag durch Solarstrahlung. Während die Anbringung eines passiven Sonnenschutzes den Wärmeeintrag in das Gebäude um 66 % mindern kann, wird durch die Nutzung hydroaktiver Hüllen eine Reduktion um 86 % mit den entsprechenden Einsparungen des Energieverbrauchs für die Gebäudeklimatisierung erzielt.

Mehrwert

Hydroaktive Hüllen adressieren ein breites Spektrum an Zielgruppen: Für private und gewerbliche Gebäudeeigentümer bieten sie eine kosteneffiziente Möglichkeit Immobilien klimaresilient zu gestalten sowie Energie- und Wasserkosten zu senken. Bauunternehmen und Planungsbüros profitieren von der Integration dieser Technologie in ihre Projekte, um den steigenden Anforderungen an klimaangepasste Gebäude gerecht werden zu können sowie ihre Marktposition und Wettbewerbsfähigkeit zu stärken. Die öffentliche Hand kann hydroaktive Hüllen einsetzen, um den städtischen Hochwasser- und Hitzeschutz im öffentlichen Raum zu verbessern und eine nachhaltige Stadtentwicklung zu unterstützen.

Die Ergebnisse dieser Forschung setzen wirtschaftliche Impulse für die Bau- und Textilindustrie. Die Bauindustrie profitiert von einer textilen Innovation zur Erschließung eines neuen global relevanten Geschäftsfeldes, während die Textilindustrie durch die steigende Nachfrage nach technischen Textilien für den Bausektor wächst.