

# **KLIBAU – Weiterentwicklung und Konkretisierung des Klimaangepassten Bauens**

Handlungsempfehlungen für Planer und Architekten

## **Forschungsprogramm**

Zukunft Bau, ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BMI)

## **Projektlaufzeit**

August 2018 bis November 2019

## **Aktenzeichen**

SWD – 10.08.17.7-18.33

## **Im Auftrag**

des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

## **bearbeitet von**

Dr.-Ing. Marc-Steffen Fahrion, Werner Sobek Green Technologies GmbH, Stuttgart  
Prof. Dr. Susan Draeger, Werner Sobek Green Technologies GmbH, Stuttgart  
Dr. rer. nat. Michael Lakatos, ProOkios, Kaiserslautern  
Prof. Dr. sc. hum. MArch. Dipl.-Ing. Timo Schmidt, Hochschule Augsburg, Augsburg  
M. Eng. Christoph Nickl, Werner Sobek Green Technologies GmbH, Stuttgart  
M. Sc. Moritz Brombacher, Werner Sobek Green Technologies GmbH, Stuttgart  
M. Sc. Deekshitha Bangalore, Werner Sobek Green Technologies GmbH, Stuttgart  
Dr.-Ing. Wolfgang Sundermann, CST CumSolTec GmbH, Stuttgart



## INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung.....	4
2. Grundverständnis.....	7
3. Sommerhitze.....	10
3.1. Grundlagen .....	10
3.2. Fenster, Verglasungen und Sonnenschutzsysteme.....	10
3.3. Thermische Speichermassen und passive Kühlung.....	14
3.4. Dachaufbau und Oberflächengestaltung .....	16
3.5. Dach- und Fassadenbegrünung.....	17
4. Starkregen.....	20
4.1. Grundlagen .....	20
4.2. Dachentwässerung und Entwässerungssysteme.....	21
4.3. Fassade .....	23
4.4. Dach.....	23
4.5. Freiflächen und Außenanlagen .....	26
5. Hochwasser.....	28
5.1. Grundlagen .....	28
5.2. Keller.....	31
5.3. Fußbodenaufbau .....	31
5.4. Außenwände und Fassade .....	32
5.5. Weitere Anpassungsmaßnahmen .....	33
6. Hagel.....	35
6.1. Grundlagen .....	35
6.2. Außenjalousien und Rollläden.....	37
6.3. Dach und Dachaufbauten .....	37
6.4. Fassade .....	39
6.5. PV-Anlagen und Solarkollektoren.....	41
7. Wind.....	43
7.1. Grundlagen .....	43
7.2. Lamellenjalousien.....	44
7.3. Dachaufbauten.....	44
7.4. Dach und Fassade .....	46
8. Biologische Vielfalt .....	49
8.1. Grundlagen .....	49
8.2. Dachbegrünung .....	54
8.3. Fassadenbegrünung.....	55
8.4. Außenanlagen.....	57
8.5. Verwendung gefährdeter Pflanzengesellschaften zur Gebäudebegrünung.....	59
9. Ausblick und zukünftige Entwicklungen.....	60
10. Literaturverzeichnis .....	62
Abbildungsverzeichnis .....	67
Tabellenverzeichnis .....	68
Impressum .....	69

## 1. Einleitung

Die Auswirkungen des Klimawandels sind bereits heute spürbar und werden sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts noch wesentlich verstärken. Das sich verändernde Klima führt dazu, dass sich die Wahrscheinlichkeit für Extremwetterereignisse bereits erhöht hat und noch weiter erhöhen wird (Hassol et al. 2016). Wesentliche Einwirkungen, die sich auf die gebaute Umwelt auswirken, sind Sommerhitze, Starkregen, Hochwasser, Hagel und Sturm. Den Normen zur Bemessung und Auslegung von Gebäuden und Bauteilen liegen statistische Auswertungen von Beobachtungsdaten zahlreicher Wetterstationen über längere Zeiträume zugrunde. Verändern sich die Einwirkungen infolge des Klimawandels gegenüber der normativen Grundlage, kann dies erhebliche Auswirkungen auf Gebäude haben. Infolge der langen Standzeiten und Modernisierungszyklen wirken sich aktuelle Planungsentscheidungen bei Neubauten bis weit in die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts aus. Das bedeutet, dass die gebaute Umwelt schon heute auf die zukünftigen Klimaeinwirkungen ausgelegt werden muss, um dauerhaft widerstandsfähige und klimaangepasste Gebäude zu erreichen. Eine vorausschauende Planung von Neubauten verhindert vorzeitige Modernisierungs- und Sanierungsmaßnahmen. Werden infolge von Schadensereignissen oder Anpassungsmaßnahmen Bauteile vor Ablauf ihrer planmäßigen Lebensdauer ausgetauscht, führt dies zu einem erhöhten Bedarf an grauer Energie, da sich die im Lebenszyklus eines Gebäudes benötigte Materialmenge insgesamt erhöht.

Infobox 1: Ökobilanz, Graue Emissionen und Graue Energie

**Ökobilanz:** Die Ökobilanz bzw. Lebenszyklusanalyse ist ein normiertes Verfahren, um zu analysieren, welche Auswirkungen ein Produkt auf die Umwelt hat. Dabei werden dem Produkt die Energie- und Stoffströme sowie Abfall- und Emissionsmengen zugerechnet, die für die Rohstoffgewinnung, Herstellung, Transport, Gebrauch und Entsorgung anfallen. Die grauen Emissionen und die graue Energie sind Ergebnisse der Wirkungsabschätzung einer Ökobilanz.

**Graue Emissionen:** Treibhausgasemissionen, die bei der Rohstoffgewinnung, Herstellung und Weiterverarbeitung von Baumaterialien entstehen.

**Graue Energie:** Die Graue Energie berechnet sich aus der Summe aller für die Produktherstellung benötigten nicht-erneuerbaren Primärenergieträger und energetisch nutzbaren fossilen Rohstoffe sowie der aufgewandten Wasserkraft eines bestimmten Systems. Ein System umfasst i. d. R. alle wichtigen Prozesse, vom Rohstoffabbau beginnend bis zum Ort der Bereitstellung des Produkts oder der Leistung. Entscheidend für die Aussagekraft der Grauen Energie sind einerseits die Art der Bewertung der Energieträger und andererseits die Grenzen des betrachteten Systems.

Bei der reinen Klimaanpassung handelt es sich um eine Reaktion auf bereits eingetretene oder zu erwartende Änderungen des Klimas. Die Widerstandsfähigkeit von Bauteilen und Gebäuden wird erhöht, damit auch zukünftig keine Schäden durch Starkregen, Hochwasser, Hagel oder Sturm auftreten. Im Fall der Sommerhitze wird die Widerstandsfähigkeit erhöht, um die Behaglichkeit und Gesundheit der Nutzer in den Innenräumen der Gebäude langfristig sicherzustellen. Während es sich bei der Klimaanpassung um eine reine Reaktion handelt, versucht das klimaangepasste Bauen die Widerstandsfähigkeit zu erhöhen und gleichzeitig aktiv die Umwelt positiv zu beeinflussen. Direkt vor Ort kann die Umwelt positiv beeinflusst werden, indem beispielsweise durch Maßnahmen zur Regenwasserrückhaltung die Gefahr von Überflutungen reduziert wird. Zudem kann durch die Bepflanzung der Außenanlagen und Gebäudebegrünung das Mikroklima verbessert, die biologische Vielfalt (Biodiversität) erhöht und die Schadstoffbelastung der Luft reduziert werden. Durch die Auswahl der Baumaterialien können die grauen Emissionen und der nicht erneuerbare Energiebedarf für deren Herstellung beeinflusst werden. Die Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Weiterverarbeitung von Baumaterialien beeinflussen direkt die weitere Entwicklung des

Klimawandels und damit auch den Umfang der notwendigen Anpassungsmaßnahmen. Sie haben folglich Auswirkungen auf die globale Umwelt. Es wäre widersprüchlich, Klimaanpassungsmaßnahmen zu wählen, die zu hohen Treibhausgasemissionen führen und damit eine Verstärkung des Klimawandels hervorrufen, wenn Alternativen existieren. Die gesamten Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus eines Gebäudes setzen sich aus den grauen Emissionen und den Emissionen zum Betrieb des Gebäudes (Heizung, Kühlung, Beleuchtung) zusammen. Bei neu errichteten Wohngebäuden, die dem aktuellen energetischen Standard entsprechen, sind die grauen Emissionen für mehr als 20 % der gesamten Treibhausgasemissionen im 50-jährigen Lebenszyklus verantwortlich. Bei sehr energieeffizienten, neu errichteten Wohngebäuden sind die grauen Emissionen durchschnittlich sogar für über 40 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich. In Extremfällen können die grauen Emissionen einen Anteil von 90 % der gesamten Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus erreichen (Röck et al. 2020). Ebenfalls in einem weltweiten oder zumindest überregionalen Maßstab wirkt sich die Verwendung recyclinggerechter Konstruktionen aus. Werden Bauteilaufbauten gewählt, die eine sortenreine Trennung der Materialschichten erlauben und bei denen die verwendeten Materialien in die natürlichen oder technischen Kreisläufe rückführbar sind, dann kann die Umwelt gleich in mehrfacher Hinsicht entlastet werden. Es werden weniger natürliche Ressourcen benötigt, wenn Altmaterial in den Produktionskreislauf rückgeführt werden kann. Zudem wird die Abfallmenge reduziert, die deponiert werden muss. Zu guter Letzt verringert sich in vielen Fällen auch der Energiebedarf für die Materialherstellung, wenn anstelle von Primärrohstoffen Sekundärrohstoffe eingesetzt werden. Beispielsweise ist für die Herstellung von Aluminium aus Schrott im Vergleich zur Herstellung aus dem Rohstoff Bauxit nur 12 % der Energie erforderlich (UBA 2017). Um eine sortenreine Trennung zu ermöglichen ist die Verwendung von lösbaren Verbindungsmitteln von wesentlicher Bedeutung. Die Verwendung von Verbundwerkstoffen oder Klebeverbindungen stehen einem hochwertigen Recycling in der Regel entgegen.

Infobox 2: Begrifflichkeiten des Klimaangepassten Bauens

**Klimaeinwirkung:** Das Klima ist definiert als die Zusammenfassung der Wettererscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort charakterisieren. Dementsprechend sind Klimaeinwirkungen Wetterelemente, die sich auf ein Gebäude auswirken können, wie Niederschlag, Wind, Lufttemperatur. Infolgedessen werden die damit verbundenen Ereignisse Starkregen, Hochwasser, Hagel, Sturm, Hitze und Trockenheit im Folgenden als Klimaeinwirkungen bezeichnet.

**Umwelteinwirkung:** Parameter die das Gebäude, seine Nutzer und die Umwelt in seiner Umgebung beeinflussen aber nicht ausschließlich oder unmittelbar vom Klima abhängen: Biodiversität, Feinstaub, Recyclingfähigkeit.

**Klimapotential:** Die Möglichkeit das Klima oder die Klimaeinwirkungen positiv zu beeinflussen.

**Umweltpotential:** Die Möglichkeit die Umwelteinwirkungen positiv zu beeinflussen.

Sowohl der Rückgang der biologischen Vielfalt als auch die Feinstaubbelastung in Innenstädten sind sehr aktuelle und viel diskutierte Fragestellungen. Auf beide Aspekte haben Siedlungen und einzelne Gebäude einen wesentlichen Einfluss. Insbesondere die Pflanzenauswahl bei der Gestaltung von Außenanlagen und Gebäudebegrünungen leistet einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der biologischen Vielfalt oder zur Reduktion der Luftbelastung mit Schadstoffen. Heimische Pflanzenarten bieten Nahrungsgrundlage für Insekten und Vögel. Die Gebäudebegrünung oder die biologisch optimierte Gestaltung einzelner Gartenflächen kann existierende Lebensräume erweitern oder Biotope, die durch Siedlungsflächen voneinander getrennt sind wieder miteinander vernetzen, wodurch ein Genaustausch ermöglicht wird. Für die Gebäudebegrünung können auch Moose und Flechten eingesetzt werden. Diese sind in der Lage, Feinstaub nicht nur auf den Blättern abzulagern sondern in die Zellen einzulagern.

Neben der Biodiversität und der Feinstaubbindung werden in dieser Broschüre weitere Klima- und Umweltpotentiale betrachtet, die durch die Oberflächengestaltung, Materialauswahl sowie sorgsame Konstruktion von Bauteilaufbauten aktiviert werden können. Die Oberflächengestaltung von Bauteilen, Weg- und Stellplatzflächen kann sich positiv auf das Mikroklima in der Umgebung auswirken. Dunkle Oberflächen mit hoher thermischer Speichermasse führen zu einer Aufheizung und Wärmespeicherung, die bis in die Nacht- und frühen Morgenstunden spürbar sein können. Auch die Gestaltung von Freiflächen mit verschiedenen Begrünungsformen kann sich sehr positiv auf die Behaglichkeit und die Lufttemperaturen in unmittelbarer Umgebung auswirken. Helle Bauteiloberflächen in Kombination mit Begrünung können die Klimaeinwirkung Sommerhitze lokal reduzieren und werden dementsprechend als Klimapotential berücksichtigt.

Infolge des Klimawandels ist mit heftigeren Starkregenfällen zu rechnen. Flachdächer und Gartenflächen lassen sich so planen, dass Regenwasser zwischengespeichert werden kann und verzögert abfließt bzw. in das Erdreich versickert. Durch die Regenwasserrückhaltung kann der Spitzenabfluss reduziert und somit das Kanalnetz entlastet werden. Folglich lässt sich auch die Gefahr von lokalen Überflutungen durch die Überlastung der Abwassersysteme verringern. Rückhaltevolumina können in den Außenanlagen relativ einfach durch eine Geländemodellierung geschaffen werden. Aber auch technische Systeme wie Rigolen oder Zisternen sind geeignet. Bei Rigolen wird das Regenwasser zeitversetzt versickert, während Zisternen das Regenwasser speichern und es dadurch beispielsweise für die Gartenbewässerung nutzbar machen.

Anhand eines leicht verständlichen Beispiels werden die Ziele und komplizierten Wechselwirkungen des klimaangepassten Bauens verdeutlicht: Die Planung für ein Flachdach mit freiliegender Abdichtungsbahn soll an eine erhöhte Gefährdung durch Hagel angepasst werden. Dies kann beispielsweise durch Verwendung einer hellen Kunststoffabdichtungsbahn mit hohem Hagelwiderstand geschehen. Auf dem Markt sind entsprechende Produkte erhältlich, die auch den Aufprall eines Hagelkorns mit 5 cm Durchmesser ohne Schaden überstehen. Dadurch wird nicht nur eine Anpassung an die Klimaeinwirkung Hagel erreicht, sondern es wird gleichzeitig eine Reduktion der Lufttemperatur und der Temperatur in den Innenräumen unterhalb des Dachs erzielt. Die Temperaturreduktionen sind auf die erhöhte Reflexion der Sonnenstrahlung durch die helle Abdichtungsbahn im Vergleich zu einer dunklen Bitumendachbahn zurückzuführen. Folglich werden zwei Klimapotentiale erschlossen. Die Hitzebelastung im Inneren des Gebäudes und die Lufttemperatur in unmittelbarer Umgebung des Gebäudes werden gegenüber einer konventionellen, dunklen Bitumendachbahn reduziert. Eine weitere Möglichkeit wäre es, die Dachabdichtung der Einwirkung Hagel komplett zu entziehen, indem das Flachdach begrünt wird. Durch diese Maßnahme könnten drei Klimapotentiale und mindestens zwei Umweltpotentiale erschlossen werden. Wie im Beispiel zuvor würde die Hitzebelastung im Inneren des Gebäudes und die Lufttemperatur in unmittelbarer Umgebung reduziert werden. Dies ist auf die zusätzliche Dämmwirkung des Substrats, die Verschattung der Dachoberfläche durch die Pflanzen und die Verdunstung der Pflanzen zurückzuführen. Des Weiteren würde der Regenabfluss verzögert und damit einer Überlastung der Kanalisation und somit einer Überschwemmung bei Starkregenereignissen entgegengewirkt werden. In Abhängigkeit der Pflanzenauswahl für die Dachbegrünung kann eine Erhöhung der biologischen Vielfalt und eine Abscheidung von Feinstaub erzielt werden. Auf den Materialbedarf und die damit in Zusammenhang stehenden grauen Emissionen würde sich die Dachbegrünung hingegen negativ auswirken. Durch die zusätzliche Auflast müsste die Stahlbetondecke größer dimensioniert werden und auch die Herstellung des Vegetationssubstrats sowie der weiteren notwendigen Abdichtungen und Schutzschichten (z.B. Drainage, Wurzelschutz) führt zu zusätzlichen Treibhausgasemissionen.

## 2. Grundverständnis

Die vorliegende Broschüre befasst sich mit einer fiktiven Musterliegenschaft, an der das klimaangepasste Bauen exemplarisch aufgezeigt und analysiert wird. Es handelt sich um ein Mustergebäude mit zugehörigem Mustergrundstück. Dies ist von wesentlicher Bedeutung, da die Sensitivität eines Gebäudes gegenüber einigen Klimaeinwirkungen durch die Umgebung aktiv beeinflusst werden kann. Dies gilt insbesondere für die Einwirkungen Hitze und Überflutung infolge von Starkregen. In beiden Fällen kann eine Entsiegelung des Grundstücks zu einer Reduktion der Sensitivität führen, da der städtische Wärmeinseleffekt (siehe Infobox 3) reduziert wird oder Regenwasser versickern kann. Das bedeutet, dass der Betrachtungshorizont auf die unmittelbare und direkt beeinflussbare Umgebung des Gebäudes erweitert wird. Es ergeben sich folglich Handlungsempfehlungen, die jeder Grundstückseigentümer unabhängig und auf eigenes Betreiben realisieren kann.

Infobox 3: Städtischer Wärmeinseleffekt

### Städtischer Wärmeinseleffekt

Die bodennahen Lufttemperaturen in Städten sind gegenüber der ländlichen Umgebung in der Regel erhöht. Bei Grünflächen wird ein Teil der Sonnenenergie zur Verdunstung von Wasser aus dem Erdreich oder von Pflanzen aufgewendet. Im Gegensatz dazu wird bei versiegelten Flächen Regenwasser schnell abgeführt und die Sonneneinstrahlung führt direkt zu einer fühlbaren Temperaturerhöhung der Oberflächen. Je dunkler die Fläche, umso größer der Effekt. Die hohe Wärmespeicherfähigkeit von Straßen- und Bauteiloberflächen hat zur Folge, dass diese bis in die Morgenstunden erhöhte Oberflächentemperaturen aufweisen. Hinzu kommt, dass durch die Verbauung die nächtliche Wärmeabstrahlung an den Himmel reduziert ist. Die Bebauung erhöht die Oberflächenrauigkeit und hat damit geringere Windgeschwindigkeiten zur Folge. Dies reduziert auch den Luftaustausch mit der Umgebung. Die Abwärme aus der Gebäudeklimatisierung, dem Verkehr und von Industrieanlagen verursacht einen weiteren Temperaturanstieg.



Abbildung 1: Mustergebäude

Bei dem Mustergebäude handelt es sich um einen Neubau. Lediglich die Geometrie bzw. Kubatur des Mustergebäudes sind festgelegt (siehe Abbildung 1). Es wird dementsprechend kein Bestandsgebäude mit existierenden Bauteilaufbauten und Schichtenfolgen betrachtet, die es zu ertüchtigen gilt, sondern ein Neubau, bei dem das Gebäude im Sinne des klimaangepassten Bauens variiert wird. Dementsprechend wird auch davon ausgegangen, dass die Tragwerksplanung an die unterschiedlichen entstehenden Lösungen angepasst werden kann. Für die Musterliegenschaft ist kein exakter Standort definiert. Es ist lediglich festgelegt, dass sie sich innerhalb Deutschlands befindet.

Infolge des Klimawandels sind die Klimaeinwirkungen und damit die Exposition einer Liegenschaft keine konstanten Kenngrößen, sondern unterliegen einer zeitlichen Veränderung. Die reine Klimaanpassung sieht vor, ein Gebäude so zu entwerfen und zu dimensionieren, dass es auch den zukünftigen Klimaeinwirkungen widerstehen kann. Dabei wird das Gebäude ausschließlich als passive Struktur gesehen, die die Einwirkungen erträgt. Demgegenüber zeichnet sich das klimaangepasste Bauen dadurch aus, dass die Liegenschaft nicht nur auf Widerstandsfähigkeit dimensioniert wird, sondern gleichzeitig Klima- und Umweltpotentiale erschlossen werden.

Im Rahmen der vorliegenden Broschüre werden die Klimaeinwirkungen Sommerhitze, Starkregen, Hochwasser, Hagel und Wind behandelt. Nicht alle Regionen Deutschlands sind von jeder Klimaeinwirkung im gleichen Maß betroffen. Beispielsweise sind die Küstengebiete und Norddeutschland deutlich stärker von der Klimaeinwirkung Wind betroffen als der Süden. Demgegenüber ergibt sich für Hagel eine umgekehrte Gefährdungslage. Starke Hagelereignisse sind im Süden Deutschlands viel wahrscheinlicher als im Norden (Abbildung 2). Die Klimaänderungssignale für die untersuchten Klimaeinwirkungen sind sehr unterschiedlich. Während für die Sommerhitze ein sehr eindeutiger Anstieg der Bedeutung für das Bauwesen zu erwarten ist, können aus Beobachtungsdaten und Klimamodellen für die Einwirkungen Hagel und Wind keine klaren Rückschlüsse bezüglich einer Verstärkung oder Abschwächung infolge des Klimawandels gezogen werden. Je stärker die erwartete Klimaveränderung ausfällt, umso größer wird der Anpassungs- und Handlungsdruck für bestehende und neu zu errichtende Gebäude. Zudem ist festzuhalten, dass auch die zu erwartenden Klimaänderungen regional unterschiedlich stark ausgeprägt sind.

Klimaeinwirkung	Klimaänderungssignal	Betroffenheit
Sommerhitze		Ganz Deutschland, insbesondere der Südwesten, Flusstäler von Rhein, Neckar, Main, Mosel
Starkregen		Mittelgebirge und Alpenvorland Abhängig von der Geländeform, siehe Starkregengefahrenkarten der Kommunen
Hochwasser		Nur in der Nähe von Gewässern, siehe Hochwassergefahrenkarten der Bundesländer
Hagel		Süddeutschland am stärksten betroffen
Wind		Höchste Windgeschwindigkeiten an den Küsten und in Norddeutschland

Abbildung 2: Klimaänderungssignale und regionale Betroffenheit für die Klimaeinwirkungen

Zwischen den Klimaeinwirkungen und möglichen Anpassungsmaßnahmen bestehen zahlreiche Wechselwirkungen. Ein einfaches Beispiel soll dies veranschaulichen. Eine außenliegende Lamellenjalousie reduziert die Verletzbarkeit des Gebäudes gegenüber der Einwirkung Sommerhitze, führt aber gleichzeitig zu einer erhöhten Verletzbarkeit durch Wind und Hagel. Dem kann durch windstabile Außenjalousien oder eine Automatisierung über Wind- und Niederschlagssensoren entgegengewirkt werden. Neben diesen negativen Wechselwirkungen existieren auch positive. Beispielsweise kann die Begrünung eines Flachdachs zu einer Reduktion der Exposition gegenüber der Einwirkung Hagel führen. Durch die Drainage- und Vegetationsschicht wird die Dachabdichtung vor dem Aufprall von Hagelkörnern geschützt. Gleichzeitig ergeben sich positive Wechselwirkungen hinsichtlich der Einwirkungen Starkregen und Sommerhitze. Durch das Substrat wird ein Teil des Niederschlagswassers zwischengespeichert und der Spitzenabfluss gegenüber einer Ausführung mit freiliegender Dachbahn oder Bekiesung wesentlich reduziert. Durch die zusätzliche Dämmwirkung, Speichermasse und Verdunstung wird auch der Wärmeeintrag über das Bauteil Dach in die darunterliegenden Räume verringert.

Welche komplizierten Abwägungen das klimaangepasste Bauen leisten muss, wird am Beispiel der Holzbauweise aufgezeigt. Wesentlicher Treiber des Klimawandels sind die vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen und hierbei insbesondere CO<sub>2</sub>. Pflanzen entziehen durch die Photosynthese der Atmosphäre CO<sub>2</sub> und binden den Kohlenstoff in der aufgebauten Biomasse. Stirbt die Pflanze ab und wird durch Mikroorganismen zersetzt, wird nach einiger Zeit dieselbe CO<sub>2</sub>-Menge frei, die zuvor in der Biomasse gespeichert war. Wird stattdessen beispielsweise das Holz von Bäumen zum Bauen genutzt, dann bleibt das CO<sub>2</sub> weiter im Holz gebunden und das Gebäude wirkt als CO<sub>2</sub>-Senke. Demgegenüber steht die Massivbauweise mit Stahlbeton oder Mauerwerk. In beiden Fällen werden bei der Materialproduktion infolge chemischer Prozesse zur Herstellung von Stahl, Zement oder Ziegeln große Mengen CO<sub>2</sub> freigesetzt. Diese prozessbedingten Emissionen können nicht vermieden werden, da die chemischen Reaktionen zwingend ablaufen müssen, um das gewünschte Endprodukt zu erreichen. Für die Erzeugung der hohen Temperaturen im Hochofen, Drehrohrofen oder zum Brennen der Ziegel werden in der Regel fossile Brennstoffe verwendet, so dass auch die Energiebereitstellung mit CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden ist. Aus Sicht des Klimaschutzes wäre unter der Voraussetzung einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung das Bauen mit Holz eindeutig zu bevorzugen. Aus Sicht der Klimaanpassung sind allerdings die Massivbauweisen im Vorteil. Infolge der großen Masse der Bauteile heizen sich die Innenräume im Sommer wesentlich langsamer auf. Außerdem ist Holz gegenüber Wasser wesentlich empfindlicher als beispielsweise Stahlbeton. Das bedeutet, die Massivbauweisen sind bezüglich der Klimaanpassung gegenüber Sommerhitze, Starkregen und Hochwasser zu bevorzugen. Ist am gewählten Gebäudestandort keine Hochwassergefahr durch Gewässer oder den Oberflächenabfluss und das Aufstauen von Starkregen gegeben, dann kann eine Holzbauweise gewählt und der Nachteil bezüglich der Klimaeinwirkung Sommerhitze durch eine intelligente Planung ausgeglichen werden.

### 3. Sommerhitze

#### 3.1. Grundlagen

Besonders betroffene Bauteile der Einwirkung Sommerhitze sind:

- Fenster, Verglasungen und Sonnenschutzsysteme
- Thermische Speicherfähigkeit der Bauteile, die den Innenraum begrenzen
- Möglichkeiten zur Nachtlüftung
- Einrichtungen zur passiven Kühlung
- Dach- und Fassadenfarben
- Beeinflussung Mikroklima

#### 3.2. Fenster, Verglasungen und Sonnenschutzsysteme

Fenster erfüllen zahlreiche Funktionen, die für die Behaglichkeit und Gesundheit der Nutzer von wesentlicher Bedeutung sind. Erst die Transparenz der Verglasung erlaubt eine ausreichende Tageslichtversorgung der Innenräume sowie den Ausblick und Bezug zum Außenraum. In Wohngebäuden dient auch heute die Fensteröffnung noch häufig zur planmäßigen Belüftung der Innenräume. Bei maschineller Belüftung ist eine ergänzende Fensterlüftung häufig möglich, um dem Nutzer eine einfache Einflussmöglichkeit zur Komfortsteigerung oder zur schnellen Abfuhr von Gerüchen zu ermöglichen.

Die wesentlichen Wärmeeinträge in die Innenräume von Wohngebäuden ergeben sich in aller Regel infolge der Sonneneinstrahlung durch Verglasungen. Dies ist auf den Glashauseffekt zurückzuführen. Das Spektrum der Solarstrahlung, nachdem es die Erdatmosphäre passiert hat reicht von UV-B-Strahlung über UV-A-Strahlung, sichtbarem Licht, Infrarotstrahlung bis hin zu Radiowellen. Das Strahlungsmaximum der Sonne liegt im Bereich des sichtbaren Lichts blauer und grüner Farbe. Unbeschichtetes Fensterglas lässt die gesamte kurzwellige Solarstrahlung, nämlich das UV-A, das sichtbare Licht und die kurzwellige Infrarotstrahlung (nahes Infrarot) nahezu ungehindert passieren. Trifft die kurzwellige Solarstrahlung im Innenraum auf einen gering reflektierenden, strahlungsundurchlässigen Gegenstand, dann wird sie absorbiert und in Wärme umgewandelt. Der Effekt der Solarstrahlungsabsorption und Wärmeentwicklung ist jedermann bekannt, wenn man sich mit dunkler Kleidung in der Sonne aufhält. Durch die Sonne erwärmte Gegenstände in Innenräumen oder Gegenstände mit gewöhnlichen Innenraumtemperaturen emittieren langwellige Wärmestrahlung, die dem mittleren Infrarot zugeordnet wird. Unbeschichtetes aber auch beschichtetes Glas ist für Wellenlängen im mittleren Infrarot undurchlässig. Dadurch ist die Wärmestrahlung im Innenraum hinter der Verglasung „gefangen“ und der Raum erwärmt sich. Während dieser Wärmeeintrag im Winter erwünscht sein kann, führt er in der Übergangszeit und im Sommer unter Umständen zu unbehaglichen Innenraumtemperaturen. Dadurch ergeben sich konkurrierende Anforderungen an die Fenstergröße. Im Hinblick auf die Tageslichtversorgung und den Ausblick sind große Verglasungsflächen gewünscht, während hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes kleine Verglasungsflächen Vorteile bieten.

Trifft die Sonnenstrahlung auf eine Glasscheibe, dann wird ein Teil der Strahlung durchgelassen (transmittiert), ein Teil reflektiert und ein Teil absorbiert. Durch den absorbierten Teil der Strahlung erwärmt sich die Glasscheibe und die Wärmeenergie wird an den Außen- und Innenraum abgegeben. Die an den Innenraum abgegebene Wärmeenergie wird als sekundäre Wärmeabgabe bezeichnet. Wesentliche Parameter zur Beurteilung der Verglasungsqualität sind der Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung ( $U_g$ -Wert), der Gesamtenergiedurchlassgrad ( $g$ -Wert) und die Lichttransmission ( $T_v$ ). Der Wärmedurchgangskoeffizient ( $W/(m^2K)$ ) der Verglasung gibt an, wie viel Wärmeenergie in Watt (W) durch einen Quadratmeter ( $m^2$ ) ungestörte Verglasungsfläche bei einer Temperaturdifferenz von einem Kelvin (K) durchtritt.

Der Gesamtenergiedurchlassgrad setzt sich aus dem Strahlungstransmissionsgrad und der sekundären Wärmeabgabe an den Innenraum zusammen. Folglich gibt er an, wieviel der auf die Verglasung auftreffenden Solarstrahlungsenergie in Form von Strahlung und Wärme an den Innenraum durchgelassen wird. Die Tageslichttransmission gibt an welcher Anteil der Solarstrahlung im Bereich des sichtbaren Lichts durchgelassen wird. Zur Beurteilung der Qualität im Winterfall ist der  $U_g$ -Wert von entscheidender Bedeutung, für den Sommerfall der  $g$ -Wert und für die Tageslichtversorgung des Innenraums der  $T_v$ -Wert.

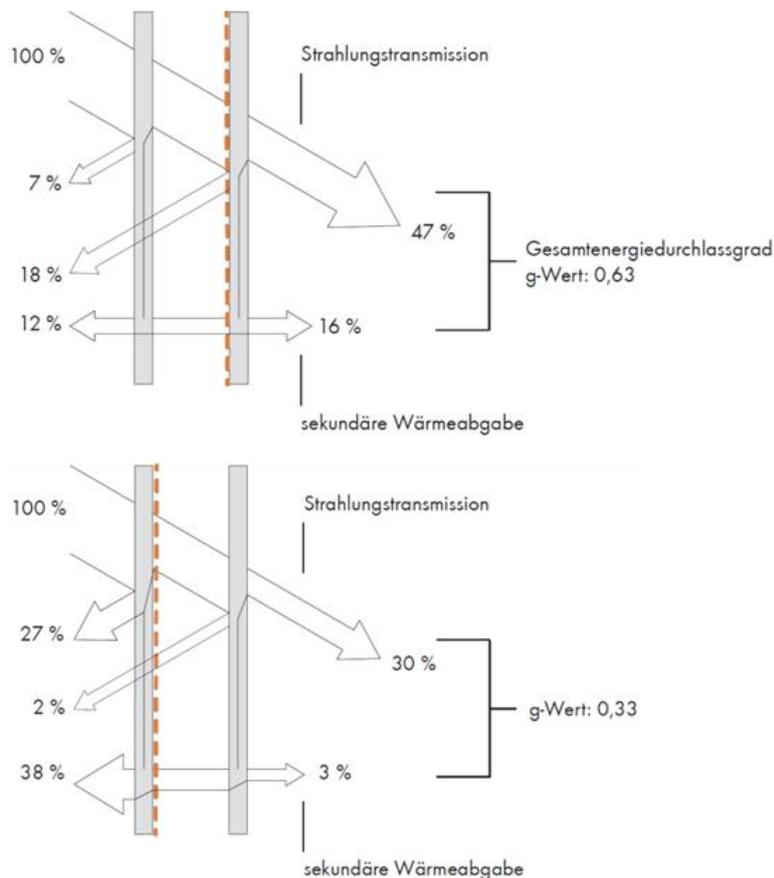


Abbildung 3: Überschlägige Strahlungsbilanz einer Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung (oben) und einer Sonnenschutzverglasung (unten)

Diesem Dilemma kann durch hochselektive Sonnenschutzbeschichtungen entgegengewirkt werden. Die Beschichtung wird auf der Innenseite der äußeren Verglasung angeordnet und reduziert die Strahlungstransmission im Bereich der kurzwelligigen Infrarotstrahlung und der UV-B- und UV-A-Strahlung erheblich, während der Strahlungsdurchtritt des sichtbaren Lichts nur geringfügig vermindert wird. Folglich kann der  $g$ -Wert durch eine solche Beschichtung deutlich reduziert werden, während sich die Lichttransmission  $T_v$  nur geringfügig verringert (Abbildung 3).

Nicht nur die Größe von Fensterflächen und die Lichttransmission der Verglasung sind für die Tageslichtversorgung im Innenraum von Bedeutung, sondern auch deren Höhenlage über der Oberkante des Fußbodens. Verglasungsflächen, die sich weniger als 0,85 m über der Oberfläche des Fußbodens befinden sind in der Regel nur bedingt für die Tageslichtversorgung von Nutzen, da sich Arbeitsflächen gewöhnlicher Weise in einer Höhe von 0,80 m bis 0,85 m über dem Fußboden befinden. Einfallendes Licht das unterhalb dieser Ebene in den Raum eintritt muss folglich mindestens zwei Mal reflektiert werden, um beispielsweise eine Tischoberfläche zu erhellen.

Im Optimalfall wird das Licht zunächst vom Boden und anschließend von der Decke reflektiert, um schließlich die Tischoberfläche zu erreichen. Setzt man übliche Reflexionsgrade an (Boden: 0,2, Decke: 0,7) so kommen nur circa 14 % des Lichts auf der Arbeitsebene an, während der solare Wärmeeintrag unabhängig von der Höhenlage der Verglasung in der Außenwand konstant bleibt (Abbildung 4).

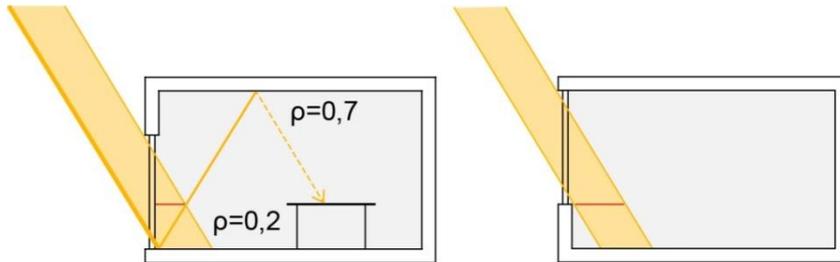
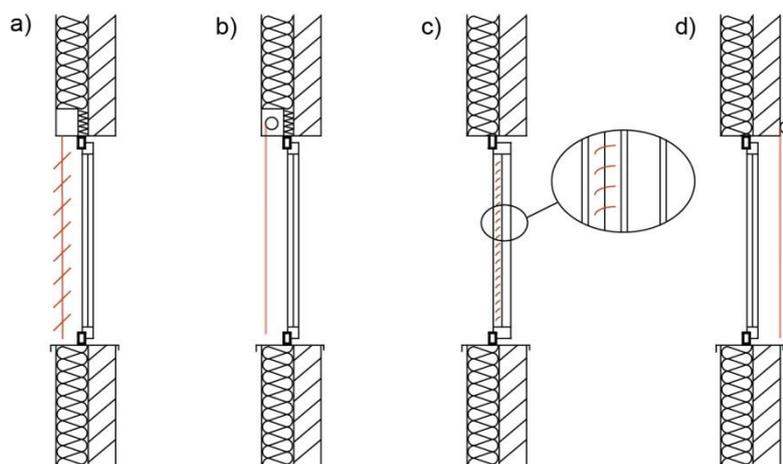


Abbildung 4: Höhenlage der Verglasung und Auswirkungen auf die Tageslichtversorgung

Um eine gute Tageslichtversorgung bis in tiefe Raumbereiche zu erreichen, sollten Verglasungsflächen möglichst weit bis zur Unterkante der Decke geführt werden. Bei üblichen Raumtiefen im Wohnungsbau von 4 m kann in der Regel auch ohne große Raum- und Sturzhöhen eine ausreichende Tageslichtversorgung über die Raumtiefe erreicht werden. Prinzipiell ist es für eine gute Tageslichtversorgung ohne übermäßige solare Wärmeeinträge vorteilhafter auf einen Sturz zu verzichten und stattdessen eine Brüstung auszuführen. In Abhängigkeit des architektonischen Entwurfs und der Fenstergrößen sollten thermisch-dynamische Gebäudesimulationen mit Tageslichtsimulationen kombiniert werden, um ein Optimum aus Behaglichkeit im Sommer und Tageslichtversorgung im Innenraum zu erreichen. Des Weiteren spielt die Auswahl von Sonnenschutzsystemen eine wesentliche Rolle zur Sicherstellung eines guten sommerlichen Wärmeschutzes. Außenliegende Sonnenschutzsysteme halten die Sonnenstrahlung bereits vor dem Auftreffen auf das Fenster auf und sind daher in der Regel wirkungsvoller im Schutz vor Überhitzung als innenliegende oder zwischen den Scheiben liegende Systeme (Abbildung 5).



- a) Außenliegende Lamellenjalousie
- b) Markise parallel zur Verglasung
- c) Sonnenschutz im Scheibenzwischenraum
- d) Innenliegender Rollo bzw. Screen

Abbildung 5: Sonnenschutzsysteme

Die Effektivität eines Sonnenschutzsystems wird durch den Abminderungsfaktor für Sonnenschutzvorrichtungen  $F_c$  ausgedrückt. Der Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung einschließlich Sonnenschutz wird als  $g_{tot}$  bezeichnet und berechnet sich zu:

$$g_{tot} = g \cdot F_c$$

g: Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung

$F_c$ : Abminderungsfaktor für Sonnenschutzvorrichtungen

Je kleiner der  $F_c$ -Wert, umso effektiver ist die Sonnenschutzvorrichtung. Allerdings ist zusätzlich zu beachten, dass der Abminderungsfaktor  $F_c$  nicht nur von den Eigenschaften der Sonnenschutzvorrichtung, sondern auch vom Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung abhängt. Die identische Sonnenschutzvorrichtung erreicht bei einer Verglasung ohne Sonnenschutzbeschichtung in der Regel einen niedrigeren  $F_c$ -Wert, als bei einer Verglasung mit Sonnenschutzbeschichtung. Das bedeutet, wenn die Verglasung bereits weniger Energie in den Innenraum eindringen lässt, dann ist das Verbesserungspotenzial durch eine zusätzliche Sonnenschutzvorrichtung geringer. Deshalb kann die Effektivität von Sonnenschutzvorrichtungen auf Grundlage von  $F_c$ -Werten nur miteinander verglichen werden, wenn den Angaben die gleichen Verglasungsqualitäten (g-Werte) zugrunde liegen (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Abminderungsfaktoren typischer Sonnenschutzvorrichtungen

Sonnenschutzsystem	$F_c$ -Wert
Außenjalousie, Lamellenneigungswinkel $45^\circ$ (bei g-Wert der Verglasung 0,63)	0,11 bis 0,19
Markise parallel zur Verglasung (bei g-Wert der Verglasung 0,63)	0,14 bis 0,27
Jalousie im Scheibenzwischenraum (bei g-Wert der Verglasung 0,63)	0,30 bis 0,40
Innenliegende Rollos, metallisierte Screens (bei g-Wert der Verglasung 0,63)	$\geq 0,38$

Insbesondere im Sommer, teilweise auch in der Übergangszeit, soll der solare Energieeintrag in den Innenraum reduziert werden. In diesem Zeitraum erreicht die Sonne im Süden einen hohen Stand über dem Horizont. Deshalb sind nach Süden orientierte Fenster am besten geeignet, um eine effektive Verschattung bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Durchsicht zu erreichen. Bei südorientierten Fenstern können Lamellenjalousien besonders effektiv eingesetzt werden. Durch den hohen Sonnenstand kann schon bei Neigungswinkeln der Lamellen von beispielsweise  $45^\circ$  oder  $30^\circ$  zur Horizontalen das Auftreffen der Direktstrahlung auf die Verglasung vollständig unterbunden werden. Durch die Lamellenneigung ergeben sich zwischen den einzelnen Lamellen Freiräume, durch die eine Durchsicht nach außen möglich bleibt. Steht die Sonne im Osten oder Westen am Morgen bzw. Abend tiefer, dann müssen für eine effektive Verschattung die Lamellen vollständig geschlossen werden (Abbildung 6).

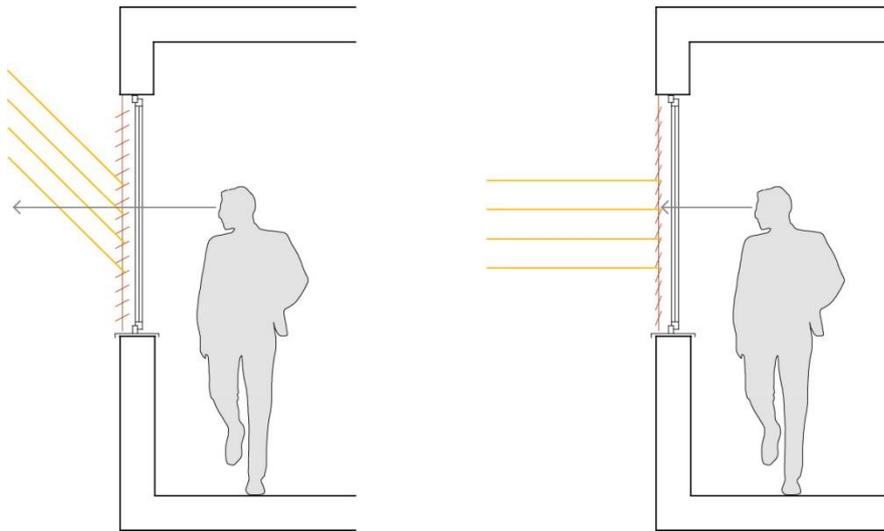


Abbildung 6: Verschattung unterschiedlich orientierter Fensterflächen

Dunkle Lamellenjalousien erreichen in der Regel niedrigere  $F_c$ -Werte als helle, da die Sonnenstrahlung nicht von der Lamelle durch Einfach- oder Mehrfachreflektionen in den Innenraum gelangen kann. Statt dessen wird die kurzwellige Solarstrahlung absorbiert und in Wärme umgewandelt, was sich durch die niedrigen  $U_g$ -Werte heute üblicher Dreischeiben-Wärmeschutz-Verglasungen nur geringfügig auf den dahinterliegenden Innenraum auswirkt. Dies stellt sich anders dar, wenn bei geschlossener Lamellenjalousie über die Fenster gelüftet werden soll. Dann strömt die Außenluft an den warmen Lamellen vorbei nimmt einen Teil der Wärmeenergie auf und trägt diese in den Innenraum. Diesbezüglich stellen zweifarbige Lamellenjalousien das Optimum dar. Die Oberseiten der Lamellen werden in hellen Farbtönen mit hohem Reflexionsgrad ausgeführt und die Unterseiten absorptiv, also dunkel. Dadurch wird ein Großteil der Sonnenstrahlung von den Oberseiten der Lamellen zurück Richtung Himmel oder in die Umgebung reflektiert, während Strahlung die an die Unterseite der darüber liegenden Lamellen reflektiert wird von dieser absorbiert und damit nicht weiter in den Innenraum reflektiert wird. Sind die Lamellenjalousien gut hinterlüftet, kann die absorbierte Wärmeenergie einfach an die Umgebung abgeführt werden und die Oberflächentemperaturen werden nicht so hoch. Dafür wird das System allerdings windanfälliger.

### 3.3. Thermische Speichermassen und passive Kühlung

Die Innenraumtemperatur im Sommerfall wird neben der Größe und Qualität der Verglasungsflächen und den Sonnenschutzvorrichtungen auch durch die thermische Speicherfähigkeit der an den Innenraum angrenzenden Bauteile bestimmt. Je höher die Rohdichte und spezifische Wärmekapazität der an den Innenraum angrenzenden Bauteilschichten, umso mehr Wärmeenergie wird benötigt um die Bauteilmasse um 1 Kelvin zu erwärmen. Die thermische Speicherfähigkeit von Bauteilen führt zu einer trägeren Reaktion der Innenraumlufttemperatur auf Wärmeeinträge. Daraus folgt, dass Holzbauweisen und Leichtbauten hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes gegenüber Massivbauweisen benachteiligt sind. Der fehlenden thermischen Speichermasse im Holz- oder Leichtbau sollte beispielsweise durch den Einsatz von Latentwärmespeichermaterialien entgegengewirkt werden (vgl. Infobox 4).

Auch die Nutzung natürlicher Wärmesenken zur Kühlung der Innenräume kann einer geringen Wärmespeicherfähigkeit entgegenwirken oder zu einem erhöhten Komfort beitragen. Die einfachste Möglichkeit zur passiven Kühlung ist die natürliche Fensterlüftung in der Nacht. Allerdings werden Fenster aus Sicherheitsbedenken außerhalb der Anwesenheitszeit der Bewohner oder nachts nicht geöffnet. Abhilfe können hier automatisch gesteuerte, einbruchhemmende Elemente schaffen.

Besonders hohe Luftwechselzahlen und damit eine effektive Wärmeabfuhr kann erreicht werden, wenn sich Fenster oder andere öffnende Elemente an gegenüberliegenden Außenwänden befinden. Ist zumindest eine geringe Windanströmung vorhanden, dann bildet sich zwischen dem Luv- und Leebereich eine Druckdifferenz aus, die zu einer erhöhten Luftdurchströmung der Innenräume mit kühlerer Nachtluft und damit einer effektiven Wärmeabfuhr führt.

#### Infobox 4: Latentwärmespeichermaterialien

**Latentwärmespeichermaterialien** sind auch als Phase Change Materials (PCM) bekannt. In der Regel handelt es sich um Paraffine oder Salzhydrate. Die Wärmespeicherung erfolgt ohne fühlbare Temperaturerhöhung des Materials, sondern durch einen Wechsel des Aggregatzustands von fest nach flüssig. Zur Überwindung der Bindungsenergie zwischen den Molekülen beim Wechsel des Aggregatzustands muss Wärmeenergie von außen zugeführt werden. Je nach Einsatzbereich lässt sich der Schmelzpunkt der Materialien durch Veränderung der chemischen Zusammensetzung beeinflussen. Das Prinzip der Latentwärmespeicherung kann am Beispiel von Wasser verdeutlicht werden. Um einen Eiswürfel mit einer Temperatur von 0 °C zu schmelzen, wird dieselbe Energiemenge benötigt, wie anschließend für die Erwärmung der entstandenen Menge Wasser von 0 °C auf 80 °C. Die spezifische Schmelzwärme der Paraffine und Salzhydrate ist nochmals wesentlich größer als die von Wasser.

Zur Heizwärmeerzeugung in Neubauten werden häufig Wärmepumpen verwendet. Dabei wird der Umgebung Umweltwärme – auf einem für das Heizen zu niedrigen Temperaturniveau – entzogen. Als Umweltwärmequellen können die Umgebungsluft, das Erdreich oder das Grundwasser verwendet werden. Diese Wärmeenergie auf niedrigem Temperaturniveau wird verwendet um ein Kältemittel zu verdampfen und das Kältemittelgas über einen elektrisch betriebenen Kompressor stark zu verdichten. Wird Gas verdichtet, dann steigt dessen Temperatur an. Damit können für Heizzwecke ausreichende Temperaturen erzeugt werden. Die Effizienz der Wärmepumpe ist umso besser, je geringer die Temperaturdifferenz zwischen der Umgebungswärmequelle und der benötigten Heizwassertemperatur ist. Aus diesem Grund sind Luftwärmepumpen weniger effizient als Grundwasserwärmepumpen oder Erdreichwärmepumpen, da die Umweltwärmequelle zum Zeitpunkt des höchsten Heizwärmebedarfs im Winter, die geringste Temperatur aufweist.

Soll das Erdreich als Wärmequelle verwendet werden, dann sind Erdreichkollektoren oder Erdsonden erforderlich. Für die Erschließung des Grundwassers sind mindestens zwei Brunnen – ein Förder- und ein Schluckbrunnen – zu erstellen. Im Sommer liegen die Temperatur des Erdreichs und des Grundwassers im Normalfall deutlich unter den angestrebten Innenraumtemperaturen (vgl. Abbildung 7), so dass in diesem Fall das Erdreich oder das Grundwasser als natürliche Wärmesenke und somit zur Abfuhr von Wärme aus den Innenräumen genutzt werden kann. Insbesondere im Bereich von Innenstädten ist zu beachten, dass die Grundwassertemperatur deutlich über dem ungestörten Zustand liegen kann. Ursachen hierfür sind anthropogene Wärmequellen, wie beispielsweise Tunnelsysteme von U- und S-Bahnen. Ist bereits geplant, das Gebäude über eine Erdreich- oder Grundwasserwärmepumpe zu beheizen, dann kann mit sehr geringem zusätzlichen finanziellen und materiellen Aufwand eine passive Kühlung realisiert werden. Es sind lediglich ein zusätzlicher Wärmetauscher, Drei-Wege-Ventile, zwei Umwälzpumpen und wenige Meter Rohrleitung erforderlich. Im Hinblick auf länger anhaltende Hitzeperioden und steigende Maximaltemperaturen im Sommer ist der Aufwand durchaus empfehlenswert.

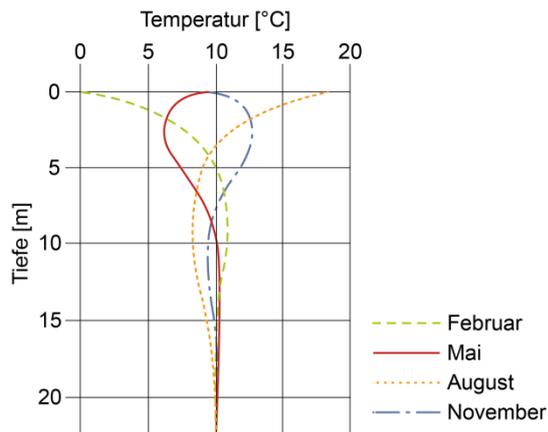


Abbildung 7: Verlauf der Erdreichtemperatur über die Tiefe zu unterschiedlichen Jahreszeiten.

Eine andere Variante zur passiven Kühlung ist die indirekte adiabate Kühlung bzw. Verdunstungskühlung der Zuluft. Viele Neubauten werden heutzutage mit Lüftungsanlagen ausgestattet. Diese verfügen in der Regel über Wärmetauscher, um im Winter die Wärme der Abluft auf die Zuluft zu übertragen. Im Sommerfall kann das Prinzip umgekehrt angewendet werden: Die mechanische Abluft wird vor dem Wärmetauscher mit Wasser besprüht. Das Wasser verdunstet und entzieht die für den Wechsel des Aggregatzustands (flüssig zu gasförmig) notwendige Wärmeenergie der Luft, die sich folglich abkühlt. Für die adiabate Kühlung bietet sich die Verwendung von Regenwasser an, das in einer Regenwasserzisterne gespeichert werden kann (vgl. Kapitel 4). In diesem Fall müssen die Zuluft- und Abluftströme vollständig voneinander getrennt sein, so dass keine Rotationswärmetauscher verwendet werden können.

### 3.4. Dachaufbau und Oberflächengestaltung

Trotz der heutzutage guten Dämmeigenschaften der Außenbauteile kann sich die Farbwahl von Außenoberflächen merklich auf die Innenraumtemperaturen im Sommer auswirken. Dies wird am Beispiel eines Flachdachs mit freiliegender Dachdichtungsbahn aufgezeigt. Zunächst werden die Standardkonstruktionen der Musterliegenschaft mit Wänden aus Kalksandsteinmauerwerk mit Wärmedämmverbundsystem und ein Flachdach aus Stahlbeton angesetzt (vergleiche hierzu auch den zugehörigen Endbericht des Forschungsprojekts KLIBAU (Fahrion et al. 2019: 74 ff.)). Der Warmdachaufbau sieht über der Stahlbetondecke eine Dampfsperre, eine Dämmung aus XPS und eine freiliegende Dachabdichtungsbahn vor. Damit wird ein Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  erreicht. Lediglich die Materialeigenschaften der Dachabdichtungsbahn wurden variiert. Einerseits wurde von einer dunklen Bitumendachbahn mit einem Reflexionsgrad von  $0,06$ , andererseits von einer weißen Kunststoffdachbahn ausgegangen. Für die weiße Kunststoffdachbahn wurden für die Materialeigenschaften Herstellerangaben verwendet. Die weiße Dachbahn erreicht fabrikneu einen Reflexionsgrad von  $0,8$ . Im gealterten Zustand reduziert sich dieser auf  $0,6$ . Wird anstelle einer dunklen Bitumendachbahn eine gealterte weiße Kunststoffdachbahn verwendet und bleiben sämtliche sonstigen Randbedingungen unverändert, dann kann die Hitzebelastung im Innenraum unterhalb des Flachdachs um circa  $10 \%$  reduziert werden.

Die Dachabdichtungsbahn kann über die Aufbringung einer Kiesschicht der direkten Hitzeeinwirkung entzogen werden. In Abhängigkeit der Farbigkeit und der Korngröße des verwendeten Kies ergeben sich auch bei diesem Material sehr unterschiedliche Reflexionsgrade. Pisello et al. (2014) ermitteln für verschiedene Kiessorten in Abhängigkeit der Farbigkeit und der Korngröße den Reflexionsgrad. Dabei zeigen sich deutliche Unterschiede. Die im Labor gemessenen Reflexionsgrade variieren zwischen  $0,27$  und  $0,62$ . Je heller die Farbe und je kleiner die Korngröße, desto höher der Reflexionsgrad.

Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen wurde über der Abdichtungsbahn eine 10 cm dicke Kiesschicht mit einem Reflexionsgrad von 0,5 – wie er von hellem Kies üblicher Korngröße erreicht wird – angesetzt. Infolge des relativ hohen Reflexionsgrades und der zusätzlichen thermischen Speichermasse der 10 cm dicken Kiesauflage kann die Lufttemperatur in den Räumen unter dem Flachdach verringert werden. Dabei ist der Effekt auf die Hitzebelastung in den Innenräumen durch die Kiesschicht ungefähr doppelt so groß, wie die Wirkung, die durch den Austausch der freiliegenden dunklen Abdichtungsbahn gegen eine helle erzielt werden kann. Durch die Sonneneinstrahlung muss zunächst die gesamte Masse der Kiesauflage erwärmt werden, bevor sich ein wesentlicher Wärmestrom durch das Dach in den Innenraum einstellt. Die Farbwahl der Dachabdichtungsbahn ist bei einer zusätzlichen Bekiesung nicht mehr von Bedeutung, da sie nicht der Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist.

Bei Gebäudekonstruktionen mit geringer thermischer Speichermasse der Bauteile, also insbesondere im Holzbau, wirkt sich die Wahl der Oberflächenfarbe einer freiliegenden Dachabdichtungsbahn noch wesentlich stärker auf die Hitzebelastung in den darunterliegenden Innenräumen aus. In diesem Fall kann die Hitzebelastung allein durch die Farbwahl um über 20 % reduziert werden. Infolge der geringen thermischen Speichermasse einer Flachdachkonstruktion aus Holz ist die Anordnung einer Kiesschicht über der Abdichtungsbahn ebenfalls wirksamer als bei einem Stahlbetondach.

### 3.5. Dach- und Fassadenbegrünung

Die Begrünung von Außenanlagen und Gebäuden wirkt sich positiv auf die thermische Aufenthaltsqualität im Außenraum und in den Innenräumen aus. Die Begrünung großer zusammenhängender Flächen oder die gemeinsame Aktivität mehrerer Grundstückseigentümer ist effektiver als Einzelmaßnahmen auf einem Grundstück. Die folgenden Aussagen basieren auf den im Forschungsprojekt „KLIBAU – Weiterentwicklung und Konkretisierung des Klimaangepassten Bauens“ durchgeführten Mikroklimasimulationen für eine Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung.

Als Ausgangsszenario wird eine typische Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung mit 16 Gebäuden, zugehörigen Außenanlagen und Straßen definiert. Im Ausgangszustand bestehen die Außenwände wiederum aus Kalksandsteinmauerwerk mit Wärmedämmverbundsystem (WDVS), die Flachdächer aus Stahlbeton mit Dämmung, Abdichtung und 10 cm Kiesauflage, die Außenanlagen sind nur mit Rasen als einziger Vegetation ausgeführt. Von dieser Basis aus wird die Begrünung schrittweise erhöht und untersucht, wie sich dies auf die thermische Aufenthaltsqualität im Außenraum und in den Innenräumen auswirkt. Beginnend mit konventionellen Begrünungsformen wie dem Pflanzen von Bäumen und Büschen in den Gärten über die Ausführung von Gründächern bis hin zur Fassadenbegrünung wird die Bepflanzung schrittweise gesteigert. Dadurch ergeben sich die folgenden drei Begrünungsszenarien:

- Bäume und Büsche (Begrünungsszenario 1)
- Bäume und Büsche + extensive Dachbegrünung (Begrünungsszenario 2)
- Bäume und Büsche + extensive Dachbegrünung + Moosfassade (Begrünungsszenario 3)

In den Begrünungsszenarien 2 und 3 wird die 10 cm dicke Kiesschicht durch eine 15 cm dicke Substratschicht mit einer extensiven Begrünung aus Stauden, Gräsern und Sukkulenten ersetzt. Im Begrünungsszenario 3 werden alle Außenwandflächen, ausschließlich der Fenster, mit einer Moosfassade auf Trägerplatten versehen. Die einzelnen Begrünungsszenarien sind in der Abbildung 8 dargestellt.

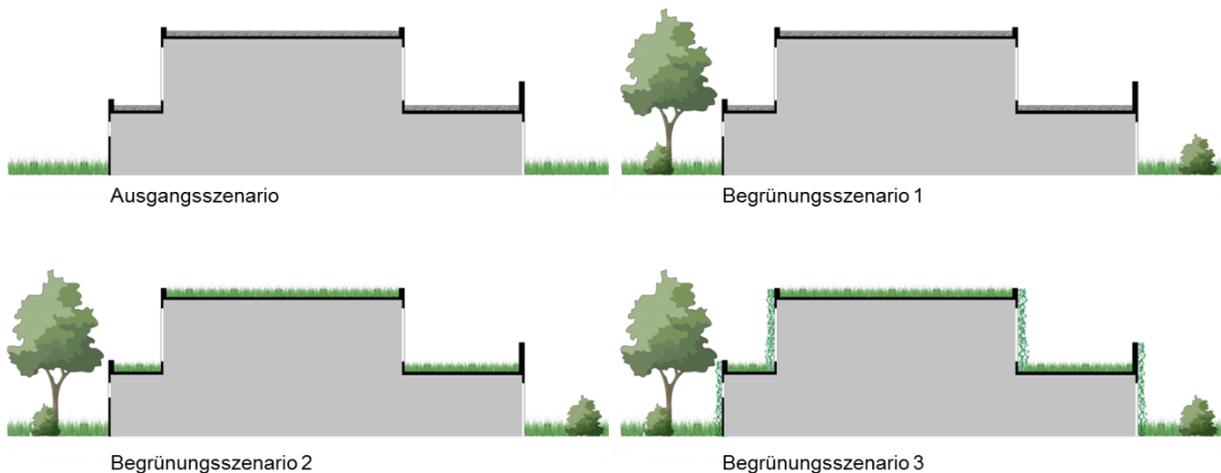


Abbildung 8: Ausgangsszenario und Begrünungsszenarien für die Mikroklimasimulationen

Zur Beurteilung des Außenraumkomforts wird die physiologisch äquivalente Temperatur (PET) verwendet. Sie gibt die Lufttemperatur in einem Innenraum an, die derselben Temperaturempfindung entspricht wie unter den komplexen Außenraumbedingungen, bei denen beispielsweise Wind und direkte Sonneneinstrahlung eine Rolle spielen. Die folgenden Aussagen für die Lufttemperatur und die physiologisch äquivalente Temperatur sind für eine Höhe von 1,5 m über Geländeoberkante gültig.

Den größten Einfluss auf den Außenraumkomfort haben große Bäume. Infolge der Verschattung und der Verdunstung kann unter den Bäumen die Lufttemperatur im Vergleich zum Ausgangsszenario mit nur Rasen um über 1,8 °C reduziert werden. Der Verschattungseffekt wirkt sich noch wesentlich stärker auf die physiologisch äquivalente Temperatur aus, da der menschliche Körper der direkten Sonneneinstrahlung entzogen ist. Gegenüber dem Ausgangsszenario kann somit unter den Bäumen eine Reduktion der physiologisch äquivalenten Temperatur von bis zu 11 °C erreicht werden. Die extensive Dachbegrünung hat auf den Außenraumkomfort in 1,5 m über Geländeoberkante nur einen geringen Einfluss, obwohl die Gebäude nur zweigeschossig sind.

Dementsprechend ist bei höheren Gebäuden der Einfluss auf Straßenniveau vernachlässigbar. Die zusätzliche Begrünung aller Fassaden mit Moos macht sich wiederum deutlich im Aufenthaltsbereich um die Gebäude herum bemerkbar. Zum einen können gegenüber dem Szenario mit Bäumen und Büschen die Bereiche starker Lufttemperaturreduktion deutlich vergrößert werden, zum anderen kann die maximale Lufttemperaturreduktion von 1,8 °C auf 2,4 °C gesteigert werden. Auch die physiologisch äquivalente Temperatur wird bereichsweise nochmals um 1 °C bis 2 °C reduziert.

Die Begrünung von Außenanlagen und Bauteilen wirkt sich auch auf die Temperaturen und das Klima in den Innenräumen aus. Die Ursachen hierfür sind:

- Reduktion der Außenlufttemperatur
- Verschattung von Fensterflächen
- Verschattung von Bauteilflächen
- Dämmwirkung von Substrat und Pflanzen
- Veränderung lokaler Windgeschwindigkeiten
- Veränderung der Luftfeuchtigkeit

Durch die Bepflanzung der Außenanlagen mit Bäumen und Büschen kann die Hitzebelastung in den Innenräumen gegenüber der reinen Ausführung mit Rasen im Bereich zwischen 4 % und 9 % reduziert werden. Bei Räumen, die sich direkt unterhalb des Flachdachs befinden, reduziert sich durch die Pflanzung von Bäumen und Büschen mit zusätzlicher extensiver Begrünung des Flachdachs die Hitzebelastung um mehr als 15 %. Werden sämtliche Begrünungsmaßnahmen, nämlich die Pflanzung von Bäumen und Büschen, die Flachdachbegrünung und die Fassadenbegrünung mit Moosen kombiniert, dann kann die Hitzebelastung in den Innenräumen sogar um circa 20 % gegenüber dem Zustand mit nur Rasen und bekies-tem Flachdach gesenkt werden. Diese Verbesserung des thermischen Innenraumklimas kann trotz der sehr guten Dämmeigenschaften der Außenwände und Dachflächen (U-Werte 0,16 W/(m<sup>2</sup>K) bzw. 0,15 W/(m<sup>2</sup>K)) erzielt werden. Wie anderweitige Untersuchungen zeigen, wirkt sich ein gedämmtes Gründach im gemäßigten Klima kaum auf den Heizwärmebedarf eines Gebäudes aus (Jaf-fal/Ouldboukhitine/Belarbi 2012).

## 4. Starkregen

### 4.1. Grundlagen

Starkregen ist ein lokal begrenztes Niederschlagsereignis, bei dem innerhalb kurzer Zeit große Niederschlagsmengen auftreten. Starkregenereignisse sind in ihrem Auftreten zudem zeitlich sehr begrenzt und schwer vorherzusagen. Ebenso können durch die starke räumliche Eingrenzung nicht alle Ereignisse durch Wetterstationen registriert werden. Starkregen kann zu hohen Schäden führen, da innerhalb kürzester Zeit große Mengen an Regenwasser auftreten, die zur Überflutung von Siedlungsgebieten und Häusern führen können. Der oberflächige Abfluss des Niederschlags kann zur Entstehung von reißenden „Bächen“ an Stellen führen, an denen normalerweise kein Fließgewässer vorhanden ist. Als kritisch erweisen sich häufig lokale und kommunale Entwässerungssysteme, die für das Starkregenereignis unterdimensioniert sind und ihre Gebrauchstauglichkeit einbüßen. Die Gefährdungslage in Deutschland ist nicht einheitlich. Grundsätzlich können Starkregenereignisse in ganz Deutschland auftreten. Ebenso geht man in der Klimaforschung davon aus, dass die Intensität von Starkregenereignissen infolge des Klimawandels vor allem im Winterhalbjahr zunehmen wird. Regional stärker betroffen sind die Mittelgebirge wie Schwarzwald, Harz und Erzgebirge sowie das Alpenvorland. Die Überflutungsgefährdung einer Liegenschaft durch wild abfließendes Oberflächenwasser kann jedoch nicht einheitlich beurteilt werden, da sie von vielen Faktoren wie der Umgebungsbebauung, der Topographie sowie der Oberflächenbeschaffenheit abhängt. Interessierten Bürgern und Planern wird über Starkregengefahrenkarten ein Instrument an die Hand gegeben, um die Gefährdung einzelner Liegenschaften beurteilen zu können. Die Erstellung von Starkregengefahrenkarten fällt in den Verantwortungsbereich der Kommunen. Zur Abbildung der Gefährdung wird auf ein digitales Geländemodell ein Bemessungsregen mit einer definierten Jährlichkeit aufgebracht. In dem Modell, das die Topographie sowie die Umgebungsbebauung und abflussrelevante Eigenheiten enthält, können Fließwege und potentielle Überflutungen durch das Niederschlagswasser dargestellt werden. Die Starkregengefahrenkarten finden sich auf den Seiten der jeweiligen Kommune (s. Infobox 5)

Infobox 5: Beispiele für Starkregengefahrenkarten

**Starkregengefahrenkarte der Stadt Recklinghausen (Nordrhein-Westfalen):**

URL: [https://www.recklinghausen.de/inhalte/startseite/leben\\_wohnen/dokumente/starkregengefahrenkarte.pdf](https://www.recklinghausen.de/inhalte/startseite/leben_wohnen/dokumente/starkregengefahrenkarte.pdf)

**Starkregengefahrenkarte der Stadt Wuppertal (Nordrhein-Westfalen):**

URL: <https://www.wuppertal.de/rathaus-buergerservice/umweltschutz/immission/starkregen.php>

**Starkregengefahrenkarte im Einzugsgebiet der Gloms (Baden-Württemberg):**

URL: <http://www.starkregengefahr.de/glems/>

Die Schwere eines Starkregenereignisses kann über einen Starkregenindex ermittelt werden (Schmitt et al. 2018). Im Starkregenindex findet über die Jährlichkeit, also die statistische Wiederkehrperiode eines Starkregenereignisses, eine Zuordnung zu einer dimensionslosen, mehrstufigen Skala statt. Somit kann die Schwere des Ereignisses, ähnlich wie bei der Richter-Skala bei Erdbeben, leicht verständlich kommuniziert werden. Die Zuteilung der Jährlichkeiten zum jeweiligen Indexwert nach Schmitt et al. (2018) ist in der Abbildung 9 dargestellt.

Wiederkehrzeit $T_R$ in a	1	2	3,3	5	10	20	25	33,3	50	100	> 100				
Kategorie	Starkregen				Intensiver Starkregen				Außergewöhnlicher Starkregen		Extremer Starkregen				
Starkregen- index SRI	1	1	2	2	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Erhöhungsfaktor										1,00	1,20 - 1,39	1,40 - 1,59	1,60 - 2,19	2,20 - 2,79	≥ 2,80

Abbildung 9: Starkregenindex nach Schmitt et al. (2018)

Die Bauteile, die am Gebäude hauptsächlich von Starkregen betroffen sind, sind folgende (mit abnehmender Sensitivität):

- Dachentwässerung,
- Entwässerungssysteme,
- Fassade.

#### 4.2. Dachentwässerung und Entwässerungssysteme

Grundlage für sämtliche Nachweise der Dachentwässerung ist die DIN 1986-100:2016-12. Die Dachentwässerungen werden auf den Bemessungsabfluss dimensioniert. Eine wesentliche Einflussgröße stellt der Abflussbeiwert dar. Dieser ist abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit des Dachs und berechnet sich aus dem Anteil des über die Entwässerungssysteme abgeführten Niederschlagsvolumens am Niederschlagsvolumen. Versiegelte oder dichte Oberflächen haben einen Abflussbeiwert von 1,0. Dies bedeutet, dass das Wasser vollständig über die Entwässerungsanlagen abgeführt werden muss. Begrünte Oberflächen haben je nach Ausführung einen Abflussbeiwert von bis zu 0,3. Dies bedeutet, dass 70 % des anfallenden Niederschlagswassers in den Vegetationsebenen oder im Dachaufbau zurückgehalten und nur 30 % über die Entwässerungssysteme abgeführt werden. Weiterhin ist es von Belang, wie mit dem Regenwasser umgegangen werden soll.

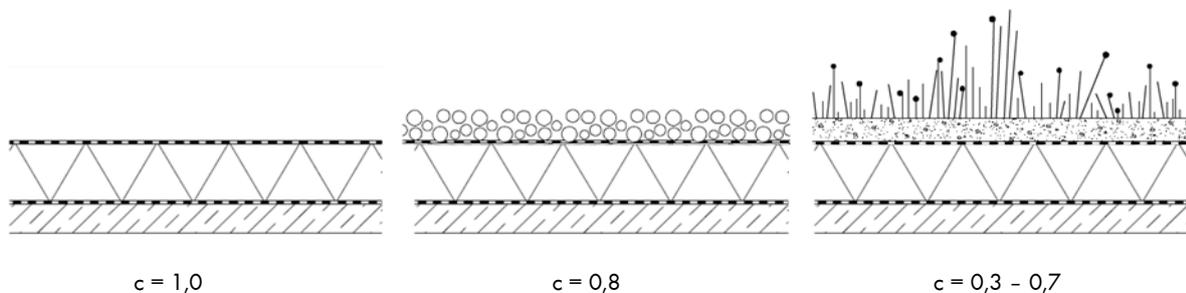


Abbildung 10: Abflussbeiwerte verschiedener Dachoberflächen

In vielen Fällen existieren Möglichkeiten, das anfallende Niederschlagswasser in einer Regenwasserzisterne zu speichern und dann zur Gartenbewässerung oder für einen separaten Wasserkreislauf beispielsweise für die Toilettenspülung zu verwenden. Ebenso kann das Gründach als Retentionsdach ausgeführt werden, bei dem auf dem Dach zusätzliches Regenwasserrückhaltevolumen zur Verfügung gestellt wird. Die Dimensionierung erfolgt in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren wie der Einstauhöhe und dem gewünschten Abfluss. Dabei ist zu berücksichtigen, ob in den Bemessungsregenspenden die Auswirkungen des Klimawandels bereits berücksichtigt wurden. Aufgrund des Klimawandels kommt es wie bereits beschrieben voraussichtlich zu einer Zunahme der Intensität von Starkregenereignissen. Ist die Klimaänderung nicht in der Bemessung enthalten, ist es wahrscheinlich, dass in wenigen Jahren Anpassungen am Gebäude vorgenommen werden müssen.

Diese Anpassungen sind in den meisten Fällen mit erhöhtem Planungs- und Fertigungsaufwand und damit auch mit Zeit und Kosten verbunden. Zur Berücksichtigung des Klimawandels sollte die Bemessungsregenspende mit dem Klimaänderungsfaktor in Höhe von 1,2 nach der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel multipliziert werden (vgl. BMUB 2016), der auf die Regenspenden aufgeschlagen wird.

Die Planung einer Notentwässerung verringert den Umplanungsaufwand. Bei der Notentwässerung wird überschüssiges Niederschlagswasser, das sich oberhalb einer definierten Einstauenebene auf dem Dach befindet, über Entwässerungsspeier abgeführt. Das abgeführte Wasser muss jedoch bei der Bemessung der Entwässerungssysteme des Grundstücks berücksichtigt werden. Ebenso ist es relevant, welche Dachart gewählt wird. Über ein Flachdach können sehr viele zusätzliche Klima- und Umweltpotentiale erschlossen werden (Regenwasserrückhaltung möglich, Biodiversität etc.). Allerdings ist es in den meisten Fällen nötig, die Unterkonstruktion des Daches mit einem Gefälle auszuführen, um den Abfluss zu gewährleisten. Ebenso muss sich der Einlauf für das Entwässerungssystem bei einem Flachdach an der tiefsten Stelle befinden, um die vollständige Entwässerung zu ermöglichen. Bei einem geneigten Dach muss die Regeldachneigung für verschiedene Dachdeckungsmaterialien eingehalten werden. Die Regeldachneigung gibt Auskunft über die Mindestneigung des Daches, bis zu der das Dach als regensicher gilt, d.h., dass das auf der Dachfläche abfließende Wasser im Normalfall nicht eindringt (vgl. Hestermann/Rongen (2018: 168 ff.)).

Infobox 6: Weiterführende Literatur zu Regenwasserrückhaltemaßnahmen

**DIN EN 12056-3:2000** - Schwerkraftentwässerungsanlagen innerhalb von Gebäuden, Teil 3: Dachentwässerung, Planung und Bemessung

**DIN 1986-100:2016-12** - Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke – Teil 100

**ZinCo GmbH (2019)** - Neue Drossel-Sets für Retentionsdächer

URL: <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/zinco-gmbh/NEUE-Drossel-Sets-fuer-Retentionsdaecher/boxid/949468>

**Mann/Klinger (2015)** - Rückhalt, Abflussverzögerung, Speicherung – Regenwasserbewirtschaftung mit Dachbegrünung

**Hestermann/Rongen (2018: Kapitel 3)** - Baukonstruktionslehre 2

### 4.3. Fassade

Weniger stark gefährdet ist die Fassade. Hier besteht die Gefährdung in Form von Schlagregen, also Starkregen in Zusammenspiel mit Wind. Nach der Norm DIN 4108-2:2013-02 sind die folgenden Wandbauarten für die Beanspruchungsgruppe III (starke Schlagregenbeanspruchung) geeignet:

- Wasserabweisender Außenputz auf Außenwänden aus Mauerwerk, Wandbauplatten, Beton, u.ä.,
- Zweischaliges Verblendmauerwerk mit Luftschicht und Wärmedämmung oder mit Kerndämmung (mit Innenputz),
- Außenwände mit im Dickbett oder Dünnbett angemörtelten Fliesen oder Platten nach DIN 18515-1:2017-08 mit wasserabweisendem Ansetzmörtel,
- Außenwände mit gefügedichter Betonaußenschicht,
- Wände mit hinterlüfteten Außenwandbekleidungen,
- Wände mit Außendämmung z.B. Wärmedämmputz-, Wärmedämm-Verbundsystem,
- Außenwände in Holzbauart mit Wetterschutz nach DIN 68800-2:2012-02.

Auch vorgehängte hinterlüftete Fassaden werden somit nach DIN 4108-3:2018-10 als sicher gegen starke Schlagregenbeanspruchung eingestuft, wenn die Fugen zwischen den Fassadenelementen nicht breiter als 15 mm sind. Sind die Fugenbreiten größer, muss durch konstruktive Maßnahmen der Witterungsschutz sichergestellt werden. Weitere Informationen zur Planung und Ausführung von vorgehängten hinterlüfteten Fassaden bietet der Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V. (FVHF 2017). Weitere Nachweise sind hier prinzipiell nicht nötig, wenn die Außenwandkonstruktionen nach dem Stand der Technik ausgeführt werden. Durch die DIN 4108-2:2013-02 findet eine normative Berücksichtigung der Beanspruchung durch Schlagregen in den Planungsablauf statt. Ebenso kann das gleichzeitige Auftreten von Hagel und Starkregen dazu führen, dass die Gebäudehülle erst durch Hagelschlag beschädigt wird und daraufhin Wasser in die Bauteilaufbauten eindringt. Beispielsweise kann durch Hagel die Putzschicht eines WDVS-Systems teilweise zerstört werden. Durch die entstehenden Beschädigungen dringt Wasser hinter die Putzschicht und in die Dämmung ein. Aufgrund der Durchfeuchtung reduziert sich die Dämmwirkung. Wird der Bauteilaufbau nicht sachgemäß rückgetrocknet können zudem Langzeitschäden wie Schimmel entstehen.

### 4.4. Dach

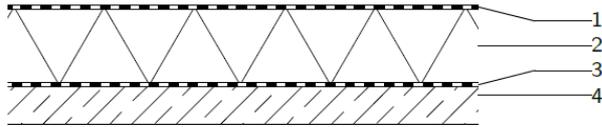
Für die Ausführung eines Flachdachs sind mehrere Varianten denkbar. Konkret werden vier verschiedene Varianten und die mögliche Erschließung von positiven Klima- und Umweltpotentialen vorgestellt. Die erste Variante ist ein Warmdach mit freiliegender Abdichtungsbahn (Abbildung 11). Bei einem Warmdach befindet sich die Dämmebene unterhalb der Abdichtungsebene. Durch die freiliegende Abdichtungsbahn, die mechanisch mit dem Untergrund verbunden ist, kann die Dachdecke aufgrund der geringeren Auflast dünner ausgeführt werden. Expandierter Kork ist als natürlicher Dämmstoff gut geeignet, da er sich durch hohe Druckfestigkeiten auszeichnet und die Umweltwirkung sehr gering ist. Der Abflussbeiwert beträgt 1,0. Die zweite Variante ist ein Umkehrdach (Abbildung 12). Bei einem Umkehrdach befindet sich die Dämmebene oberhalb der Abdichtungsebene. Dadurch reduziert sich die Auswahl an möglichen Dämmstoffen, da die Dämmung permanent der Feuchtigkeit ausgesetzt ist. Als Dämmung wird XPS (expandiertes Polystyrol) verwendet, da dieser Dämmstoff aufgrund seiner Zellstruktur unempfindlich gegenüber Wasser ist. Um ein Abheben der Dämmplatten zu vermeiden, wird als Oberfläche eine Kiesdeckung aufgebracht. Der Abflussbeiwert der Variante 2 beträgt 0,8.

Bei der dritten Variante handelt es sich um ein extensiv begrüntes Warmdach (Abbildung 13). Eine extensive Begrünung zeichnet sich durch eine Dicke des Vegetationssubstrats von 6 - 15 cm aus. Als Bepflanzung können Stauden, Kleingehölze und Moose verwendet werden. Detaillierte Informationen zur Pflanzenwahl um die biologische Vielfalt positiv zu beeinflussen finden sich in Kapitel 7.1. Der Abflussbeiwert eines extensiven Gründachs beträgt 0,5.

Die vierte Variante ist ein Retentionsdach (Abbildung 14). Beim Retentionsdach kann das Regenwasser über sogenannte Retentionsboxen auf dem Dach zurückgehalten werden. Die Abflusssteuerung wird über eine Drossel vorgenommen. In den Retentionsboxen wird das Wasser bis zu einer festgelegten Höhe aufgestaut und kann beispielsweise zur Bewässerung der Dachbegrünung verwendet werden. Der Abfluss wird über ein System gesteuert, welches mit der Wettervorhersage von offiziellen Stellen verbunden ist. Wird Regen angekündigt, wird so viel Wasser aus der Box abgeleitet wie Niederschlagsvolumen vorhergesagt ist. Die Regenwasserrückhaltung ist einer der großen Vorteile des Retentionsdachs. Wird das Retentionsdach als intensives Gründach ausgeführt, kann zudem eine größere Anzahl an Pflanzenarten verwendet werden. Dies kann sich positiv auf die Umweltpotentiale Biodiversität, Feinstaub und Mikroklima auswirken. Allerdings werden bei einem Gründach eine große Anzahl an Folien verwendet, was sich nachteilig auf die Ökobilanz auswirkt. Zudem muss die Unterkonstruktion aus Stahlbeton um ca. 20 % dicker ausgeführt werden als bei der ersten Variante. Dadurch wird mehr Material benötigt und das Ergebnis der Ökobilanz verschlechtert sich weiter.

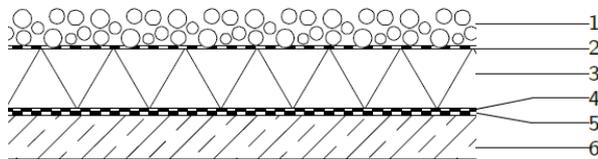
Die Verbindung der einzelnen Schichten kann auf verschiedene Arten bewerkstelligt werden. Zum einen ist es möglich, die einzelnen Schichten miteinander zu verkleben. Dadurch ist ein sortenreiner Rückbau nicht ohne weiteres möglich, was sich negativ auf die Recyclingfähigkeit auswirkt. Zum anderen können die einzelnen Schichten auch mechanisch oder lose miteinander verbunden werden. Die Befestigung erfolgt dabei über Linien- oder über Saumbefestigungen. Bei der Linienbefestigung wird auf einer flächig verlegten Dachabdichtungsbahn ein Profil befestigt, das durch mechanische Verbindungen wie Schrauben oder Nägel durch die Dämmung mit der tragenden Deckenkonstruktion verbunden wird. Über das Profil wird ein Streifen aus demselben Material wie die Dachbahn verlegt und mit dieser verschweißt. Bei der Saumbefestigung werden die einzelnen Dachbahnen am Rand durch mechanische Verbindungsmittel auf der Tragkonstruktion befestigt.

Die benachbarte Dachbahn wird so verlegt, dass sie die Verbindungsmittel überlappt. Anschließend werden die beiden Bahnen miteinander verschweißt. Für das Verschweißen werden keine weiteren Materialien verwendet, wodurch sich eine sortenreine, mechanisch befestigte Abdichtungsebene ergibt. Beim Umkehrdach wird XPS-Dämmung verwendet, welche im Recyclingprozess nur verbrannt werden kann. Eine Wiederverwertung ist nur mit hohem wirtschaftlichem Aufwand möglich. Der Beitrag zur globalen Klimaerwärmung sowie der Verbrauch von fossiler Primärenergie von XPS ist im Vergleich zu expandiertem Kor zudem sehr hoch, da in der Herstellung viel Erdöl und hohe Temperaturen benötigt werden. Für ein Einfamilienhaus ist ein extensiv begrüntes Gründach eine gute Option, da es ein stabiles Gleichgewicht zwischen ökologischem Aufwand und Erschließung von Klima- und Umweltpotentialen darstellt.



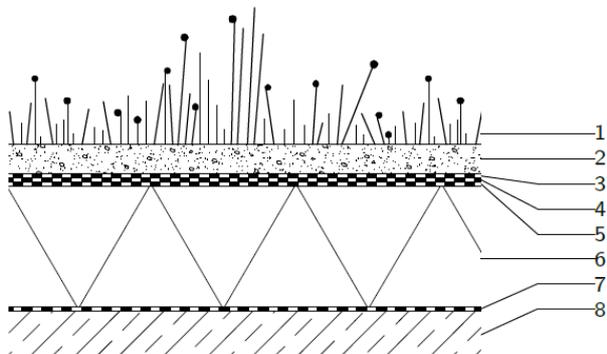
Nr.	Material
1	PVC-Dachbahn
2	expandierter Kork
3	Dampfsperre
4	Stahlbeton C25/30

Abbildung 11: Warmdach mit freiliegender Abdichtungsbahn



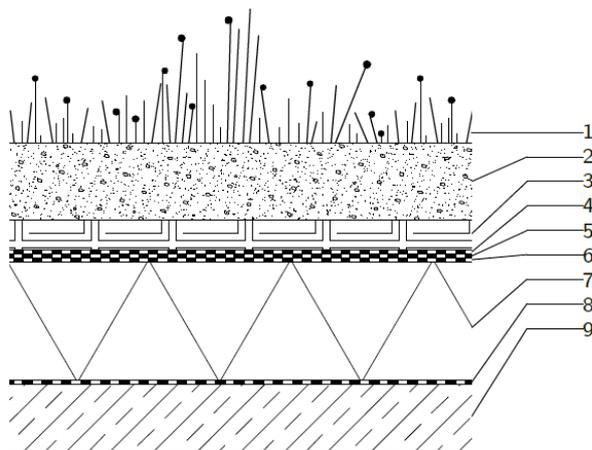
Nr.	Material
1	Kiesdeckung
2	PE/PP-Vlies
3	XPS-Wärmedämmung
4	PVC-Dachbahn
5	PE/PP-Vlies
6	Stahlbeton C25/30

Abbildung 12: Umkehdach mit Kiesdeckung



Nr.	Material
1	Begrünung
2	Vegetationssubstrat
3	Durchwurzelerschutz
4	PE/PP-Vlies
5	PVC-Dachbahn
6	expandierter Kork
7	Dampfsperre
8	Stahlbeton C25/30

Abbildung 13: Warmdach mit extensiver Begrünung



Nr.	Material
1	Begrünung
2	Vegetationssubstrat
3	Retentionsbox WRB 85L
4	Durchwurzelerschutz
5	PP/PE-Vlies
6	PVC-Dachbahn
7	expandierter Kork
8	Dampfsperre
9	Stahlbeton C25/30

Abbildung 14: Retentionsdach, intensive Begrünung

#### 4.5. Freiflächen und Außenanlagen

Neben dem Gebäude müssen auch die Freiflächen und die Außenanlagen betrachtet werden. Diese bieten ein großes Potential, um positive Klima- und Umweltpotentiale zu erschließen. Zudem kommt den Außenanlagen eine wichtige Rolle im Hochwasserschutz und bei den Entwässerungssystemen zu. Nach § 55 Absatz 2 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) (BRD 2013) soll Niederschlagswasser „ortsnah versickert, verrieselt oder direkt oder über eine Kanalisation ohne Vermischung mit Schmutzwasser in ein Gewässer eingeleitet werden [ . . . ].“ Für Grundstückseigentümer hat die Verwendung von unversiegelten Oberflächen sowie Versickerungsflächen auf dem Grundstück finanzielle Vorteile. Nach einem Urteil des Verwaltungsgerichtshof Mannheim vom 11.03.2010 ist die sogenannte „gesplittete Abwassergebühr“ bundesweit anzuwenden. Bei der gesplitteten Abwassergebühr werden die Gebühren für Schmutzwasser, also „verbrauchtes“ Frischwasser und Niederschlagswasser getrennt. Von der Entscheidung profitieren nun Eigentümer von Grundstücken, die einen großen Anteil an nicht-versiegelten Flächen aufweisen. Nach dem VGH müssen nur Gebühren für das Niederschlagswasser entrichtet werden, das über das Kanalnetz abgeleitet wird. Niederschlagswasser, das auf dem Grundstück versickert, bleibt von der Gebühr unberührt. Die Versickerung auf dem Grundstück kann über vielfältigste Maßnahmen erfolgen. Welche Versickerungsart gewählt wird, ist abhängig von der Durchlässigkeit des anstehenden Bodens und des Grundwasserspiegels. Ist der Boden zu durchlässig, versickert das Wasser zu schnell und der Boden verliert seine Filterfunktion. Dadurch können Schadstoffe schneller ins Grundwasser gelangen. Versickert das Wasser hingegen zu langsam, kann es zu einem unplanmäßigen Wasseranstau auf dem Gelände kommen und das Wasser in das Gebäude eindringen. Die Bodenparameter müssen im Vorfeld der Planung geklärt werden um ein sinnvolles Entwässerungskonzept zu entwickeln.

Konkrete Maßnahmen sind die Versickerung über Retentionsmulden oder -plätze, Retentionstiefbeete sowie Rigolenversickerungen oder Mulden-Rigolen-Versickerungen (vgl. Abbildung 15). Eine Rigole ist ein unterirdischer Kieskörper, der das Wasser kurzzeitig speichert, bevor es zeitversetzt in den Boden versickert. Bei einer Mulden-Rigolen-Versickerung befindet sich die Rigole am Boden einer Mulde. So wird zusätzliches Rückhaltevolumen geschaffen und das Wasser kann Stück für Stück versickern. Durch die Vorschaltung einer Zisterne kann das Regenwasser zurückgehalten werden. Das Regenwasser, das nicht mehr in der Zisterne gespeichert werden kann, wird an die Rigole weitergeleitet. Das in der Zisterne gespeicherte Wasser kann in einem separaten Wasserkreislauf für die WC-Spülung oder die Gartenbewäs-

serung verwendet werden. Gerade bei begrenzten Platzverhältnissen ist diese Art der Rückhaltung gut geeignet, da sie wenig Fläche benötigt. Zudem reduziert sie den Trinkwasserverbrauch. Weiterhin kann das Wasser auch in Regentonnen gespeichert werden. Eine weitere Maßnahme ist die Modellierung des Geländes, um die Fließwege des Wassers zu beeinflussen. Dabei ist es sinnvoll, das Gelände so zu gestalten, dass das Wasser nicht zum Gebäude hin, sondern vom Gebäude fort fließt um ungewollten Wassereintritt zu vermeiden. Ebenso können durch eine Gestaltung und Modellierung der Freiflächen Räume geschaffen werden, über die das Wasser gefahrlos abgeleitet werden kann. Dies kann zudem als Fläche dienen, in die der Notüberlauf der Dachfläche entwässert wird. Um das Volumen des über Kanalnetze abgeführten Wassers zu reduzieren, können Flächen entsiegelt werden. Variationsmöglichkeiten gibt es hier bei Stellplätzen und Zuwegungen. Durch die Verwendung von Rasengittersteinen anstelle von Asphalt reduziert sich der Abflussbeiwert von 1,0 auf 0,4. Somit werden 60 % weniger Wasser in die öffentlichen Kanalnetze geleitet. In Abhängigkeit der Grundstücksgröße ist ein Überflutungsnachweis zu führen, in dem nachgewiesen wird, dass das bei einem Starkregen anfallende Wasser schadlos auf dem Gelände zurückgehalten werden kann. Aus ökobilanzieller Sicht wirkt sich die Verwendung von Rasengittersteinen im Vergleich zu Asphalt vorteilhaft aus. Ebenso können positive Effekte auf die Biodiversität und das Mikroklima verzeichnet werden.

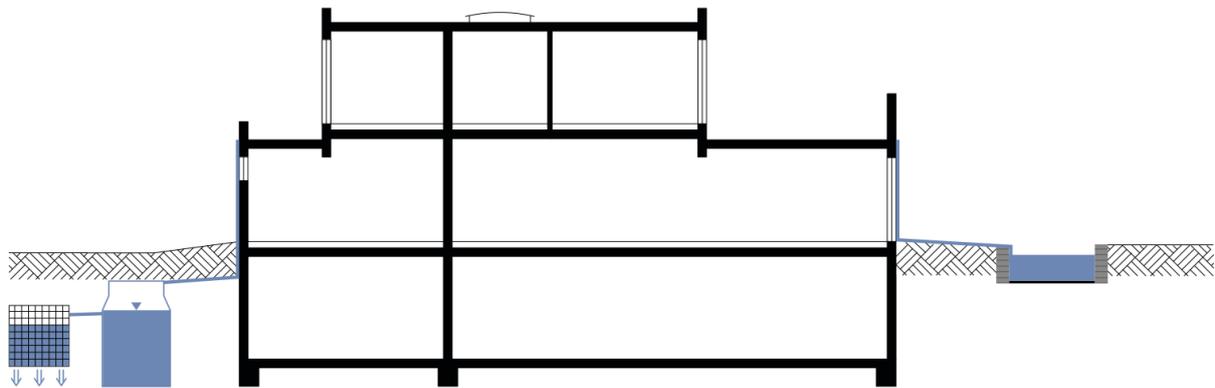


Abbildung 15: Möglichkeiten der Regenwasserrückhaltung auf dem Gelände

## 5. Hochwasser

### 5.1. Grundlagen

Hochwasser kann in vier verschiedene Typen unterschieden werden, die eine Bedrohung für ein Gebäude darstellen. Dies sind:

- Sturzfluten, ausgelöst durch heftige, kurzzeitige Regenfälle
- Grundhochwasser, ausgelöst durch Anstieg des Grundwasserspiegels aufgrund von Regenfällen
- Sturmfluten, ausgelöst durch starke auflandige Winde in Verbindung mit Flut in Küstengebieten
- Flusshochwasser, ausgelöst durch heftige, langandauernde Regenfälle

Die Gefährdung durch Sturzfluten wird durch Starkregen ausgelöst. Diese Art der Überflutung und der damit einhergehende Umgang der baulichen Infrastruktur wird jedoch bereits in Kapitel 4 betrachtet. Grundhochwasser stellen für die Abdichtung gegenüber Flusshochwassern keine zusätzliche Gefährdung dar. Somit wird die Gefährdung durch Grundhochwasser auch in der Gefährdung durch Flusshochwasser abgebildet. Von Sturmfluten sind nur kleine Teilgebiete in Küstennähe betroffen. Hier kann insbesondere eine Vorkehrung durch einen sorgfältig geplanten Küstenschutz erreicht werden. Die Betrachtung der Gefährdung durch Hochwasser beschränkt sich somit in dieser Broschüre auf Flusshochwasser, da hier durch geeignete Anpassungsmaßnahmen im Vorfeld eines Ereignisses bereits wirksame Schutzmaßnahmen ergriffen werden können. Die Gefährdung durch Flusshochwasser steht im direkten Zusammenhang mit der Einwirkung Starkregen. Durch lang andauernde Regenfälle über mehrere Tage steigt die Hochwassergefahr. Durch den Klimawandel verstärkt sich die Gefährdung. Dies ist auf drei hauptsächliche Faktoren zurückzuführen:

- 1.) Zunahme von Großwetterlagen, die Dauerregen begünstigen
- 2.) Zunahme von Niederschlägen im Winter und Zusammenspiel mit teilweise gefrorenen Böden sowie Schneeschmelze
- 3.) Erderwärmung führt zu höherer Wasseraufnahmekapazität in der Atmosphäre und zu mehr Wasser im Kreislauf.

Deutschlandweit lässt sich keine einheitliche Gefährdungslage durch Flusshochwasser ermitteln, da diese stark abhängig vom Standort ist. Die Auswirkungen hängen von verschiedenen Faktoren wie dem Einzugsgebiet sowie der Form und Ausdehnung des Flusstals ab. Ebenso sind Gebäude in höheren Lagen einer geringen bis gar keiner Gefahr von Hochwasser ausgesetzt. Zur individuellen Beurteilung der Hochwassergefahr einer Liegenschaft werden von den Bundesländern Hochwassergefahrenkarten erstellt, die im Internet einsehbar sind (s. Infobox 7)

Infobox 7: Beispiele für Hochwassergefahrenkarten

**Hochwassergefahrenkarte des Landes Baden-Württemberg:**

URL: <https://www.hochwasser.baden-wuerttemberg.de/hochwassergefahrenkarten>

**Hochwassergefahrenkarte des Landes Bayern:**

URL: [https://www.lfu.bayern.de/wasser/hw\\_ue\\_gebiete/informationsdienst/index.htm](https://www.lfu.bayern.de/wasser/hw_ue_gebiete/informationsdienst/index.htm)

**Hochwassergefahrenkarte des Landes Nordrhein-Westfalen:**

URL: <https://www.flussgebiete.nrw.de/hochwassergefahrenkarten-und-hochwasserrisikokarten-194>

Der Umgang mit Hochwasser folgt grundsätzlich drei Ansätzen:

- Ausweichen
- Anpassen
- Widerstehen



Abbildung 16: Prinzipielle Ansätze zum Umgang mit Hochwasser nach BMI (2018)

Die Strategie „Ausweichen“ verfolgt das Ziel, das ganze Gebäude oder zumindest Teilbereiche davon der Gefährdung durch Hochwasser zu entziehen. Konkret beinhaltet die Strategie neben der Verlagerung von hochwertigen Gebäudeteilen in Bereiche, die nicht überflutungsgefährdet sind, den Verzicht auf eine Unterkellerung sowie ein Aufstellen des Gebäudes. Eine Möglichkeit der Strategie „Ausweichen“ ist die Verlagerung von hochwertigen Technologien, die normalerweise im Keller platziert werden in höher liegende Stockwerke. Als hochwertige Technologien gelten Komponenten der Gebäudetechnik wie Wärmereizeuger oder Lüftungsgeräte. Auch die Stromverteilung kann in höhere Geschosse verlegt werden. Zwar befindet sich der Hausanschluss an das Stromnetz im Normalfall im Boden. Die tatsächliche Verteilung auf die einzelnen Geräte kann allerdings auch in anderen Teilen des Gebäudes erfolgen. Stromleitungen können zudem in einer abgehängten Decke verlegt werden. Somit sind sie im Unterschied zur Verlegung auf dem Fußboden oder in der Wand vor Hochwasser geschützt. Weiterhin ist die Zugänglichkeit erleichtert.

Die Strategie „Anpassen“ strebt ein „Leben mit dem Wasser“ an, sodass im Hochwasserfall nur geringe Schäden zu erwarten sind. Bei dieser Strategie ist im Hochwasserfall ein planmäßiger Eintritt des Wassers in das Gebäude vorgesehen. Die Verlagerung von Technologien in höher liegende Bereiche des Gebäudes ist ebenso ein wichtiger Punkt dieser Strategie. Weiterhin sind die Materialwahl und die Schichtenreihenfolge der Bauteilaufbauten von entscheidender Bedeutung, da das Wasser im Hochwasserfall geplant in das Gebäude eindringen kann.

Nach dem Abfluss bzw. dem Abpumpen des Wassers, müssen jedoch intensive Trocknungsmaßnahmen vorgenommen werden, um Schimmel oder Langzeitschäden an den Bauteilen zu vermeiden. Materialien von Bauteilen, die mit Flutwasser in Berührung kommen, sollten wasserresistent ausgeführt werden. Weiterhin ist es vorteilhaft, Materialien zu verwenden, die auf der einen Seite eine hohe Wasserwiderstandsfähigkeit aufweisen und zum anderen abwaschbar sind. So kann nach einem Hochwasserereignis der Ausgangszustand ohne größeren Aufwand wieder hergestellt werden.

Bei der Strategie „Widerstehen“ wird das Eindringen des Wassers in das Gebäude verhindert. Zur Umsetzung der Strategie und um einen effektiven Hochwasserschutz zu gewährleisten, ist ein ganzheitliches Abdichtungskonzept erforderlich. Selbst bei einer fachgerechten Herstellung einer Schwarzen, Weißen oder Braunen Wanne zur Abdichtung des Kellers bestehen zahlreiche zusätzliche Schwachstellen, die ein potenzielles Risiko für Wassereintritt in das Gebäude darstellen (Abbildung 17). Zudem muss auf eine auftriebs-sichere Gesamtkonstruktion geachtet werden.

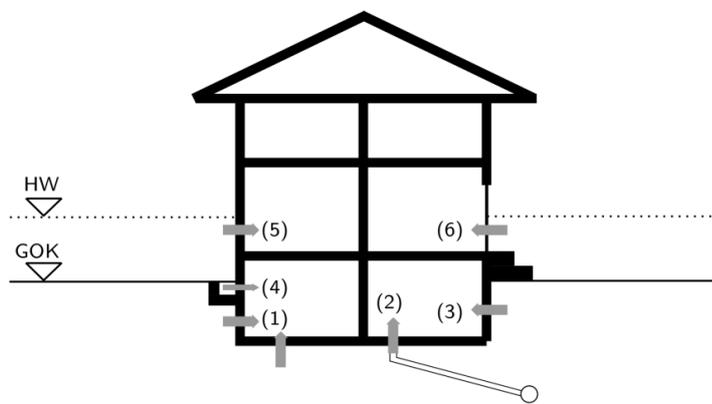


Abbildung 17: Eintrittsmöglichkeiten von Wasser in das Gebäude nach BMI (2018)

- (1) Eindringen durch Bodenplatte oder Kellerwände
- (2) Eindringen von Rückstauwasser durch die Kanalisation
- (3) Wänderdurchführungen
- (4) Eindringen über Lichtschächte oder Kellerfenster
- (5) Eindringen durch Außenwand
- (6) Eindringen durch Türen und Fenster

Der Wassereintritt in das Gebäude kann beispielsweise durch mobile, temporäre Absperrsysteme verhindert werden, die im Falle eines Hochwassers errichtet werden können. Hochwasser stellt für verschiedene Bauteile eine Gefährdung dar. Die am stärksten betroffenen Bauteilgruppen sind (mit abnehmender Sensitivität):

- Keller,
- Fußbodenaufbau in denen vom Hochwasser betroffenen Geschossen,
- Außenwände.

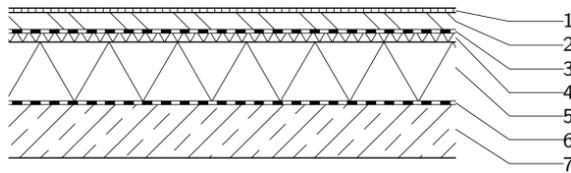
Doch wie bereits bei der Strategie „Widerstehen“ angesprochen, kann nur durch ein ganzheitliches Abdichtungskonzept ein vollständiger Hochwasserschutz sichergestellt werden. Dazu müssen verschiedene weitere Aspekte betrachtet werden.

## 5.2. Keller

Um eine sorgfältige Abdichtung der Kellerwände zu gewährleisten kommen drei verschiedene Varianten in Betracht. Dies sind die Schwarze Wanne, die Braune Wanne und die Weiße Wanne. Bei der Schwarzen Wanne wird die Dichtigkeit durch eine zusätzliche, außenliegende Abdichtungsebene sichergestellt. Als Abdichtungsmaterial werden geklebte oder verschweißte Bitumen- oder Kunststoffbahnen verwendet. Detaillierte Ausführungshinweise finden sich in der Norm DIN 18533-1:2017-07. Bei der Weißen Wanne wird die Abdichtung durch die Konstruktionsform sichergestellt. Dabei werden die in Stahlbetontragwerken üblichen und nötigen Risse durch einen größeren Bewehrungsanteil oder durch eine höhere Betonqualität in ihrer Breite minimiert. Der Beton wird entsprechend als WU-Beton (wasserundurchlässiger Beton) bezeichnet. Um die Dichtheit zu gewährleisten ist eine sorgfältige Planung unter Berücksichtigung der Wasserstandshöhe und der Raumnutzung nötig. Weitere Ausführungen und Regelungen zur Weißen Wanne finden sich in der Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb 2017). Die Braune Wanne wird häufig als Hybridvariante zwischen der Weißen und der Schwarzen Wanne ausgeführt. Zur Ausführung einer Braunen Wanne wird Bentonit auf der Stahlbetonstruktur befestigt. Bentonit ist ein Tonmaterial, welches sich bei Kontakt mit Wasser um ein vielfaches ausdehnt. Somit können Risse oder Beschädigungen an der Stahlbetonstruktur abgedichtet werden. Dadurch können breitere Risse in der Tragstruktur zugelassen werden. Welche Variante schlussendlich gewählt wird, muss in Absprache mit dem Planer getroffen werden. Die Ausführung hängt dann auch maßgeblich davon ab, welche Nutzungen und welcher Standard im Kellergeschoss vorgesehen wird. Nur unter Kenntnis der konkreten geplanten Nutzung des Kellergeschosses kann der Planer eine passende Variante wählen.

## 5.3. Fußbodenaufbau

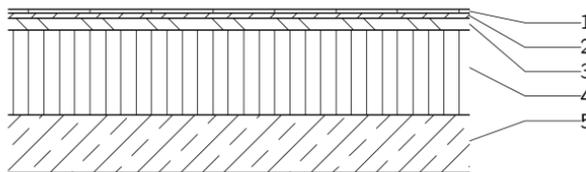
Tritt Hochwasser in das Gebäude ein, insbesondere in das Erdgeschoss oder das Kellergeschoss, hat dies Auswirkungen auf den Fußbodenaufbau. Das Wasser kann in die Konstruktion eindringen und dort zu einer irreparablen Beschädigung der Dämmebene oder des gesamten Aufbaus führen. Ebenso kann das Wasser zu einem Auftrieb der Dämmung und zu einer Beschädigung des schwimmenden Estrichs führen. Beim Fußbodenaufbau können zwei grundsätzliche Ansätze verfolgt werden. Zum einen kann der Fußbodenaufbau als im Hochwasserfall verletzlich, aber leicht rückbaubar geplant werden. Zum anderen kann es aber eine mögliche Variante sein, eine vollständig dichte und mit wasserresistenten Materialien ausgeführte Konstruktionsweise zu wählen. Ein Beispiel für einen leicht rückbaubaren Aufbau und für einen wasserresistenten Aufbau finden sich in Abbildung 18 und Abbildung 19. Im Vorfeld der Planung muss geklärt werden, welcher tatsächlichen Hochwassergefährdung ein Gebäude ausgesetzt ist und ab welchem Hochwasserstand der Wassereintritt erwartet wird. Ein wichtiges Instrument sind auch hier die Hochwassergefahrenkarten. Zur Berücksichtigung der Änderung der Hochwasserstände aufgrund des Klimawandels wird von Seiten des Bundes ein Klimaänderungsfaktor von 1,2 empfohlen. Die Bemessungswasserstandshöhen können mit dem Klimaänderungsfaktor multipliziert werden. So kann über die Hochwassergefahrenkarte und den Klimaänderungsfaktor die erwartete Bemessungswasserstandshöhe aufgrund des Klimawandels ermittelt werden. Dies betrifft insbesondere die ökologischen und die ökonomischen Aspekte. Ein wasserresistenter Fußbodenaufbau reduziert zwar die Schadenshöhe und den Sanierungsaufwand im Hochwasserfall, kann aber eine deutlich schlechtere Ökobilanz aufweisen, als ein Fußbodenaufbau, der innerhalb des üblichen Betrachtungszeitraums von 50 Jahren nur einmal aufgrund von Hochwasser ausgetauscht werden muss. Weiterführende Ausführungen zum Fußbodenaufbau und den Umgang mit Hochwasser finden sich auch im Merkblatt DWA-M 553 (DWA 2016), Patt/Jüpner (2013) sowie in der Hochwasserschutzfibel des Bundes (BMI 2018).



Nr.	Material
1	Mehrschichtparkett
2	Zementestrich
3	Dampfsperre
4	EPS-Trittschalldämmung
5*	EPS-Wärmedämmung
6	PE-Folie
7	Stahlbeton C25/30

\*nur bei gedämmter Variante

Abbildung 18: Leicht rückbaubarer Fußbodenaufbau



Nr.	Material
1	Keramische Fliesen
2	Dünnbettmörtel
3	Gussasphaltestrich
4	Schaumglasplatten in Heißbitumen
5	Stahlbeton C25/30

Abbildung 19: Wasserresistenter Fußbodenaufbau

#### 5.4. Außenwände und Fassade

Auch für Außenwände stellt Hochwasser eine Gefährdung dar. Gefährdet sind dabei hauptsächlich die Dämmebene, da häufig nicht wasserresistente Dämmstoffe verwendet werden, die im Hochwasserfall ausgetauscht werden müssen. Problematisch sind im Allgemeinen Zwischenräume bei mehrschichtigen Bauteilaufbauten. Tritt hier Wasser ein und wird nicht innerhalb kurzer Zeit wieder abgeführt, können langfristige Schäden entstehen. Dieser Fall tritt unter anderem bei einem zweischaligen Mauerwerk auf, speziell wenn sich zwischen Kerndämmung und äußerer Schale ein Luftspalt befindet. Für die Kerndämmung können bei der Gefährdung durch Hochwasser nur Materialien verwendet sind, die wasserresistent sind. Dies sind beispielsweise XPS (extrudiertes Polystyrol) oder Schaumglasplatten. Aber auch das Material der tragenden Wandebene ist durch Hochwasser gefährdet. Hochlochziegel, die aus bauphysikalischer Sicht gut geeignet sind, sind im Hinblick auf Hochwasser gefährdet, da das Wasser über kapillaren Feuchttransport in die Hohlräume eindringen kann und sich dort ablagert.

Ähnlich wie beim Fußbodenaufbau können auch bei den Außenwänden zwei verschiedene Strategien verfolgt werden. Beispielsweise ist es möglich, ein Wärmedämmverbundsystem mit einer wasserresistenten Schaumglasdämmung zu verwenden. Aus ökologischer Sicht ist allerdings die Rückbaubarkeit problematisch, da die Dämmebene mit der Tragstruktur verklebt wird. Die sortenreine Trennung der Materialien ist somit schwer möglich. Im Hochwasserfall muss nur die Putzschicht erneuert werden, da Schaumglas eine geschlossene Zellstruktur aufweist. Alternativ dazu kann ein leicht rückbaubares System verwendet werden, das im Hochwasserfall ohne größeren Aufwand demontiert werden kann.

Hier bietet sich eine vorgehängte hinterlüftete Fassade an. Je nach verwendetem System kann bereits im Vorfeld eines Hochwassers die Fassade demontiert werden. Dadurch wird sie der Einwirkung entzogen. Für das Dämmmaterial kann ein Dämmstoff aus nachwachsenden Rohstoffen verwendet werden. Kommt es aufgrund eines Hochwassers zu einer Beschädigung des Dämmmaterials, ist der Einfluss auf die Umwelt infolge des nötigen Austauschs geringer als bei konventionellen Dämmstoffen. In der Planung des Gebäudes sollte ein Vorsorgekonzept für den Hochwasserfall entwickelt werden. Dies sieht vor, ab welcher erwarteten Wasserstandshöhe Teile der Fassade zurückgebaut werden sollten. Ebenso sollte die grundlegende Strategie (einfache Rückbaubarkeit aber wasserempfindlich oder wasserresistent aber schlecht rückbaubar) festgelegt werden. Es bietet sich an, sowohl für den Fußbodenaufbau als auch für die Fassade die identische Strategie zu verwenden.

### 5.5. Weitere Anpassungsmaßnahmen

Für einen effektiven Hochwasserschutz ist zudem ein ganzheitliches Konzept erforderlich. Auch wenn die Kellerwand und die Außenwand dicht ausgeführt werden, kann das Wasser bei unsachgemäßer Ausführung über Gebäudeöffnungen, Lichtschächte oder Wanddurchführungen in das Gebäude eindringen. Die eventuellen Vorsorgemaßnahmen werden an dieser Stelle erläutert.

Steigt der Hochwasserpegel über die Rückstauenebene der Kanalisation an, kann dies zu einer Umkehr der Fließrichtung führen. Dadurch fließt das Wasser aus dem Abwasserkanal zurück ins Gebäude und kann zu einer Beschädigung führen. Dieser Effekt kann durch eine Rückstausicherung in Form eines Absperrschiebers oder einer Rückschlagklappe verhindert werden. Eine weitere potentielle Gefährdung stellen Wanddurchführungen dar. Zur Sicherung gegen drückendes Grundwasser kann eine druckwasserfeste Wanddurchführung verwendet werden. Um den Schutz gegen eindringendes Grundwasser auch nach Umbau- oder Anpassungsmaßnahmen aufrechtzuerhalten, ist eine sorgfältige Dokumentation der Bauweise erforderlich. Ohne eine entsprechende Dokumentation besteht die Gefahr, dass bei nachträglich installierten Wanddurchführungen die Anforderungen an die Abdichtung missachtet werden.

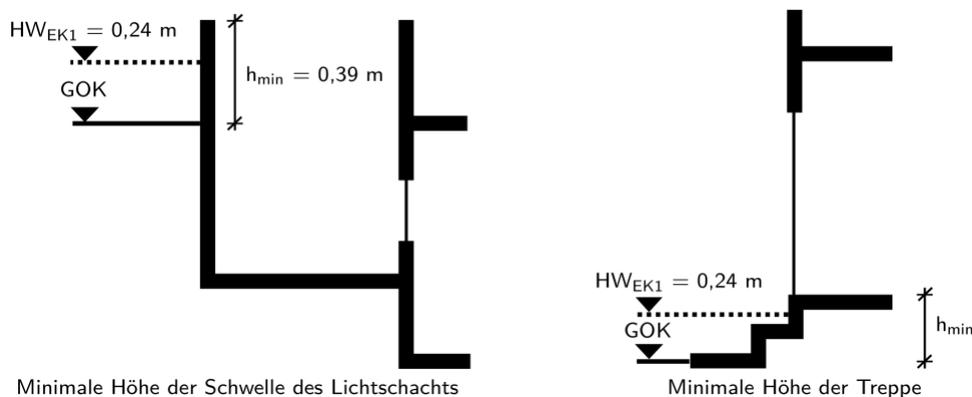


Abbildung 20: Bauliche Schutzmaßnahmen gegen eindringendes Oberflächenwasser

Weiterhin muss in der Planung ebenso der Schutz gegen eindringendes Oberflächenwasser über Lichtschächte berücksichtigt werden. Über Aufkantungen von mindestens 15 cm sowie Überdachungen der Lichtschächte kann auf der einen Seite verhindert werden, dass Oberflächenwasser oder Niederschlag in den Lichtschacht eintritt. Auf der anderen Seite wird durch Abflusseinrichtungen im Boden des Lichtschachts die Gefahr verringert, dass eindringendes Wasser direkt über die Kellerfenster in den Keller gelangt. Auch die Fenster im Lichtschacht sollten nicht bis zur Sohle des Lichtschachts reichen. Weitere kritische Stellen im Erdgeschoss sind Türen und Fenster. Die Untergeschosse können noch so gut abgedichtet werden, wenn das Wasser im Hochwasserfall über Türen oder Fenster im Erdgeschoss in das Gebäude eindringt und in den Keller fließt. Der Schutz vor eindringendem Wasser kann durch eine Erhöhung des Hauseingangs über eine kurze Treppe, Rampe oder über mobile Dammbalkensysteme erfolgen. Dammbalkensysteme sind temporäre Sperrsysteme, bei denen in vormontierte Fassungen einzelne Elemente eingeführt werden. Dadurch werden Zugangswege des Wassers in das Gebäude verschlossen.

Im Hinblick auf den Keller muss die Standsicherheit des Gebäudes betrachtet werden. Steigt der äußere Wasserpegel über die Höhe der Bodenplatte an, kommt es zu einer Auftriebskraft, die von unten auf die Bodenplatte wirkt. Im schlimmsten Fall kann dies zum Aufschwimmen des Gebäudes und zu einer Gefährdung der Standsicherheit führen. Um diese zu gewährleisten, muss die Auflast des Gebäudes größer als die Auftriebskraft aus dem verdrängten Volumen sein. Kann die geforderte Auflast des Gebäudes nicht durch ständige Lasten aus der Tragstruktur erreicht werden, stellt ein gezieltes Fluten des Kellers die Standsicherheit sicher. Im Hinblick auf eine Reduktion des entstehenden Schadens, sollte die nötige Fluthöhe im Vorfeld erfasst und entsprechende Präventionsmaßnahmen im Keller ergriffen werden. Ebenso ist es ratsam, Trinkwasser für die Flutung zu verwenden, da ansonsten die Gefahr der Verunreinigung des Kellers mit im Flutwasser enthaltenen Schadstoffen besteht. Durch die Unterströmung von Fundamenten bei Hochwasser und die daraus resultierende Erosion können Bauteile zerstört oder beschädigt werden. Bei erosionsgefährdeten Böden sollte zur Gewährleistung der Standsicherheit des Gebäudes die Fundamentunterkante mindestens 1 m unter der zu erwartenden Erosionssohle liegen. Weitere detailliertere Ausführungen zu der Gefährdung durch Hochwasser finden sich in der Hochwasserschutzfibel des Bundes (BMI 2018).

Die durch Hochwasser gefährdeten Bauteile bieten nur geringe Möglichkeiten, positive Klima- und Umweltpotentiale zu erschließen. Gerade der Fußbodenaufbau und der Keller bieten keine relevante Möglichkeit, die direkte Umwelt positiv zu beeinflussen. Betrachtet werden können die Rückbaubarkeit und die Ökobilanz, wobei sich diese beim Fußbodenaufbau gegenseitig bedingen. Leicht rückbaubare, wasserempfindliche Konstruktionen können in Abhängigkeit der Anzahl an Hochwasserereignissen eine schlechtere Ökobilanz aufweisen als mit hohem Aufwand rückbaubare, aber wasserresistente Konstruktionen. Die Konstruktion der Fassade bietet mehr Möglichkeiten, die direkte Umgebung positiv zu beeinflussen. Beispielsweise kann durch eine helle Farbwahl oder durch eine begrünte Fassade das Mikroklima verbessert werden. Detailliertere Informationen finden sich im Kapitel 7.1.

## 6. Hagel

### 6.1. Grundlagen

Die aktuelle Hagelgefährdung nimmt in Deutschland von Norden nach Süden zu. Besonders gefährdet ist ein Gebiet südlich von Stuttgart. Dieses verläuft vom Ostrand des Schwarzwalds über die Region Stuttgart, Tübingen und Reutlingen, die östlich anschließende Albhochfläche bis nach Ulm. Zudem gibt es einen weiteren Schwerpunkt südlich von Aalen. Auch das Alpenvorland südlich von München inklusive des Raums München ist stark gefährdet. Daneben existieren in Hessen zwei Gebiete mit erhöhter Hagelgefahr. Das eine Gebiet befindet sich östlich des Rothaargebirges bzw. westsüdwestlich von Kassel, das andere nordöstlich von Frankfurt im Bereich Wetterau. Ostdeutschland ist insgesamt weniger von Hagel betroffen. Eine Ausnahme stellt das Erzgebirge südwestlich von Dresden dar (Puskeiler 2013: 128 ff.; Punge/Kunz 2016: 163 f.). Diese Aufteilung wird in der Abbildung 21 dargestellt.



Abbildung 21: Hagelindexkarte für Deutschland (Otto/Busch 2009: 11)

Als Vorreiter bezüglich der leicht verständlichen Einschätzung der Hagelgefahr und der einheitlichen Prüfung des Hagelwiderstands von Bauteilen ist die Vereinigung Kantonaler Gebäudeversicherungen der Schweiz zu nennen, die aus der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF) hervorgegangen ist. Für die Schweiz liegen Karten der Hagelgefährdung bei Wiederkehrperioden von 50, 100 und 300 Jahren vor (siehe Hagelregister der Schweiz. URL: [www.hagelregister.ch](http://www.hagelregister.ch)). Beispielsweise ist in der Nord- und der Zentralschweiz im statistischen Mittel alle 50 Jahre mit einem Hagelkorndurchmesser von 3 cm und alle 100 Jahre mit einem Hagelkorndurchmesser von 4 cm zu rechnen. Diese Ergebnisse lassen sich näherungsweise auf Deutschland übertragen. So ist in Süddeutschland und insbesondere in den stark gefährdeten Gebieten südlich von Stuttgart und München ungefähr von der gleichen Gefährdung wie in der Nordschweiz auszugehen, während in Norddeutschland aktuell alle 50 Jahre nur mit Hagelkörnern des Durchmessers 1 cm zu rechnen ist (Fahrion et al. 2012: 38 f.).

Von Hagel können prinzipiell nur Bauteilschichten direkt betroffen sein, die der Witterung unmittelbar ausgesetzt sind. Besonders gefährdet sind die folgenden Bauteile (von hoher Sensitivität zu niedriger)

- Außenjalousien und Rollläden
- Lichtkuppeln
- Dach
- Fassade
  
- Photovoltaik Module
- Solarthermische Kollektoren

Werden äußere Bauteilschichten beschädigt, die dem Schutz gegen Niederschlagswasser dienen, besteht die Gefahr hoher Folgeschäden, insbesondere wenn der Ausgangsschaden unentdeckt bleibt. Dringt durch eine undicht gewordene Stelle der Gebäudehülle über längere Zeit Niederschlagswasser ein, dann können die dahinterliegenden Bauteilschichten durch eindringendes Regenwasser beschädigt werden. Der entstehende Feuchteschaden kann den Ursprungsschaden bei weitem übertreffen.

In Deutschland existiert keine produktübergreifende Norm zur Prüfung von Bauteilen gegen Hagelschlag. In der Planungspraxis wird die Einwirkung Hagel bisher kaum berücksichtigt. Eine planmäßige Bemessung von Bauteilen gegenüber der Einwirkung Hagel bzw. eine Nachweisführung zum Hagelwiderstand der Außenbauteile oder zur Schadenprävention ist nicht vorgeschrieben und es ist auch keine standardisierte, einheitliche Vorgehensweise etabliert. Dementsprechend ist es dem Bauherrn zu empfehlen, von den beauftragten Planern entsprechende Betrachtungen einzufordern.

Demgegenüber hat die Vereinigung Kantonaler Gebäudeversicherungen einheitliche, produktneutrale Prüfbestimmungen für die Ermittlung des Hagelwiderstandes entwickelt. Die Allgemeinen Prüfbestimmungen werden durch bauteilspezifische Bestimmungen für 35 verschiedene Bauteile ergänzt. In den bauteilspezifischen Prüfbestimmungen werden insbesondere Vorgaben zum Versuchsaufbau, zur Vorlagerung, Vorbehandlung und den Beschussorten sowie Beschusswinkeln der Probekörper gemacht. Die Prüfungen erfolgen prinzipiell mit künstlich hergestellten Kugeln oder Spezialprojektilen aus Laboreis. Der minimale Durchmesser der Laboreiskugel beträgt 10 mm und kann in 10 mm-Schritten vergrößert werden, bis zu einem maximalen Durchmesser der Laboreiskugel von 80 mm. Für jede Größe von Laboreiskugel sind Grenzwerte für die Masse, für die Beschussgeschwindigkeit entsprechend der zu erwartenden Geschwindigkeit beim freien Fall und für die kinetische Energie beim Aufprall vorgegeben. Diese Randbedingungen müssen für eine konforme Prüfung eingehalten werden.

Die größtmögliche Eiskugel, bei der das untersuchte Bauteil schadenfrei bleibt, definiert die zugehörige Hagelwiderstandsklasse. Beispielsweise übersteht ein Bauteil der Hagelwiderstandsklasse HW 3 den Aufprall eines Hagelkorns mit einem Durchmesser von 30 mm unbeschadet. Nach den aktuellen VKF Prüfbestimmungen existieren nur die Hagelwiderstandsklassen HW 1 bis HW 5. Wird ein Bauteil zusätzlich mit größeren Projektilen der Durchmesser 60 mm, 70 mm und 80 mm erfolgreich geprüft, kann dies auf dem Anerkennungsdokument vermerkt werden, das Produkt fällt jedoch offiziell in die Hagelwiderstandsklasse HW 5. Die Ergebnisse der Hagelwiderstandsprüfungen und die zugehörigen Anerkennungen sind auf der Internetseite des Hagelregisters öffentlich zugänglich (URL: [www.hagelregister.ch](http://www.hagelregister.ch)). Dadurch ist es Bauherren und Planern möglich sich über hagelgeprüfte Bauteile und deren Widerstandsfähigkeit zu informieren. Viele auf dem Markt erhältliche Produkte sind jedoch keinen Hagelprüfungen unterzogen.

## 6.2. Außenjalousien und Rollläden

Im Regelfall weisen Außenjalousien und Rollläden ohne spezielle Hagelprüfung einen Hagelwiderstand von HW 1 auf. Das bedeutet ein Hagelkorn mit einem Durchmesser von 1 cm führt noch zu keinem Schaden. Darüber ist zunächst mit optischen Beeinträchtigungen durch Dellen bis hin zum Funktionsausfall zu rechnen. Heutzutage übliche 4 mm dicke Floatglasscheiben, aus denen Mehrscheiben-Isolierverglasungen für Neubauten hergestellt werden, haben einen Hagelwiderstand von HW5. Wird für die äußere Scheibe der Isolierverglasung ein 6 mm dickes Floatglas verwendet, führt sogar der Aufprall eines Hagelkorns mit 8 cm Durchmesser zu keinem Schaden. Somit sind in aller Regel außenliegende Sonnenschutzsysteme und Rollläden wesentlich schadenanfälliger als die dahinterliegenden Verglasungen. Das bedeutet, im Falle eines Unwetters sollten die schadenanfälligeren Außenjalousien und Rollläden unbedingt eingefahren und somit der möglichen Hageleinwirkung entzogen werden.

Um auch tagsüber bei Abwesenheit der Nutzer eine Aufheizung des Gebäudes durch die Sonneneinstrahlung über Fensterflächen zu vermeiden, sollten außenliegende Sonnenschutzsysteme oder Rollläden geschlossen werden. Hierbei besteht allerdings die Gefahr eines Schadens durch Hagel oder Wind. Aus diesem Grund ist eine Automatisierung über Windsensoren empfehlenswert. Dies ist eine Maßnahme, die für drei Einwirkungen Vorteile bietet: Sommerhitze, Wind und Hagel. Da starke Hagelereignisse mit heftigen Gewittern einhergehen ist mit entsprechenden Windböen zu rechnen. Wurden windstabile Außenjalousien gewählt und dementsprechend hohe Windgrenzwerte programmiert, empfiehlt sich eine Kombination mit Strahlungs- oder Regensensoren. Entsprechende Sensoren werden in der Regel keinen Hagelprüfungen unterzogen. Deshalb sollten die Sensoren an Stellen montiert werden, die leicht zugänglich sind. Dies ermöglicht eine einfache Sichtprüfung im Anschluss an Hagelereignisse sowie unkomplizierte Wartungsarbeiten. Die verschiedenen Anpassungsstrategien für den außenliegenden Sonnenschutz sind in der Tabelle 3 dargestellt.

## 6.3. Dach und Dachaufbauten

Dachflächen, Oberlichter und Lichtkuppeln sind die Bauteile eines Gebäudes, die der Einwirkung Hagel am stärksten ausgesetzt sind. Zudem führt ein Schaden an diesen Bauteilen durch ein Hagelereignis je nach Reaktionszeit zu erheblichen Folgeschäden infolge des Regenwassereintrags. Steildächer werden im Wohnungsbau in der Regel mit Dachziegeln oder Betondachsteinen gedeckt. Im Hagelregister sind zahlreiche Dachziegel und Betondachsteine gelistet, die einen Hagelwiderstand von HW 4 oder höher erreichen. Es existieren sogar Produkte, die erfolgreich mit Eiskugeln mit einem Durchmesser von 6 cm getestet wurden. Die Hagelwiderstandsprüfungen von Dachziegeln und Dachsteinen werden in der Regel mit und ohne Sturmklammern durchgeführt, so dass der ermittelte Hagelwiderstand unabhängig von der Verwendung von Sturmklammern gültig ist. Damit ist eine Anpassung an zwei Klimaeinwirkungen gleichzeitig möglich.

Lichtkuppeln und Lichtbänder sind bei Flachdächern eine häufig genutzte Möglichkeit, um die Tageslichtverfügbarkeit im Gebäudeinneren zu erhöhen. Sowohl für Lichtkuppeln als auch für Lichtbänder sind im Hagelregister Bauteile mit der Hagelwiderstandsklasse HW5 verfügbar. Je nach Hagelgefährdung können daher entsprechende Bauteile verwendet werden. Unterschiede liegen im verwendeten Material und der Materialdicke. Polycarbonat weist im Allgemeinen eine höhere Hagelwiderstandsfähigkeit auf als Polymethylmethacrylat (Acrylglas), allerdings ist bei der Montage mit höheren Kosten zu rechnen. Weiterhin kann über eine Erhöhung der Schichtdicke oder eine erhöhte Schichtanzahl die Hagelwiderstandsfähigkeit verbessert werden. Analog dazu sind Lichtbänder zu betrachten. Mit zunehmendem Alter und UV-Einstrahlung unterliegen Kunststoffe in der Regel einer Versprödung. Die Hersteller von Kunststofflichtkuppeln mit hoher Hagelwiderstandsklasse treffen keine Aussage zum erreichten Hagelwiderstand nach mehrjähriger Bewitterung. Unter Umständen ist bezüglich der Langzeitstabilität die Verwendung von Glasoberlichtern, bei denen die obere Verglasungsebene aus Einscheibensicherheitsglas (ESG) oder Verbundsicherheitsglas (VSG) besteht, zu bevorzugen. Durch ein speziell konstruiertes Hagelnetz können die Lichtkuppeln der Einwirkung Hagel entzogen werden. Dies ist in der Tabelle 3 dargestellt.

Bei Flachdächern gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten, um auf die Gefährdung durch die Einwirkung Hagel zu reagieren. Von entscheidender Bedeutung ist es die Abdichtungsebene des Flachdachs schadensfrei zu halten. Dabei existieren zwei grundsätzliche Varianten, die in der Tabelle 3 dargestellt sind. Zum einen kann eine freiliegende Dachabdichtung mit hoher Hagelwiderstandsklasse verwendet werden, zum anderen kann die Abdichtungsebene der Einwirkung entzogen werden, indem sie unter Schutzschichten angeordnet wird. Bei einem Warmdach mit freiliegender Abdichtungsbahn ist die Anzahl der konstruktiven Schichten auf das absolut notwendige Minimum reduziert. Dadurch wird die Auflast auf das Tragwerk gering gehalten und dieses kann kleiner dimensioniert werden. Ein geringer Materialbedarf beim Tragwerk und beim konstruktiven Aufbau wirkt sich in Verbindung mit der Wahl ökologischer Baustoffe positiv auf die Ökobilanz des Bauteils Flachdach aus. Dies ist auch im Sinne des sparsamen Umgangs mit natürlichen Ressourcen ein wesentlicher Vorteil.

Zwar existiert wie bereits erwähnt in Deutschland keine produktübergreifende Norm, um die Hagelwiderstandsfähigkeit von Bauteilen festzustellen. Für Dachabdichtungsbahnen kann allerdings über die europäische Norm DIN EN 13583:2012-10 über eine Produktprüfung auf eine Schädigungsgeschwindigkeit geschlossen werden. Die Schädigungsgeschwindigkeit gibt an, ab welcher Geschwindigkeit mindestens einer von fünf Prüfgeschossen zur Schädigung am Prüfkörper geführt hat. Über die Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen kann jedes geprüfte Bauteil einer bestimmten Hagelwiderstandsklasse zugeordnet werden. Das bedeutet auch ohne VKF Hagelwiderstandsprüfung kann bei Abdichtungsbahnen, Photovoltaikmodulen und thermischen Sonnenkollektoren von den europäischen bzw. internationalen Normprüfungen auf eine Hagelwiderstandsklasse – die mindestens eingehalten wird – geschlossen werden.

Es existieren Polymerbitumenbahnen und Kunststoffdachbahnen für Flachdächer, die die höchste Hagelwiderstandsklasse 5 erfüllen. Die Wahl der Oberflächenfarbe der freiliegenden Abdichtungsbahn ist von entscheidender Bedeutung, um zusätzliche Klima- und Umweltpotentiale generieren zu können. Die Oberflächenfarbe wirkt sich in mehrfacher Hinsicht auf den thermischen und visuellen Komfort aus. Eine dunkle Oberfläche führt zu wesentlich höheren Temperaturen auf der Dachoberfläche, da mehr Solarstrahlung absorbiert wird. Dies hat sowohl Auswirkungen auf die Innenraumtemperaturen der darunterliegenden Räume und damit auf den Komfort im Sommer als auch auf die Lufttemperaturen in unmittelbarer Umgebung und somit auf das Mikroklima.

Demgegenüber führt eine helle Oberfläche zu einer stärkeren Reflexion und damit niedrigeren Oberflächentemperaturen. Durch die erhöhte Reflexion auf der Dachoberfläche kann es allerdings bei zurückgesetzten Staffelgeschossen zu Blendung in den Innenräumen kommen. Im Falle der Musterliegenschaft wären die Innenräume des 1. Obergeschosses einer erhöhten Blendgefahr ausgesetzt, wenn die Dachoberflächen über dem Erdgeschoss mit hellen Dachbahnen ausgeführt wären. Dieses Beispiel zeigt zudem die Beeinflussung der Anpassungsmaßnahmen an die einzelnen Klimaeinwirkungen auf. Anstelle einer besonders hagelwiderstandsfähigen Dachabdichtungsbahn kann auch ein Oberflächenschutz beispielsweise aus Kies vorgesehen werden. Dadurch wird auf einfache Art und Weise die Dachdichtungsbahn der Einwirkung Hagel entzogen. Die Auswahl der Dachoberfläche hat auch Einfluss auf andere Klimaeinwirkungen. Der Einfluss auf das thermische Innenraumklima und das Mikroklima in der Umgebung eines Gebäudes wird ausführlich in Kapitel 3 behandelt.

#### 6.4. Fassade

Außenwandkonstruktionen im Massivbau werden heutzutage sehr häufig mit Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) ausgestattet. Auf dem Markt sind Wärmedämmverbundsysteme aus verschiedenen Dämmmaterialien erhältlich, die sehr hohe Hagelwiderstandsklassen erreichen (Tabelle 2). Die Mehrzahl der geprüften Systeme basiert auf nicht nachwachsenden Rohstoffen. Es existiert lediglich ein geprüftes System das den Dämmstoff Hanf verwendet und zwei Systeme die auf Holzfasern basieren. Folglich lässt sich mit Wärmedämmverbundsystemen eine hinsichtlich der Klimaeinwirkung Hagel angepasste Bauweise realisieren. Ein besonderes Problem bei der Verwendung von Wärmedämmverbundsystemen stellt das Recycling dar. Da die stofflich sehr unterschiedlichen Komponenten eines WDVS einen festen Verbund untereinander eingehen, ist eine sortenreine Trennung nur schwer möglich. Es existieren Ansätze zur Trennung der Komponenten, diese befinden sich aber noch im Forschungsstadium. Der standardmäßige Verwertungsweg von Wärmedämmverbundsystemen ist aktuell die energetische Verwertung in kommunalen Müllverbrennungsanlagen (Albrecht/Schwitalla 2015: 81). Das Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, Abfälle als Sekundärrohstoff in den Produktionskreislauf zurückzuführen und wieder dasselbe Material in der ursprünglichen Qualität daraus herzustellen. Dadurch sollen die in begrenzter Menge verfügbaren Primärrohstoffe geschützt und Energie zu deren Aufbereitung eingespart werden.

Tabelle 2: Im Hagelregister enthaltene WDVS-Systeme mit in Abhängigkeit des Dämmmaterials erzielten Hagelwiderstandsklassen (Stand August 2019)

Dämmmaterial	HW2	(HW3)	HW4	HW5
EPS	X	X	X	X
Mineralwolle		X	X	X
Mineralschaum		X		
PIR		X		
Hanf			X	
Holzfaser		X		

Ein Fassadensystem, das eine sortenreine Trennung der eingesetzten Komponenten ermöglicht, ist die vorgehängte hinterlüftete Fassade (Abbildung 22). Sie besteht aus der tragenden Außenwand einer Unterkonstruktion, Wärmedämmung, einem Hinterlüftungsspalt sowie einer meist plattenförmigen Bekleidung. Die Unterkonstruktion wird entweder aus Metall oder aus Holz hergestellt. Aber auch Kombinationen aus beiden Materialien sind möglich und üblich. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Wärmedämmung durch Dämmstoffhalter an der tragenden Außenwand befestigt wird und nicht durch Klebverfahren. Dies sichert die sortenreine Trennung und verhindert Kleberückstände an den Oberflächen.

Als Bekleidungselemente kommen die unterschiedlichsten Materialien zum Einsatz, so dass eine große Bandbreite hinsichtlich der Gestaltung aber auch des Hagelwiderstands existiert. Die unterschiedlichen Strategien sind ebenso in der Tabelle 3 dargestellt. Die vorgehängte hinterlüftete Fassade wirkt sich neben dem positiven Einfluss gegenüber der Einwirkung Hagel auch positiv auf die Einwirkungen Hochwasser und Hitze aus. Bei Hochwasser kann die Fassade bereits vor Eintreffen der Flut rückgebaut werden und somit der möglichen Gefährdung durch Schwemmstoffe oder mechanische Beschädigung entzogen werden. Zudem kann auch eine Art Opferschicht als Dämmstoff verwendet werden, die im Fall der Durchfeuchtung leicht zurückgebaut werden kann. Bei der Einwirkungen Hitze wird durch die Hinterlüftung anstehende Hitze nach oben abgeführt. Dies führt zu einer Kühlung der Oberflächentemperatur des Bauteils.

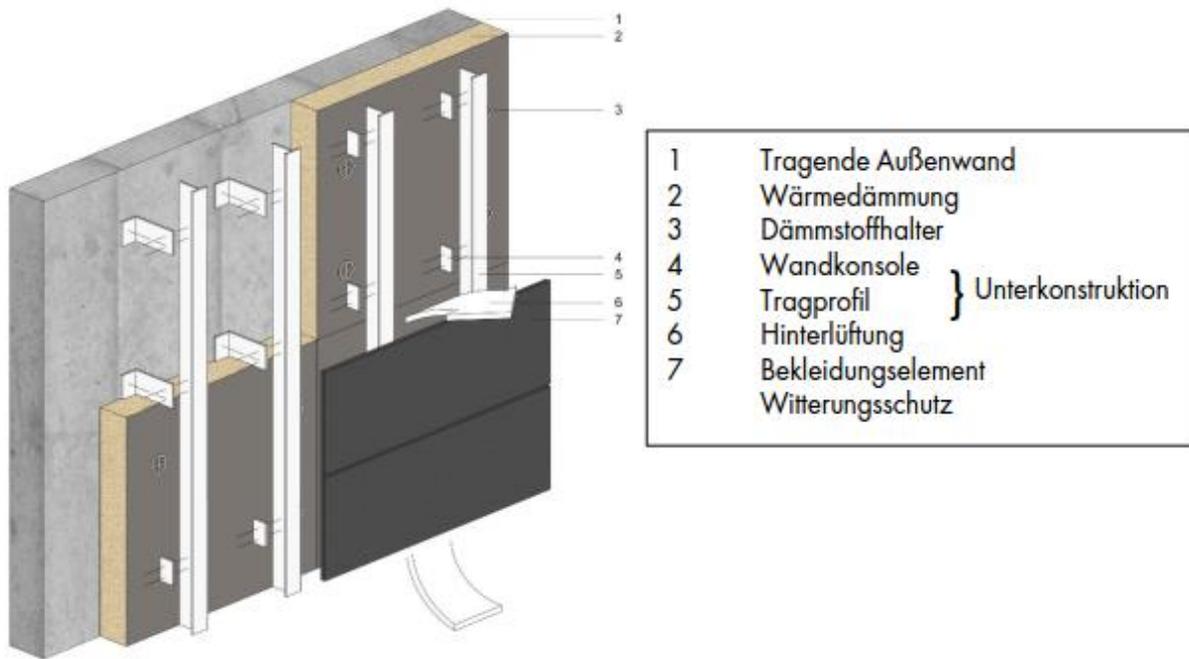


Abbildung 22: Prinzipieller Aufbau einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade

Für den Hagelwiderstand ist die Wahl des Materials der Fassade entscheidend, da die dahinterliegenden Schichten der Hageleinwirkung vollständig entzogen sind.

- Holz
- Holzwerkstoffe
- Faserzement
- Faserbeton
- Metall
- Keramik
- Glas
- Betonwerkstein
- Naturwerkstein
- Photovoltaik/Solarthermie

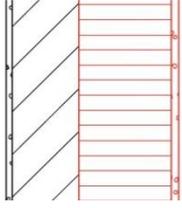
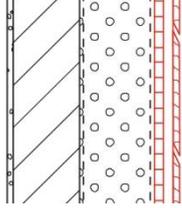
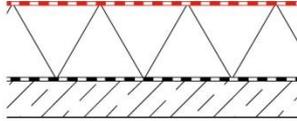
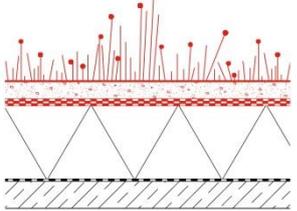
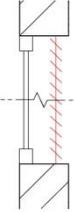
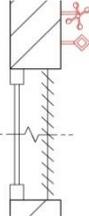
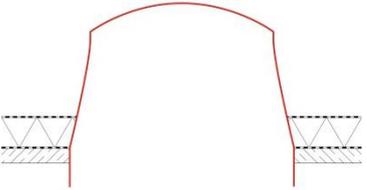
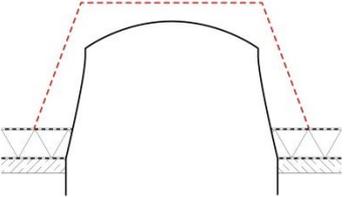
## 6.5. PV-Anlagen und Solarkollektoren

Nach internationalen Normen geprüfte Photovoltaikmodule und Thermische Sonnenkollektoren können über den VKF Beschluss Nr. B ohne zusätzliche Prüfung einer Hagelwiderstandsklasse zugeordnet werden, die sie mindestens erfüllen. Hageltests für Photovoltaikmodule sind durch die internationale Norm DIN EN IEC 61215-2:2019-06 geregelt. Die Prüfung erfolgt mit künstlich hergestellten Eiskugeln. Der Durchmesser der Eiskugeln kann variiert werden, als Normdurchmesser sind jedoch 25 mm festgelegt. Durch den VKF Beschluss Nr. B (VKF 2018) werden nach IEC geprüfte Photovoltaikmodule einer VKF Hagelwiderstandsklasse zugeordnet. Der VKF Beschluss Nr. B ist im Internet frei erhältlich (URL: <https://www.hagelregister.ch/fachinfos-bauteile/pruefbestimmungen/vkf-pruefbestimmungen.html>). Demnach werden PV-Module mit einer Abdeckung aus einem mindestens 3 mm dicken Einscheibensicherheitsglas (ESG) und bestandener Hagelprüfung nach IEC der Hagelwiderstandsklasse HW 3 zugeordnet.

Durch die CE-Kennzeichnung von Photovoltaikmodulen bestätigt der Hersteller eines Photovoltaikmoduls, dass sein Produkt den geltenden Anforderungen genügt, die in den europäischen harmonisierten Rechtsvorschriften festgelegt sind. Bei der DIN EN IEC 61215-2:2019-06 handelt es sich um eine harmonisierte Norm, so dass jedes mit einem CE-Kennzeichen versehene Photovoltaikmodul den Aufprall eines Hagelkorns mit einem Durchmesser von mindestens 2,5 cm schadlos überstehen muss. Es ist empfehlenswert, die entsprechende Konformitätserklärung des Herstellers diesbezüglich zu prüfen. Eventuell liegen den Herstellern auch Prüfergebnisse für größere Hagelkorndurchmesser vor und es kann ein höherer Hagelwiderstand auf Nachfrage gewährleistet werden.

Thermische Flachkollektoren mit einer Abdeckung aus einem mindestens 3 mm dicken Einscheibensicherheitsglas (ESG) werden der VKF Hagelwiderstandsklasse HW 3 zugeordnet. Thermische Röhrenkollektoren, die nach DIN EN ISO 9806:2018-04 mittels Eiskugeln oder Stahlkugeln geprüft wurden, können entsprechend des VKF Beschluss Nr. B maximal der Hagelwiderstandsklasse HW 3 zugeordnet werden.

Tabelle 3: Schutzstrategien der Gebäudehülle gegenüber Hagel

Bauteil	Hagelwiderstandsklasse erhöhen	Zusätzlicher Schutz
<p>Fassade</p>		
<p>Dach</p>		
<p>Sonnenschutz</p>		
<p>Lichtkuppel</p>		

## 7. Wind

### 7.1. Grundlagen

In ausführlichen Klimastudien mit detaillierten Klimamodellen, die z.B. vom Max-Planck-Institut für Meteorologie zusammen mit dem Deutschen Wetterdienst durchgeführt wurden, zeigten sich trotz steigender Treibhausgasemissionen in der Atmosphäre keine klaren Tendenzen einer Erhöhung der mittleren Windgeschwindigkeiten. Wenn überhaupt, dann konnte eine Erhöhung um 0,20 m/s beobachtet werden, was weit unterhalb der natürlichen jährlichen Schwankung von ca. 5,0 m/s liegt. Auch die Zahl der Sturmergebnisse hat sich in den Simulationsmodellen nicht signifikant geändert. Die in den letzten 30 Jahren beobachtete Zahl der schweren Stürme über dem Nordatlantik hat sich zwar deutlich erhöht, gleichzeitig ist aber die mittlere Windgeschwindigkeit in der Deutschen Bucht um ca. 5 % zurückgegangen. Auch über der Nordsee war in den letzten Jahrzehnten keine signifikante Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit zu beobachten. Da aber die mittlere Luftfeuchtigkeit in den letzten Jahrzehnten um deutlich über 1 % gestiegen ist, könnten die dann auftretenden Stürme zukünftig stärker sein, da Stürme bei höherer Luftfeuchte intensiver ausfallen.



Windzone	Basiswindgeschwindigkeit $v_b$ in m/s	Basisgeschwindigkeitsdruck $q_b$ in kN/m <sup>2</sup>
1	22,5	0,32
2	25,0	0,39
3	27,5	0,47
4	30,0	0,56

Abbildung 23: Windzonenkarte in Anlehnung an DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12. Maßgebend für die Anwendung ist die entsprechende DIN-Norm in der Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum

Die Zahl der Tornados in Deutschland ist derzeit mit ca. 100 bis 200 Stück (inklusive kleinerer Ereignisse) anzunehmen, eine eindeutige und klare Zunahme dieser Ereignisse zeichnet sich aber derzeit nicht ab. Erschwert wird eine Aussage über die projizierte Entwicklung der Spitzenwindgeschwindigkeit aufgrund des sehr lokalen Auftretens von Windböen. Durch die Kleinräumigkeit können Klimamodelle das Auftreten von Böen nicht simulieren, da ihre zeitliche und räumliche Auflösung zu groß ist. Zusammengefasst ist keine klare Tendenz zur Erhöhung der mittleren Bemessungswindgeschwindigkeiten im mitteleuropäischen Raum infolge des Klimawandels erkennbar. Trotzdem kann mit einfachen Maßnahmen die Beanspruchung von Gebäuden beim Sturmereignissen reduziert werden. Obwohl also keine klare Tendenz einer Erhöhung der mittleren Bemessungswindgeschwindigkeiten im mitteleuropäischen Raum infolge eines Klimawandels erkennbar ist, ist doch mit verstärkten lokalen unwetterartigen Stürmen bzw. Gewitterstürmen vermehrt zu rechnen.

Die Reaktion auf die Einwirkung Wind ist im Wesentlichen eine statische Bemessung gegen Winddruck und Windsog. Angaben über die Windgeschwindigkeiten und den Winddruck finden sich in der DIN EN 1991-1-4:2010-12 inklusive des Nationalen Anhangs. In Abbildung 23 ist die Windzonenkarte abgebildet, an der für jeden Standort die entsprechenden Windgeschwindigkeiten und -drücke aufgezeigt werden. Eine Anpassung an den Klimawandel wird für Wind aufgrund der unklaren Änderungssignale nicht berücksichtigt.

Von der Einwirkung Wind sind folgende Bauteile betroffen (von hoher Sensitivität zu niedriger)

- Lamellenjalousien
- Dachaufbauten
- Dach
- Fassade

## 7.2. Lamellenjalousien

Lamellenjalousien sind gegenüber Wind sehr empfindlich. Durch Windsensoren können die Jalousien so gesteuert werden, dass sie bei Erreichen eines vordefinierten Grenzwertes der Windgeschwindigkeit eingefahren werden. Dadurch wird einer Beschädigung vorgebeugt. Windsensoren sind auch geeignet, um Lamellenjalousien vor der Einwirkung Hagel zu schützen. In windreichen Regionen oder bei hohen Gebäuden können windstabile Jalousien verwendet werden. Dadurch werden ebenso die Einwirkung Hitze und der sommerliche Wärmeschutz positiv beeinflusst. Insbesondere ist es wichtig zu beachten, ob im Falle eines windbedingten Einfahrens der Jalousien alternative Konzepte zum sommerlichen und winterlichen Wärmeschutz vorgesehen sind. Eine Möglichkeit sind innenliegende Sonnenschutzvorrichtungen.

## 7.3. Dachaufbauten

Gefährdet sind weiterhin Dachaufbauten wie beispielsweise PV-Anlagen oder Sonnenkollektoren. Sind diese nicht ausreichend befestigt, können sie im schlimmsten Fall durch die Luft gewirbelt werden und schwerere Gebäude- oder Personenschäden verursachen. Die Sicherung der PV-Anlagen ist ein wesentlicher Bestandteil der Planung und berücksichtigt insbesondere die abhebenden Windsogkräfte nach DIN EN 1991-1-4:2010-12. Im Vorfeld der Planung muss die Anzahl an benötigten PV-Modulen, deren Anordnung sowie die Art der Befestigung festgelegt werden. Die Befestigung kann zum einen mechanisch über eine Verankerung am Tragwerk oder über eine Ballastierung erfolgen. Als Unterstützung oder Alternative für diese Ballastierung kann z.B. eine Seilsicherung dienen, die zwischen den Attiken oberhalb der Dichtebene verspannt wird und an die alle PV-Elemente verankert werden (Abbildung 24 oben).

Zur Reduzierung der statischen Belastung des Tragwerks kann z.B. bei einem Gründach das Gewicht des ohnehin vorhandenen Substrats als Ballastierung verwendet werden. Dies ist möglich durch statisch tragende Plattenelemente, die mit den PV-Modulen verbunden werden und so den Lastabtrag ermöglichen (Abbildung 24 unten). Häufig wird die Ballastierung einer mechanischen Befestigung in der Deckenkonstruktion vorgezogen, um eine Beschädigung der Abdichtungsebene auf dem Dach zu verhindern.

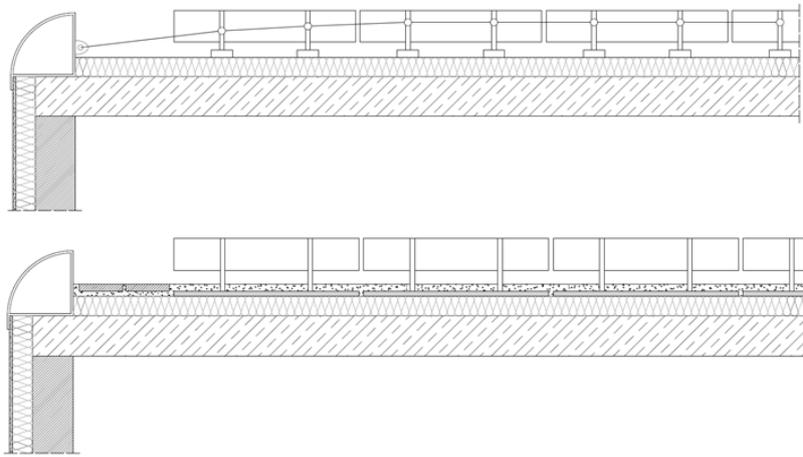


Abbildung 24: Zusätzliche Sicherung der PV-Anlagen über Seilnetz (oben) und Substrat (unten)

Wird durch eine geschickte Anordnung oder Verkleidung der Module die Windangriffsfläche reduziert, kann die Windsogbeanspruchung reduziert werden. Dadurch sind weniger mechanische Befestigungspunkte oder eine geringere Ballastierung ausreichend. Eine deutliche Verbesserung lässt sich mit an die Traggestelle der PV-Module angeschlossenen Rücken- und Seitenschilden erreichen. Dadurch wird verhindert, dass der Wind unter die Photovoltaikmodule gelangt. Zudem kann sogar durch einen Wind-Düseneffekt ein leicht stabilisierender Unterdruck unterhalb der Module erzeugt werden. In Abbildung 25 wird am Beispiel von aufgeständerten PV-Anlagen gezeigt, wie die Gestaltung der Aufständerung Einfluss auf die Windsogkräfte hat. Besonders kritisch sind Anordnungen von Solarthermiekollektoren zu sehen, die meist einen relativ steilen Aufstellwinkel besitzen, um eine bessere Warmwassererzeugung in Winterzeiten zu erreichen. Solarthermieanlagen arbeiten am effizientesten, wenn die Sonne in einem möglichst senkrechten Winkel auf die Anlagen trifft. Je flacher die Sonne aufgrund der Erdneigung im Winter steht, umso geringer ist bei Dächern mit geringer Neigung und nicht aufgeständerten Modulen der Ertrag. Durch den Aufstellwinkel kann der Ertrag erhöht werden. Hierfür sind hohe Ballastierungen oder andere Befestigungsmöglichkeiten vorzusehen.

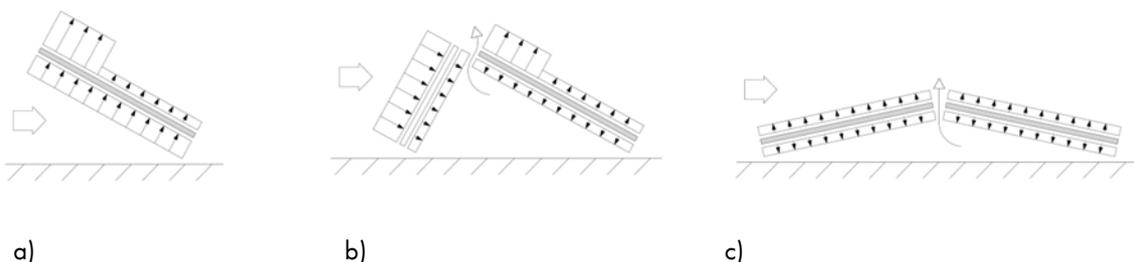


Abbildung 25: Einwirkung von Windkräften auf einem Flachdach aufgeständerte PV-Module

- a) Hinten offenes PV-Modul mit abhebenden Sog- und Druckkräften
- b) PV-Modul mit Rückenschild mit deutlich geringeren abhebenden Sogkräften. Durch das Rückenschild wirken zudem nach unten gerichtete Sogkräfte, die das System stabilisieren
- c) PV-Modul bei einer flachen Ost-West Aufständerung

Die geringsten Sogbeanspruchungen ergeben sich für die flachen, meist mit ca. 10 ° geneigten PV-Module in einer Ost-West-Aufständerung. Zwar ist der Gesamtertrag pro Modul bei dieser Aufständerung geringer als bei einer Südaufständerung, dafür ist die Ausnutzung der Dachfläche meist besser. Bei einer Ost-West-Aufständerung mit flacher Neigung kann das Dach fast vollständig mit PV-Modulen belegt werden, da es zu keinen Verschattungseffekten zwischen den Modulen kommt. Es sind nur Wartungsgänge einzuplanen. Bei einer reinen Südaufständerung sind zwischen den einzelnen Reihen Abstände vorzusehen, damit sich die einzelnen Module nicht gegenseitig verschatten.

#### **7.4. Dach und Fassade**

Neben der Verringerung der Windkräfte aufgrund der Wahl der Aufständerung können sich durch eine entsprechende Gestaltung des Dachbereichs die Soglasten z.B. bei Flachdächern nennenswert reduzieren. Die Norm DIN EN 1991-1-4:2010-12 zeigt dazu Möglichkeiten auf. Insbesondere die Eck- und Randbereiche von Flachdächern sind einer sehr hohen Windsogbeanspruchung infolge von Windböen ausgesetzt. Für die statische Auslegung der Dachbeläge (z.B. Gehwegplatten oder Kiesschüttungen) oder PV-Anlagen sind diese Sogbeanspruchungen zu beachten. Dies ist oftmals mit großen zusätzlichen Massen z.B. für die Ballastierung von PV-Anlagen verbunden.

In Abbildung 26 wird exemplarisch anhand der geometrischen Gestaltung der Attika im Dachrandbereich (Traufbereich) gezeigt, wie solche deutlichen Reduzierungen der Soglasten erreicht werden können. Dabei wird ein Gebäude mit quadratischem Grundriss der Abmessung 10 m x 10 m und einer Höhe von 6 m angesetzt. Dies entspricht ungefähr den Abmessungen des Dachs über dem 1. Obergeschoss der Musterliegenschaft. Bemerkenswert ist dabei, dass z.B. eine gerundete Attika auf einem Großteil der Dachfläche hinter dem eigentlichen Randbereich (Breite hier ca. 1,0 m) zu einer mehr als 50%igen Reduzierung der Sogbeanspruchung führt. Dies ist auf die glattere, weniger verwirbelte Überströmung der Dachfläche zurückzuführen.

In Abbildung 27 wird exemplarisch skizziert, wie eine solche gerundete Attika z.B. mit Hilfe eines im Rohbau verankerten Fertigteils ausgebildet werden kann. Dabei wird ein Gründach mit einer flachen, etwas nach innen versetzten Ost-West Aufständerung einer PV-Anlage gezeigt. Der Hohlraum des Attika-Fertigteils kann zudem für die Führung von Kabeln oder Rohren verwendet werden. Dieser muss zudem gedämmt werden, um eine durchgehende Wärmedämmschicht zu gewährleisten.

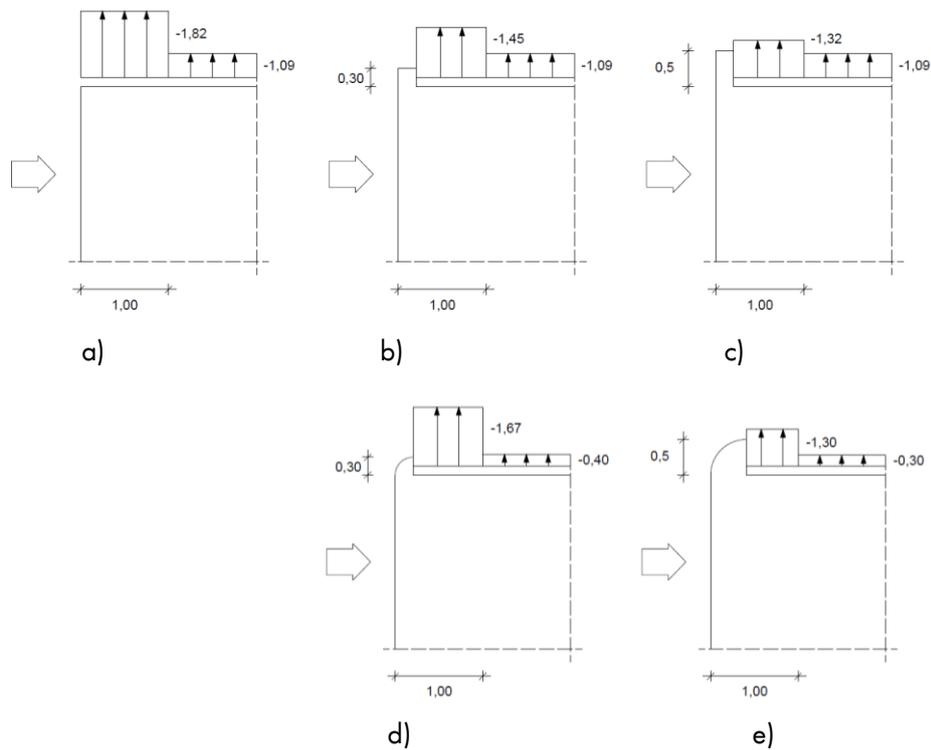


Abbildung 26: Einfluss der Gestaltung des Traufbereiches auf die Windsoglasten von Flachdächern (Sogbeiwerte gemäß DIN EN 1991-1-4)

- a) Scharfe Traufkante ohne Attika
- b), c) Traufkante mit niedriger bzw. hoher eckiger Attika
- d), e) Traufkante mit niedriger bzw. hoher runder Attika

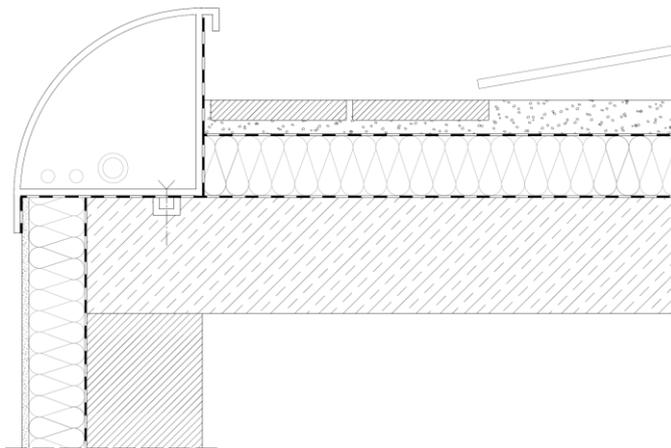


Abbildung 27: Mögliche Gestaltung eines abgerundeten Traufbereiches eines Gründaches mit Hilfe eines in der Tragstruktur verankerten Attika-Fertigteiles (schematisch)

Die in unseren Breitengraden übliche Dacheindeckung bei Satteldächern erfolgt durch Dachziegel, die überlappend auf Dachlatten aufgelegt werden und durch ihr Eigengewicht die lokalen Windsogkräfte entgegenwirken. Zunehmend heutzutage auch Solar-Dachziegel angeboten, die eine ähnliche Optik zu Dachziegeln aufweisen und in einer ähnlichen Weise verlegt werden. Aufgrund vermehrter Schäden durch bei Sturm gelöster Dachziegel ist seit 2011 für Neubauten eine zusätzliche Sicherung der Dachziegel durch sogenannte Sturmhaken erforderlich, alte Dächer genießen Bestandsschutz. Die Sturmhaken greifen dabei jeweils in die Falze der Dachziegel ein und werden entweder unter die Dachlatten geklemmt oder in diese eingeschlagen. Die genaue Anzahl der Sturmhaken richtet sich nach der Sogbeanspruchung in den einzelnen Dachbereichen, im Mittel sind 3 bis 4 Sturmhaken pro m<sup>2</sup> erforderlich. Form und Anbringung der Sturmhaken sind dabei in DIN EN 14437:2005-02 geregelt. Wichtig ist, dass die Dachlatten, die durch die Sturmhaken nun zusätzlich auf Windsog beansprucht werden, auch mit entsprechender Sorgfalt, z.B. durch Verwendung geeigneter Schrauben oder Sondernägeln, an den Dachsparren befestigt werden und ausreichend dimensioniert werden.

Die Anpassung der Attika sowie die Sicherung der Dachaufbauten und der Dacheindeckung haben keinen Einfluss auf andere Klimaeinwirkungen. Ebenso werden keine relevanten zusätzlichen Klima- und Umweltpotentiale erschlossen. Möglich ist jedoch eine Reduktion der zur Ballastierung nötigen Gewichte oder der Verankerungen in der Tragstruktur. Dadurch wird weniger Material in der Deckenkonstruktion benötigt, was sich positiv auf das Ökobilanzergebnis auswirkt.

## 8. Biologische Vielfalt

### 8.1. Grundlagen

Der globale Zustandsbericht zur Biodiversität und Ökosystemdienstleistungen des Weltbiodiversitätsrates aus dem Jahr 2019 (Diaz et al. 2019) verdeutlicht den teils dramatischen Zustand der Ökosysteme. Von den geschätzten 8 Millionen Tier- und Pflanzenarten sind ungefähr 1 Million vom Aussterben bedroht. Als Hauptursache für die Bedrohung der Artenvielfalt an Land wurde der Verlust von Lebensräumen identifiziert, der auf Landnutzungsänderungen zurückzuführen ist. Aber auch die Umweltverschmutzung, gebietsfremde invasive Tier- und Pflanzenarten und der Klimawandel bedrohen die Biodiversität. Aktuell werden über 40 % der weltweiten Landfläche für die Landwirtschaft oder für Siedlungen genutzt. Nur noch 23 % der Landfläche und 13 % der Ozeane werden als Wildnis eingestuft (Ichii et al. 2019: 5).

Knapp 70 % aller in Deutschland bekannten Tierarten sind Insekten. Das Bundesamt für Naturschutz weist darauf hin, dass die Gesamtzahl der Insekten und die Insektenvielfalt in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten dramatisch abgenommen haben. Grundlage für diese Feststellung ist u.a. eine Analyse der Roten Listen gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. 45 % der in Deutschland untersuchten Insektenarten weisen einen langfristigen Abnahmetrend auf, während nur für 2 % eine langfristige Zunahme festgestellt werden konnte. Als wesentliche Ursachen für den Rückgang der Insekten werden der Verlust von Lebensräumen und die fehlende Vernetzung der verbleibenden Lebensräume identifiziert (Ries et al. 2019).

Im Rahmen einer Studie zur Bestandsentwicklung von Fluginsekten in deutschen Schutzgebieten wurde festgestellt, dass die Biomasse der fliegenden Insekten zwischen 1989 und 2016 im Mittel um 76 % zurückgegangen ist (Hallmann et al. 2017). Ungefähr 87,5 % der blühenden Wildpflanzen und mehr als 75 % der Nahrungspflanzen sind zumindest teilweise von der Bestäubung durch Tiere abhängig (Potts 2016) zudem sind 60 % aller Vögel auf Insekten als Nahrungsgrundlage angewiesen (Morse 1971). Darüber hinaus sind Insekten auch bei zahlreichen Amphibien, Reptilien und Säugetieren wesentlicher Nahrungsbestandteil. Dies verdeutlicht die enorme Bedeutung von Insekten für die Funktionsfähigkeit der Landwirtschaft und ganzer Ökosysteme.

Infobox 8: Biologische Fachbegriffe

**Neobiota** sind Arten, die sich erst durch den Einfluss des Menschen in einem Gebiet etabliert haben, in dem sie zuvor nicht vorgekommen sind. Gebietsfremde Pflanzen werden als **Neophyten** („Neu-Pflanzen“), und gebietsfremde Tiere als **Neozoen** („Neu-Tiere“) bezeichnet. Gebietsfremde Arten werden als **invasiv** bezeichnet, wenn sie mit einheimischen Arten in Konkurrenz um Lebensraum und Ressourcen treten und die einheimischen Arten verdrängen.

**Autochthone Art:** Einheimische Art, die entweder im aktuellen Vorkommensgebiet entstanden ist oder sich auf natürliche Weise ohne menschlichen Einfluss dorthin ausgebreitet hat.

**Trittsteinbiotop:** Biotop-Inseln, die Verbindungsstrukturen zwischen vollwertigen Lebensräumen schaffen. Sie ermöglichen den kurzfristigen Aufenthalt von Insekten und Tieren und unterstützen somit den Genaustausch zwischen räumlich getrennten Biotopen.

Ein einzelner Garten oder die Begrünung eines einzelnen Gebäudes sind von der Größe allein genommen nicht ausreichend, um einen selbstständig funktionsfähigen Lebensraum zu bilden. Allerdings kann die Gebäudebegrünung oder die biologisch optimierte Gestaltung einzelner Gartenflächen zu einer Vergrößerung von existierenden Lebensräumen führen oder als Trittsteinbiotop funktionieren. Durch Siedlungsräume werden bestehende Biotope häufig voneinander getrennt.

Die Wiederherstellung der Vernetzung bestehender Biotope im Umgebungsbereich von Siedlungsflächen über Trittsteinbiotope kann zu einem zusammenhängenden Netzwerk von miteinander kommunizierenden und sich gegenseitig stabilisierenden Biotopen führen. Somit kann jeder Einzelne einen kleinen Beitrag leisten, um die Lebensbedingungen für Pflanzen, Insekten und Kleintiere zu verbessern und dadurch wesentliche Lebensgrundlagen zu erhalten. Allerdings ist es dazu erforderlich zu wissen, welche Biotope sich in der Umgebung des jeweiligen Siedlungsbereichs befinden, um die Bepflanzung dahingehend anzupassen. In mitteleuropäischen Städten wird ein durchschnittlicher Anteil von ungefähr 40 % an nicht-einheimischen Arten am Gesamtartenbestand der höheren Pflanzen angegeben (Pysek 1998). Die Invasion durch Neophyten bedroht weltweit ökologische Gemeinschaften. Durch die Pflanzung von Neophyten werden Neozoen unterstützt, so dass sie in Konkurrenz zu den gebietsheimischen Tier- und Pflanzengemeinschaften treten.

Bei der Gebäudebegrünung und Außenanlagengestaltung wird aus praktischen oder ästhetischen Gründen auf bewährte Pflanzenarten zurückgegriffen, die allerdings häufig gebietsfremd sind. Beispielsweise werden für Hecken häufig immergrüne Pflanzen wie Lebensbäume (*Thuja*) oder Kirschlorbeer (*Prunus laurocerasus*) verwendet. Bei beiden Arten handelt es sich allerdings um Neophyten. Kirschlorbeer wird sogar als potentiell invasiv eingeschätzt. Bei extensiven Dachbegrünungen kommen vermehrt Vegetationsmatten zum Einsatz, die ausschließlich aus sehr hitze- und trockenresistenten Sedum-Arten bestehen. Einige Sedum-Arten sind in Deutschland einheimisch, die Großzahl der verwendeten Sedum-Arten ist allerdings gebietsfremd und einige sind sogar als invasiv bekannt. Durch die wiederholte und häufige Verwendung derselben Pflanzenarten für die Gestaltung von Hecken, Dachbegrünungen, etc. wird zudem die Pflanzenvielfalt extrem reduziert.

Nach dem Landesnaturschutzgesetz von Baden-Württemberg (BW 2015) ist für Baden-Württemberg bereits bei Saaten in der freien Landschaft nur noch Saatgut zu verwenden, das von Mutterpflanzen aus dem gleichen regionalen Herkunftsgebiet stammt. Entsprechend des BNatSchG dürfen ab dem 1. März 2020 in der gesamten Bundesrepublik nur noch autochthone Arten in der freien Natur ohne Genehmigungspflicht eingesetzt werden (BRD 2009: § 40). Diese Regelung wurde nicht für den besiedelten Bereich formuliert. Somit unterliegt das Ausbringen von gebietsfremden Arten im innerstädtischen und innerörtlichen Bereich sowie in Splittersiedlungen, Gebäuden zugeordneten Gärten und Wochenendhausgebieten im Außenbereich sowie Sportanlagen nicht der Genehmigungspflicht. Trotzdem sollte auch dort auf gebietsfremde Arten verzichtet werden. Die Verpflichtung, gebietseigene Pflanzen im besiedelten Bereich zu verwenden, ist auch schon teilweise in Stadtkonzepten verwirklicht, wie in der "Berliner Strategie zur Biologischen Vielfalt" (Kowarik/Bartz/Cloos 2012). Zum Thema gebietseigene Pflanzen wird dort im Ziel 16 angestrebt, auch innerhalb des bebauten Gebietes verstärkt zertifiziertes gebietseigenes Pflanzen- und Saatgut zu verwenden.

Es ist bekannt, dass bei Zuchtformen und Hybriden die Staubblätter, Nektarblätter und Fruchtblätter an den Blüten mit den fruchtbaren Abschnitten der Samenanlagen zu Gunsten der attraktiveren aber sterilen Kronen- und Kelchblätter reduziert werden. Das führt eventuell zu ästhetischeren Blütenformen, doch die Blüten werden unattraktiver für Tiere, da die Pollen- und Nektarproduktion geringer wird und sich gleichzeitig die Anzahl und Größe der Früchte reduziert.

Einige Zuchtformen sind sogar steril oder haben sogenannte gefüllte Blütenstände. Sie weisen daher keinen ökologischen Mehrwert (Pollenangebot, Nektarproduktion, Früchte) für Tiere auf und beeinflussen die Wechselbeziehungen mit Nahrungsnetzen (z.B. Futterpflanze für Insekten) negativ. Das Auswahlkriterium "Nektarproduktion" oder "Fruchtproduktion" wird erst seit wenigen Jahren, vor allem seitens des Umweltschutzes, adressiert. Von Seiten der Umweltschutzverbände (z.B. Netzwerk Blühende Landschaft; Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland) oder Ministerien (BMUB 2017) werden immer mehr Listen beispielsweise mit potentiellen Wildpflanzen als Nektar- und Pollenspender, Schmetterlingsstauden oder Vogelnährgehölze veröffentlicht. Aus den genannten Gründen sollte bei der Pflanzenauswahl auf Zuchtarten, gebietsfremde, potentiell invasive und invasive Arten sowie Neophyten verzichtet werden. Stattdessen empfiehlt sich die Verwendung regionaler, gebietsheimischer, autochthoner Wildarten. Dadurch werden die natürlichen, einheimischen Ökosysteme stabilisiert und die Gefahr der Verdrängung gebietsheimischer autochthoner Wildarten wird verringert.

Infobox 9: Datenbank und Homepages zur Unterscheidung gebietsheimische Wildarten und Neophyten

**Artenfilter Regiosaatgutarten**

URL: <http://sup05.umwelt.uni-hannover.de/artenfilter/index.php>

**Planungsdatenbank zu Gehölzen für urbane Räume**

URL: [www.citree.de](http://www.citree.de)

**FloraWeb – Daten und Informationen zu Wildpflanzen und zur Vegetation Deutschlands**

URL: [www.floraweb.de](http://www.floraweb.de)

**Neobiota – Gebietsfremde und invasive Arten in Deutschland**

URL: [www.neobiota.de](http://www.neobiota.de)

Bei der Auswahl von Pflanzen für die Begrünung von Außenanlagen und Gebäuden sollte zudem auf Vielfalt geachtet werden. Vielfältige Systeme z.B. durch Strukturvielfalt, Artenvielfalt, Wuchsformkombinationen, funktionelle Vielfalt führen meist zu stabileren, nachhaltigeren und ästhetischeren Systemen. Sie bieten ein Nahrungsangebot und Refugien für unterschiedlichste Insekten, Reptilien, Vögel und Wirbeltiere. Werden Pflanzen mit verschiedenen Blühzeiträumen gewählt, kann ein kontinuierliches, attraktives Blütenangebot über die gesamte Vegetationsperiode und damit ein durchgängiges Nahrungsangebot gewährleistet werden. Des Weiteren müssen bei der Pflanzenauswahl standortbedingt ökologische Faktoren berücksichtigt werden, wie beispielsweise die Standortgerechtigkeit (winterfest, wärmetolerant, schadstofftolerant,...), der Blühzeitraum, die Blütenfarbe, die Wuchshöhe, die Bestäubungsökologie (Wind-, Insekten-, Selbstbestäubung), aber auch zukünftige Klimafaktoren wie beispielsweise zunehmender Hitze- und Trockenstress.

Eine wohlüberlegte Pflanzenauswahl kann nicht nur zur Erhöhung der biologischen Vielfalt, sondern auch zur Reduktion der Luftbelastung mit Feinstaub, Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) und weiteren Luftschadstoffen beitragen. Luftschadstoffe führen zu erheblichen Belastungen der menschlichen Gesundheit. Unter den 10 größten Risikofaktoren für die Gesundheit in Deutschland befindet sich auch die Luftverschmutzung, allerdings auf einem der hinteren Plätze (IHME 2017; Plass et al. 2014) In Ländern wie beispielsweise Indien oder China liegt die Krankheitslast durch Luftverschmutzung an dritter bzw. vierter Stelle (IHME 2017). Zur Abschätzung der Luftschadstoffbelastung werden insbesondere die Konzentrationen von Feinstaub, Stickoxiden sowie Ozon analysiert. Feinstaubpartikel führen unter anderem zu Atemwegserkrankungen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen (Atherosklerose) und können die Entwicklung des Fötus während der Schwangerschaft beeinträchtigen (Schulz et al. 2018).

Insbesondere bei der Feinstaubbelastung ist in den letzten zwei Jahrzehnten eine wesentliche Verringerung zu beobachten. Feinstaub wird in Abhängigkeit der Partikelgröße in PM10 und PM2,5 unterteilt. PM10 umfasst alle Partikel, deren aerodynamischer Durchmesser kleiner als 10 µm (Mikrometer) ist. PM2,5 ist eine Teilmenge des PM10 und umfasst dementsprechend alle Partikel, deren aerodynamischer Durchmesser kleiner als 2,5 µm ist.

Die entsprechende EU-Richtlinie 2008/50/EG (EU 2008) sieht die in Tabelle 4 genannten Grenzwerte für Feinstaub vor. Für den Feinstaub PM10 sollte der Jahresmittelwert 40 µg/m<sup>3</sup> nicht übersteigen, der Tagesmittelwert von 50 µg/m<sup>3</sup> darf maximal 35mal im Jahr überschritten werden. Der Jahresmittelwert der Belastung mit Feinstaub PM2,5 darf 25 µg/m<sup>3</sup> nicht übersteigen. Nach neueren Erkenntnissen im Jahr 2013 empfiehlt die EU-Kommission einen Richtwert für den Jahresmittelwert von 20 µg/m<sup>3</sup>. Seit dem Jahr 2012 wurde in Deutschland an keiner Messstation eine Grenzwertüberschreitungen des PM10-Grenzwerts für das Jahresmittel mehr festgestellt. Im Jahr 2017 wurde nur noch an der Station Stuttgart, Am Neckartor die zulässige Anzahl an Überschreitungen des Tagesmittelwertes übertroffen (Minkos et al. 2018). Im Jahr 2018 wurde nur noch an einer industrienahen Messstation in Nordrhein-Westfalen die Anzahl der Tage mit mehr als 50 µg/m<sup>3</sup> um einen Tag überschritten (Minkos et al. 2019). Die Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation für Feinstaubgrenzwerte sind teilweise deutlich strenger als die Vorgaben der EU.

Tabelle 4: Feinstaubgrenzwerte nach EU-Richtlinie und WHO-Empfehlung

Mittelungszeitraum	EU-Grenzwert	WHO-Empfehlung
<b>PM10</b>		
Kalenderjahr	40 µg/m <sup>3</sup>	20 µg/m <sup>3</sup>
Tag	50 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>
	35 Überschreitungen im Jahr	3 Überschreitungen im Jahr
<b>PM2,5</b>		
Kalenderjahr	25 µg/m <sup>3</sup>	10 µg/m <sup>3</sup>
Tag	-	25 µg/m <sup>3</sup>
		3 Überschreitungen im Jahr

Trotz der bereits erzielten Reduktion der Luftbelastung mit Schadstoffen in Deutschland, sind weitere Verbesserungen anzustreben, insbesondere wenn die Maßnahmen ohne Einschränkungen oder negative Nebeneffekte umsetzbar sind. Beispielsweise kann durch eine straßennahe Begrünung mit speziell ausgewählten Pflanzen, die ein hohes Feinstaubabscheidungspotential aufweisen, die Schadstoffbelastung der Luft reduziert werden. Dies ist auch für private Grundstücke an viel befahrenen Straßen von Bedeutung. Da eine erhöhte Belastung mit Luftschadstoffen in der Regel ein sehr kleinräumiges Phänomen ist, muss im Einzelfall entschieden werden, ob die in der vorliegenden Broschüre aufgezeigten Maßnahmen umgesetzt werden sollen. Weil eine Begrünung mit den hier vorgeschlagenen Pflanzen keine nachteiligen Nebeneffekte mit sich bringt, können sie auch bei unklarer Belastungssituation bedenkenlos gepflanzt werden.

Bei der Stadt- und Begrünungsplanung ist darauf zu achten, dass der Wind möglichst ungehindert durch alle Straßen wehen kann. Hohe Pflanzen oder andere Objekte können den Windstrom abbremsen oder umlenken (Reznik/Schmidt 2008). In den entstehenden windstillen Zonen kann sich Feinstaub ansammeln. Falsch gepflanzte Begrünung kann den Wind so stark abschwächen, dass der negative Effekt des reduzierten Feinstaubabtransportes den positiv angestrebten Effekt der Feinstaubabscheidung überwiegt. Durch eine ungeeignete Begrünung kann die Feinstaubkonzentration in der Luft ansteigen (Abhijith et al. 2017).

Feinstaub wird hauptsächlich durch fünf verschiedene Mechanismen aus der Luft entfernt (Janhäll 2015):

- Sedimentation
- Impaktion
- Diffusion
- trockene Deposition
- nasse Deposition

Da die Partikel eine höhere Dichte als Luft besitzen, setzen sie sich infolge der Gravitation der Erde langsam ab. Dieser Vorgang wird als **Sedimentation** bezeichnet und ist bei größeren und damit schwereren Partikeln stärker ausgeprägt als bei kleinen. Während die Sedimentation bei geringem Wind dominiert, benötigt die **Impaktion** den Wind. Trifft Wind auf ein Hindernis, bilden sich Turbulenzen. Zu den bei der Sedimentation vorherrschenden Kräften kommt nun die Fliehkraft hinzu. Die Partikel können sich damit schneller relativ zur Luft bewegen und Oberflächen erreichen. Sie werden bei der Umströmung eines Objektes sozusagen aus der Kurve geschleudert und auf den Oberflächen abgelagert. Eine raue, gekrümmte oder behaarte Oberfläche begünstigt demzufolge die Impaktion (Reznik/Schmidt 2008; Weerakkody et al. 2018). Die **Diffusion** stellt die wohl einfachste Form der Feinstaubabscheidung dar. Während die Partikel mit der Luft transportiert werden, streifen sie entlang von Oberflächen. Durch elektrostatische und chemische Kräfte werden sie von der Oberfläche angezogen und festgehalten. Dieser Effekt wird durch das Anlegen hoher elektrischer Spannungen verstärkt und zur Feinstaubabscheidung genutzt. **Nasse Deposition** bezeichnet das Auswaschen der Partikel durch Regen, Schnee und Hagel. Geschieht dieser Austrag durch feste Partikel oder Nebel ist die Rede von **trockener Deposition**. Besonders die nasse Deposition ist der maßgebliche Mechanismus, um kleine Partikel abzuscheiden, deren Sedimentation und Impaktion sehr lange dauert. Niederschlag ist somit der ausschlaggebende Faktor für die Abscheidung von PM<sub>2,5</sub> und PM<sub>0,1</sub>.

Die Ergebnisse der meisten Experimente und Freilanduntersuchungen zeigen signifikante Unterschiede in der Feinstaub-Akkumulation zwischen Nadeln und Laubblättern (Reznik/Schmidt 2008; Janhäll 2015; Yang/Chang/Yan 2015; Grote et al. 2016) sowie verschiedenen Blattgrößen, Blattformen und Blattmikromorphologien (Blatthaare, Kutikula (wachsartiger Überzug der Blätter) sowie Oberflächenrauigkeit und -rippen). Dies deutet darauf hin, dass alle diese Merkmale einen Einfluss auf die Abscheidung und Retention von Feinstaub auf Blättern haben (Sæbø et al. 2012; Weber/Kowarik/Säumel 2014; Weerakkody et al. 2018). Kleinere Blätter und komplexe Blattformen (gelappte Blätter) zeigten ein größeres Potential, Feinstaub abzuscheiden und zurückzuhalten. Die Haarigkeit der Blätter haben den stärksten Einfluss auf die Abscheidung von Feinstaub aus der Luft. Erwartungsgemäß weist dementsprechend die Pflanze mit dem höchsten bekannten Feinstaubabscheidungspotential (*Viburnum rhytidophyllum*) ein stark verschlungenes und behaartes Blatt auf. Diese Eigenschaft ist auch für den umgangssprachlichen Namen „Runzelblättriger Schneeball“ verantwortlich.

Die auf den Blattoberflächen höherer Pflanzen abgelagerten Feinstaubpartikel werden zu circa 60 % durch Regen abgewaschen, während etwa 40 % an der Wachsschicht der Blattkutikula gebunden sind (Popek et al. 2013). Zur Feinstaubabscheidung und zur tatsächlichen Feinstaubbindung weisen Moose hohe Potentiale auf. Dies liegt zum einen an ihrer großen spezifischen Oberfläche und zum anderen an der besonderen Oberflächenbeschaffenheit. Moose sind im Gegensatz zu höheren Pflanzen in der Lage Feinstaub an den Zellen zu binden und durch kontrollierte Stoffwechselprozesse in die Zelle aufzunehmen.. Damit wird der Feinstaub nicht nur abgelagert, sondern tatsächlich langfristig gebunden.

Im Folgenden werden Hinweise für die Ausgestaltung von

- Dachbegrünungen,
- Fassadenbegrünungen und
- Außenanlagen

gegeben, um klimaangepasste Konstruktionen zu erhalten und gleichzeitig die biologische Vielfalt zu erhöhen. Im Rahmen des Forschungsprojektes „KLIBAU – Weiterentwicklung und Konkretisierung des klimaangepassten Bauens“ wurden für die folgenden fünf Anwendungen Pflanzenlisten erstellt:

- Extensive bis semi-intensive Dachbegrünung
- Stauden für semi-intensive bis intensive Dachbegrünung, Fassadenbegrünung und Außenanlagen
- Kleingehölze semi-intensive bis intensive Dachbegrünung, Fassadenbegrünung und Außenanlagen
- Kletterpflanzen für Fassadenbegrünung
- Bäume

Diese Listen können im Endbericht des Forschungsprojekts eingesehen werden (Fahrion et al. 2019). Die Pflanzenlisten sind nicht abschließend. Bei den aufgeführten Pflanzen handelt es sich um potentiell geeignete Arten, die durch weitere ergänzt werden können. Ein wesentliches Kriterium bei der Pflanzenauswahl war, dass die Pflanzen einheimisch sind oder in Ausnahmefällen – wenn sie besonders positiv die Biodiversität oder Feinstaubabscheidung fördern – als Neophyten bereits eingebürgert sind, ohne potentiell invasiv oder invasiv zu sein.

Des Weiteren wurden auch speziell gefährdete Arten in die Auswahl einbezogen. Durch eine vermehrte Pflanzung in künstlich geschaffenen Lebensräumen, können diese geschützt und erhalten werden und sich im Idealfall wieder auf natürliche Weise in die Umgebung ausbreiten. Somit besteht die Möglichkeit die natürliche biologische Vielfalt sowohl der Pflanzen als auch der sich von ihnen ernährenden Tiere zu erhalten. In die Pflanzenlisten wurden zudem Angaben zur Behaarung der Pflanzenteile integriert, da sich dies entscheidend auf die Eignung der Pflanze zur Feinstaubabscheidung auswirkt. Ist die Feinstaubbelastung am betrachteten Standort ein entscheidendes Problem, können die entsprechenden Pflanzen gewählt werden. Die Angaben zur Blühphase der jeweiligen Pflanzenart ermöglichen es unterschiedliche Pflanzen auszuwählen, um ein ganzjähriges Nahrungsangebot für Insekten bereitzustellen. Aus den Angaben zum Nahrungsnetz kann geschlossen werden, welche Tiere durch die Blüten und Früchte der Pflanzen besonders unterstützt werden.

## 8.2. Dachbegrünung

Je größer die Substratstärke, desto größer ist die Auswahl an geeigneten Pflanzen und dementsprechend lässt sich eine größere Artenvielfalt erreichen. Zudem kann in der dickeren Substratschicht mehr Regenwasser zwischengespeichert werden. Die dickere Substratschicht führt zu einem erhöhten Materialverbrauch und damit zu erhöhten grauen Emissionen. Hinzu kommt, dass das Tragwerk infolge der zusätzlichen Auflast größer dimensioniert werden muss und sich dadurch die grauen Emissionen weiter erhöhen. Durch die Variation der Substrathöhe mittels Anhögelungen können frostfreie Rückzugsorte geschaffen werden. Es entstehen Nischen aus denen nach Dürre- oder Frostschäden eine Neubesiedelung erfolgen kann.

Vegetationsfreie Flächen wirken sich positiv auf die biologische Vielfalt der Dachbegrünung aus, während sie im Hinblick auf die Klimaeinwirkungen tendenziell negativ einzuschätzen sind. Viele Insekten benötigen offenen Boden, zum Beispiel Sand- oder Lehmlinsen, bindigen Rohboden oder auch Kiesbereiche, Grobkiesbeete, Schotterflächen und Natursteinhaufen. Hier können räuberische Arten wie Laufkäfer oder Springspinnen jagen, andere Arten brauchen diese Bereiche als Sonnenplätze oder zur Anlage ihrer Bodennester.

Ein Gründach ist so konzipiert, dass Wasser möglichst schnell abläuft, denn Stauässe schadet der Vegetation. Andererseits erhöht die Verfügbarkeit von Wasser die Attraktivität eines Dachs für Vögel und Insekten enorm. An einzelnen Stellen der Dachfläche können daher Folien eingearbeitet und mit Sand abgedeckt werden, so dass sich Regenwasser lokal über einen längeren Zeitraum auf dem Dach hält. Solche Pfützen oder Wassertränken mit einer Tiefe zwischen 2 cm und 10 cm dienen als Badestellen und Trinkgelegenheiten für viele Tierarten und schaffen ein feucht-kühles Mikroklima in einem ansonsten heißen und trockenen Lebensraum.

Um zusätzliche Verstecke, Schattenplätze und Nistbereiche für Insekten zu schaffen, können Totholzhaufen oder Steinhaufen sowie Insektenhotels angelegt werden. Windsichere Nisthilfen für Fledermäuse und Vögel können das Angebot erweitern. Bei Nisthilfen ist darauf zu achten, dass sie ausreichend hagelwiderstandsfähig sind, um keine neuen Schadenspotentiale zu schaffen. Zudem sollten die genannten Strukturen windsicher verankert sein, andernfalls könnten umherwirbelnde Teile Schäden verursachen.

Eine weitere Lebensform, die insbesondere langanhaltende Trockenphasen – wie sie auf Flachdächern auftreten können – aufgrund ihrer Austrocknungstoleranz übersteht und daher auch keine permanente Wasserverfügbarkeit benötigt, sind „Niedere Pflanzen“ wie Moose und Flechten. Die Co-Kultur von Moosen und Flechten mit krautigen Pflanzen hat keinen negativen Effekt auf das Pflanzenwachstum von Dachbegrünungen, sondern kann sogar durch die enorme Wasserhaltekapazität die Trockenschädigung krautiger Pflanzen erniedrigen und führt zu deutlich kühleren Substrattemperaturen ( $-5^{\circ}\text{C}$  bis  $-17^{\circ}\text{C}$ ).

### **8.3. Fassadenbegrünung**

Aus Gründen der Biodiversität ist die vertikale Vernetzung der Dachbegrünung mit den Außenanlagen von Bedeutung, da es dadurch insbesondere den weniger mobilen Tieren (z.B. Spinnentiere und flügellose Insekten) ermöglicht wird, größere urbane Begrünungsflächen zu erschließen. Bei allen Formen der Fassadenbegrünung müssen in der Planung die zusätzlichen Windlasten infolge der vergrößerten Windangriffsfläche berücksichtigt werden. Für die projizierten länger andauernden Hitzeperioden sowie die höheren Sommertemperaturen spielt insbesondere der Kühleffekt der Pflanzen für die Außenoberfläche der Fassade eine wichtige Rolle. Die Gebäudeverschattung durch die vorgelagerte Vegetation als auch die adiabate Kühlung durch Verdunstungskälte der Pflanzen bewirken eine signifikante Reduktion der Oberflächentemperatur (Bowler et al. 2010; Norton et al. 2015; Brune/Bender/Groth 2017). Um das Potenzial auszuschöpfen, sind für das klimaangepasste Bauen Begrünungen vorteilhaft, die die Fassade möglichst flächig bedecken.

Bei der Fassadenbegrünung kann zwischen bodengebundener und wandgebundener Begrünung unterschieden werden. Bei der bodengebundenen Begrünung werden die Pflanzen direkt in den anstehenden Boden gepflanzt, während bei der wandgebundenen Begrünung künstliche Pflanzgefäße vor oder an den Wänden befestigt werden.

Eine bodengebundene Begrünung kann durch Selbstklimmer (Wurzelkletterer, Haftscheibenranker) und Gerüstkletterpflanzen (Schlinger/Winder, Ranker, Spreizklimmer) realisiert werden. Während Selbstklimmer direkt auf der zur Verfügung gestellten Wandfläche wachsen, benötigen Gerüstkletterpflanzen separate Wuchskonstruktion wie Kletterhilfen oder Spaliere aus Stäben, Röhren, Seilen, Gittern und Netzen. Bei den bodengebundenen Systemen läuft die Pflanzenversorgung weitgehend selbstständig ab. Es sind in der Regel keine künstliche Bewässerung und Düngung erforderlich. Der Pflege- und Wartungsaufwand ist sehr gering. Ein flächiger Bewuchs der Fassade stellt sich allerdings erst nach einigen Jahren ein.

Bei der Verwendung von Selbstklimmern ist darauf zu achten, dass die entsprechenden Wandaufbauten für einen Direktbewuchs geeignet sind und keine Beschädigung der Fassade hervorrufen (FLL 2018b: 47). Bei bodengebundenem Fassadenbewuchs sollte aufgrund der zunehmenden Trockenheit auf die Ausbildung von Pfahlwurzeln oder Tiefwurzeln wie beispielsweise bei Reb- oder Rosenarten, geachtet werden. Unter den Kletterpflanzen empfiehlt sich beispielsweise Efeu (*Hedera helix*), Wilder Wein (*Parthenocissus quinquefolia*) und Hopfen (*Humulus lupulus*) aufgrund der hohen Biodiversitätsaspekte und den höchsten Feinstaubabscheidewerten. Efeu ist immergrün und bietet damit auch im Winter Nist- und Überwinterungsmöglichkeiten. Im Vergleich verträgt der Wilde Wein eine höhere Sonnenexposition, wodurch sich die beiden Gewächse bestens ergänzen. Hopfen ist das Mittel der Wahl, wenn die Fassade nicht für Selbstklimmer geeignet ist (wächst an vertikalen Stangen oder Seilen).

Bei den wandgebundene Lösungsansätzen haben die Pflanzen keinen direkten Kontakt zum Boden. Horizontale Vegetationsflächen in Pflanzengefäßen mit Substrat stellen die einfachsten wandgebundenen Begrünungsarten dar, die jedoch häufig nicht lückenlos, sondern meist offen gestaltet werden. Demgegenüber stehen sogenannte "Vertikale Gärten", in denen die Pflanzen in senkrechten Vegetationsflächen entweder modular oder flächig angelegt werden. Mit vertikalen Gärten kann ebenfalls eine lückenlose Begrünung der Fassade erreicht werden. Durch vorkultivierte Elemente kann sehr zeitnah eine Flächenwirkung erreicht werden.

Bei **modularen Systemen** werden substrattragende Rinnensysteme als Element-Einheiten aus Gabionen bzw. Körben, Matten oder Kassetten verwendet. Für Beispiele siehe (Dettmar/Pfoser/Sieber 2016). Es gibt auch die Möglichkeit der direkten Begrünung auf Kunst- und Natursteinplatten mit begrünungsfördernder Oberflächenrauheit. Geeignet sind Stauden (u.a. auch Gräser, Farne), Kleingehölze, Moose, Spreizklimmer und unter Umständen Wurzelkletterer.

Ähnlich gestaltet sind **vertikale Vegetationsflächen** mit flächigen Konstruktionen, die entweder mit Substratträgern aus Textil-Systemen, Metallblech-Systemen (mit Öffnungen zu Vegetationsflächen aus Textil- bzw. Substratträgern) oder direkt begrünt auf nährstofftragenden Wandschalen ausgeführt werden. Geeignet sind hierfür die bereits erwähnten Pflanzenarten.

Die Auswahl der meist ausdauernden Pflanzen bietet einen breiten Gestaltungsspielraum. Dadurch ergibt sich gegenüber der bodengebundenen Begrünung eine wesentlich höhere floristische Artenvielfalt und es lassen sich unterschiedliche Wuchsformen kombinieren. Kleine flachauslaufende, substratbedeckende Pflanzen dienen dabei als Verdunstungsschutz für das Substrat, damit die Wurzeln der anderen Wuchsformen eine längere Wasserverfügbarkeit haben. Der Pflege- und Wartungsaufwand wandgebundener Systeme ist im Vergleich zu bodengebundenen Systemen höher und damit teurer. Auch die Wasser- und Nährstoffversorgung sowie die Entwässerung müssen sichergestellt werden. Zur Bewässerung kann und sollte Regenwasser verwendet werden. Wandgebundene Systeme sollten im Idealfall aus hagelgeprüften Materialien bestehen. Aktuell werden auf dem Markt aber keine Systeme angeboten, die entsprechende Prüfzeugnisse aufweisen können.

## 8.4. Außenanlagen

Versiegelte Flächen wirken sich negativ auf das Mikroklima in der Stadt aus. Sie führen zu einer Überhitzung und einem erhöhten Oberflächenabfluss bei Regenereignissen. Die Ableitung des Oberflächenwassers in die Kanalisation ist negativ hinsichtlich der Wasserverfügbarkeit für Pflanzen in urbanen Räumen.

Eine „klimaangepasste“ Außenanlage sollte nicht getrennt von Dach- und Fassadenbegrünungen gedacht werden, sondern sollte Synergien z.B. durch funktionelle Teilaufgaben (z.B. Regenwasserretention auf dem Dach, anschließende Bewässerung der Fassadenbegrünung und Regenwasserrückhaltung in Teichanlagen oder Zisternen) oder durch Vernetzung ausnutzen. Wissenschaftliche Erkenntnisse aus Ökologie, Naturschutz, Botanik und Zoologie weisen in zahlreichen Publikationen auf die zentrale Rolle der strukturellen Vernetzung hin. Strukturelle Vernetzung erhöht

- die Mobilität von Mikroorganismen, Tieren und Pflanzen,
- die strukturelle und damit abiotische und biotische Vielfalt und
- die nachhaltige Stabilität und Resilienz von kleinräumigen Ökosystemen.

Damit können vernetzte Strukturen nicht nur gegen Auswirkungen des Klimawandels stabilisiert werden. Auch ihre Ökosystemdienstleistungen, wie z.B. Beschattung, Hitzereduktion, Regenwasserretention, Verdunstungskälte, Feinstaubabscheidung, Luftfiltrierung, Lärmreduzierung und Lebensraum für Mikroorganismen, Pflanzen und Tiere, werten die Bedeutung von Außenanlagen deutlich auf. Eine Integration und Vernetzung dieser funktionellen Grünflächen, wie z.B. Außenanlagen und Gebäudebegrünung in der Stadtplanung eröffnet somit neue Lösungsansätze im Kontext des Klima- und Artenschutzes. Ebenso dient sie als Grundlage für Hitzeaktionspläne sowie als Grundlage für klimaangepasstes Bauen. Durch die enorme Gestaltungsfreiheit und Bodenfläche einer Außenanlage im Vergleich zur Dach- und Fassadenbegrünung kommt deren Gestaltung eine der wichtigsten Rollen zu.

Aus Sicht des klimaangepassten Bauens sind Schottergärten die ungünstigste Alternative der Außenanlagengestaltung. Unter der irrigen Annahme, dass der Pflegeaufwand von Schottergärten sehr gering sei, erfreut sich diese Gestaltungsform in letzter Zeit vermehrter Beliebtheit. Dabei werden unter den Schotterflächen häufig Vliese oder Folien eingesetzt, um ein unerwünschtes Pflanzenwachstum zu vermeiden. Allerdings bilden sich durch den Eintrag von Staub, Laub und anderen organischen Materialien bereits nach wenigen Jahren keimfähige Untergründe oberhalb der Vliese und Folien. Zudem werden die Vliese und Folien in Abhängigkeit der Umwelteinflüsse im Laufe der Zeit zersetzt und brüchig. In beiden Fällen trägt der Wind Pflanzensamen ein und es entwickelt sich ein ungeplanter Bewuchs. Dadurch entsteht bereits innerhalb einer kurzen Zeitspanne ein enormer Aufwand für Wartung und Instandhaltung. Schottergärten beeinflussen das Mikroklima nachteilig. Durch die geringe Anzahl an Pflanzen wird das Potenzial der Flächen zur Erhöhung der biologischen Vielfalt und Feinstaubbindung bei weitem nicht ausgeschöpft. Die wasserundurchlässige Unterkonstruktion der Schotterflächen führt dazu, dass es sich je nach Ausführung um versiegelte Flächen handelt. Nicht optimal, aber bereits besser als Schottergärten sind Zierrasenflächen. Hier kann Regenwasser versickern und kleinen Tieren wird zumindest ein Minimum an Lebensraum geboten. Die ökologische Wertigkeit von Rasenflächen kann erhöht werden, indem der Rasen selten und nur 10 – 15 cm hoch gemäht wird, da dann Kleintiere den Mähvorgang überleben. Eine Möglichkeit, einen ästhetisch ansprechenden und ökologisch wertvollen Rasen zu schaffen, ist es, ausgewählte Bereiche nur ein bis maximal zweimal im Jahr zu mähen.

Eine weitere Verbesserung bezüglich der biologischen Vielfalt kann gegenüber dem Zierrasen durch speziell angelegte Kräuterrasen und Blumenwiesen erreicht werden. In Frage kommende krautige Pflanzen, die bei Wildbienen und Schmetterlingen besonders beliebt sind, sind Traubenhyazinthe, Krokus, Schlüsselblume, Glockenblume, Malve, Kornblume, Distel, Wilde Möhre, Natternkopf und Margerite.

Dabei sollte darauf geachtet werden, dass auch Spätblüher gepflanzt werden, um ein ganzjähriges Nahrungsangebot bereitzustellen. Besonders geeignet sind dabei Korbblütler, wie Sonnenhut oder Sonnenblume. Auch der eingebürgerte Neophyt Nachtkerze (*Oenothera biennis*) ist ein geeigneter Spätblüher. Zum Schutz und zum Erhalt gefährdeter Wildpflanzen, bietet es sich des Weiteren an, diese gezielt in Blumenwiesen auszubringen. In Frage kommende einheimische Arten sind die Sand-Strohblume (*Helichrysum arenarium*) oder der Rauhaarige Alant (*Inula hirta*).

Hecken und insbesondere Bäume haben einen großen Einfluss auf das Mikroklima und damit die Aufenthaltsqualität im Außenraum. Sträucher, die hervorragend Feinstaub abscheiden und auch wertvoll für blütenbesuchende Insekten sind, sind beispielsweise der Runzelblättrige Schneeball (*Viburnum rhytidophyllum*) und die Blutjohannisbeere (*Ribes sabguineum*). Beerensträucher sind prinzipiell wertvoll für Insekten. Sommerflieder (*Buddleja davidii*) stellt einen der klassischen Schmetterlingssträucher dar. Er wird von über 45 Schmetterlingsarten besucht, steht allerdings unter Beobachtung als potentiell invasive Art. Die Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*) ist sowohl für Insekten, als auch insbesondere im Herbst und Winter aufgrund ihrer zahlreichen Früchte für Vögel wichtig. Bei Außenanlagen können Schlehen-Weißdorn-Rosengebüsche wegen der positiven Wirkung auf die biologische Vielfalt aber auch als Feinstaubabscheider empfohlen werden. Gartenzäune können auch durch Hecken ersetzt werden. Hainbuche, Holunder, Hasel oder echter Lorbeer besitzen einen ökologischen Mehrwert gegenüber den Koniferen, wie griechischer Wacholder und Eibe. Insbesondere für die straßenzugewandte Grundstücksseite empfiehlt sich dies als Vegetationsfilter. Kirschlorbeer sollte dafür nicht verwendet werden, da diese Art in Verdacht steht, potentiell invasiv zu sein.

Bei den Bäumen sollte aufgrund der Anfälligkeit gegenüber Sturmereignissen darauf geachtet werden, keine Arten mit hoher Bruchanfälligkeit (z.B. Birke) zu pflanzen. Durch länger werdende Trockenperioden ist es vorteilhaft tiefwurzelnde Stauden, Sträucher und Bäume mit Pfahlwurzeln zu integrieren. Durch einen möglichen Zugang zu oberflächennahem Grundwasser wird so eine längere Wasserverfügbarkeit für langandauernde Trockenphasen gewährleistet. Bäume mit Pfahlwurzeln verbrauchen das tiefer liegende Wasser nicht nur selbst, sondern versorgen durch den sogenannten "Hydraulic lift" auch die trockene oberflächennahe Bodenschicht und benachbarte Pflanzen. Zu den Strukturelementen, die Lebensraumangebote fördern, zählen u.a. Sandlinsen, Asthaufen, Wurzelstöcke, Kiesbereiche (mit unterschiedlich großen Steinen) und Steinblöcke. Letztere können als Kräuterspirale oder Trockenmauer verwendet werden. Aber auch künstliche Behausungen, die Ersatzlebensräume für Fledermäuse, Vögel, Igel, Eidechsen und Insekten (Insektenhotel) anbieten, sind wichtige Bausteine in der klimaangepassten Gartengestaltung. Auch bei der Auswahl von Sträuchern und Bäumen sollte auf ein durchgehendes Nahrungsangebot geachtet werden. Die gemeine Hasel (*Corylus avellana*) und die Weide (*Salix*) sind im Frühjahr eine der ersten Pflanzen mit einem Angebot für alle Insekten (z.B. Wildbienen, Hummeln, Wollschweber). Die heimischen Obstbäume blühen im Anschluss und bieten durch ihre Früchte im Spätsommer und Herbst ein ausreichendes Nahrungsangebot. Damit sind sie für die Artenvielfalt von Insekten und Vögeln sehr gut geeignet.

Der Laubbaum, der bisher dokumentiert am effizientesten Feinstaub abscheidet, ist die Schwedische Mehlbeere (*Sorbus intermedia*). Die Winterlinde (*Tilia cordata*) wird von etwa 25 Schmetterlingsarten besucht und ist wegen ihrer hohen Zuckerkonzentration im Nektar wichtig für Bienen und Hummeln. Die Silberlinde (*Tilia tomentosa*) verfügt zum einen über eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Staub und Rauchgase aus der Industrie, Verkehr und Haushalten und ist damit besonders für stark belastete urbane Räume geeignet. Zum anderen weist sie eine hervorragende Feinstaubabscheidung aufgrund der faltig-rauen Blattoberseite und des dichten weißfilzigen Haares auf der Unterseite auf. Sie wird oft entlang von Straßen, in Gärten und Parks gepflanzt und bietet spät im Jahr insbesondere Hummeln eine seltene Nahrungsquelle, da zahlreiche Spätblüher immer seltener werden.

## 8.5. Verwendung gefährdeter Pflanzengesellschaften zur Gebäudebegrünung

Der Anbau und die Erhaltung gefährdeter Wildpflanzen außerhalb ihres natürlichen Lebensraumes (ex situ) sind eine Möglichkeit das Aussterben von Arten zu verhindern. Je nach Situationen können ex situ vermehrte Arten wieder in natürlichen Lebensräumen angesiedelt werden. Dachbegrünungen, Grünstreifen und Fassadenbegrünungen bieten Ähnlichkeiten zu den natürlich vorkommenden Schutt-, Felsspalten und Mauerfugen-Gesellschaften sowie Ruderalgesellschaften. Einige der infrage kommenden Pflanzengesellschaften werden in der Roten Liste der Pflanzengesellschaft (Rennwald 2000) sowie der Roten Liste der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands (Finck et al. 2017) als stark gefährdet bis von vollständiger Vernichtung bedroht geführt. Diese Pflanzengesellschaften besitzen somit einen hohen Gefährdungsgrad und bedürfen einem dringenden Schutz, der je nach Region auf Begrünungsflächen umgesetzt werden und zum Erhalt der Biodiversität von Flora und Fauna beitragen kann. Grundsätzlich sind begrünte Dächer und Fassadenbegrünungen kein adäquater Ersatz für Trockenrasen, Magerwiesen, Ruderalflächen oder andere wertvolle Lebensräume. Trotzdem können sie bei intelligentem Management gefährdete Pflanzengesellschaften im sogenannten ex-situ-Verfahren schützen und damit Trittsteinbiotope für eine Ausbreitung schaffen. Solche Wildpflanzgemeinschaften kann man beispielsweise aus folgenden natürlichen Pflanzengesellschaften zusammenstellen: Felsspalten- und Mauerfugen-Gesellschaften; Schutt-, Moränen- und Geröll-Gesellschaften; Felsgrus-Gesellschaften; annuelle kalkarme Sandrasen und Trittschilfen wie sie in der Stadt bereits üblich sind. Die den Pflanzengesellschaften zugehörigen Arten können dem zugehörigen Endbericht des Forschungsprojekts KLIBAU (Fahrion et al. 2019: 205) entnommen werden. Eine weitergehende Beratung durch einen Gärtner oder Landschaftsplaner ist empfehlenswert.

Infobox 10: Literaturhinweise zur Dach- und Fassadenbegrünung

**Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2019a)** - Grün in der Stadt. Maßnahmen zur Grün- und Freiraumentwicklung im Rahmen der Städtebauförderung. (BBSR-Online-Publikation Nr. 12/2019)

**Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2019b)** - Urbane Freiräume. Qualifizierung, Rückgewinnung und Sicherung urbaner Frei- und Grünräume.

**Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL) (2018a)** - Dachbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen.

**Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL) (2018b)** - Fassadenbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für die Planung Ausführung und Pflege von Wand- und Fassadenbegrünungen

**Richter et al. (2019)** - Nachhaltig geplante Außenanlagen. Empfehlungen zu Planung Bau und Bewirtschaftung von Bundesliegenschaften.

**Schmauck (2019)** - Dach- und Fassadenbegrünung - neue Lebensräume im Siedlungsbereich. Fakten, Argumente und Empfehlungen

## 9. Ausblick und zukünftige Entwicklungen

Die Sensitivität eines Gebäudes wird nicht nur durch das Gebäude selbst und das zugehörige Grundstück, sondern auch durch die Gestaltung der benachbarten Grundstücke und öffentlichen Flächen (Straßenraum, Plätze, Parks,...) beeinflusst. Bei einigen Einwirkungen und Umweltpotenzialen können Maßnahmen an einer einzelnen Liegenschaft zwar zu einer Verbesserung der Situation führen, eine abgestimmte Vorgehensweise auf größerer Ebene, z. B. innerhalb eines Quartiers, könnte jedoch einen wesentlich höheren Nutzen entfalten. Tabelle 5 fasst Maßnahmen zusammen, die erst im größeren Maßstab ihre volle Wirkung entfalten.

Führt ein Grundstücksbesitzer Maßnahmen zur Regenwasserrückhaltung durch, dann profitieren auch tieferliegende Nachbargrundstücke, ohne an den Kosten beteiligt zu werden. Die wesentliche Herausforderung besteht darin, dass sich verschiedene Eigentümer und öffentliche Stellen zu einer gemeinsamen koordinierten Aktion zusammenfinden. Hierbei kann durchaus ein schrittweises Vorgehen umgesetzt werden, so dass sich sukzessive mit jeder Einzelmaßnahme eine Verbesserung gegenüber dem Ausgangszustand eintritt. Allerdings muss dazu im Voraus jedem einzelnen klar sein, welchen Beitrag er liefern kann. Hier spielen soziale Aspekte eine wesentliche Rolle und aufwendige Kommunikationsprozesse werden erforderlich. Diese Problematik wird in der vorliegenden Broschüre nicht weiter behandelt. Es wird deutlich, dass das klimaangepasste Bauen zahlreiche Schnittstellen zur Quartiers- und Stadtplanung aufweist.

Tabelle 5: Maßnahmen und deren Wirksamkeit auf Quartiersebene

Maßnahme	Bei Quartiersansatz wesentlich höhere Wirksamkeit
Verbesserung des Mikroklimas durch Entsiegelung, helle Oberflächen und Begrünung	++
Starkregenretention durch Entsiegelung	+++
Starkregenretention durch Geländemodellierung (Retentionsmulden, Retentionsplätze, Zisternen)	+++
Biodiversitätserhöhung durch Begrünung (Schaffung größerer zusammenhängender Lebensräume und evtl. Verknüpfung bis zur ländlichen Umgebung, Parkflächen, Waldgebieten)	+++
Feinstaubbindung durch Begrünung	+++

Die innerhalb der Broschüre aufgezeigten Konstruktionen zum klimaangepassten Bauen können nicht ungeprüft auf beliebige Gebäude und Standorte übertragen werden. Vielmehr soll ein Grundverständnis geschaffen werden, welches als Anregung für Architekten und Fachplaner dient bzw. klima- und umweltbewusste Bauherren in die Lage versetzt Wünsche gegenüber Planern zu artikulieren oder Planerentscheidungen kritisch zu hinterfragen.

Das klimaangepasste Bauen verfügt über zahlreiche Schnittstellen zum gesamten Themenkomplex Nachhaltigkeit im Bauwesen. Deren vollumfängliche Berücksichtigung und Optimierung z. B. auf alle Kriterien des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB, URL: [www.bnb-nachhaltigesbauen.de](http://www.bnb-nachhaltigesbauen.de)) kann im Rahmen der vorliegenden Broschüre nicht erfolgen. Selbstverständlich wäre es problematisch Konstruktionen oder Maßnahmen für das klimaangepasste Bauen zu empfehlen, die zwar eine hohe Widerstandsfähigkeit sowie positive Klima- und Umweltpotentiale aufweisen, gleichzeitig aber andere Kriterien des nachhaltigen Bauens in negativer Weise beeinflussen.

Die klimaangepassten Bauweisen wirken sich auf die Ökobilanz insbesondere während der Herstellung, Erneuerung und dem Rückbau eines Gebäudes aus. Besonders widersprüchlich wäre die Empfehlung von konstruktiven Bauteilaufbauten, die ökobilanziell ein hohes Treibhauspotential verursachen. Bei Dimensionierung auf maximale Widerstandsfähigkeit kann der Ressourcenverbrauch stark ansteigen. Dementsprechend ist es aus ökologischer Sicht nicht empfehlenswert auf ein Extremereignis zu dimensionieren, welches mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb der Lebensdauer des Bauteils oder Gebäudes überhaupt nicht auftreten wird.

Die detaillierte Ausbildung und Schichtenfolge der Konstruktionen wirkt sich auf die Trennbarkeit von Materialschichten und somit auf deren Rückbaubarkeit und Verwertung aus. Im Rahmen der Arbeit wird punktuell auf diese Themen eingegangen und hingewiesen. Eine vollumfängliche Bearbeitung sowie ein iterativer, integraler Planungsprozess zur Optimierung hinsichtlich aller Fragen der Nachhaltigkeit müssen im Einzelfall erfolgen. Soll die Gesamtheit der sich gegenseitig beeinflussenden Themengebiete betrachtet werden, so erfordert dies detaillierte Untersuchungen und einen integralen Planungsprozess im Einzelfall.

## 10. Literaturverzeichnis

### 10.1. Literatur

- Abhijith, K. V.; Kumar, Prashant; Gallagher, John; McNabola, Aonghus; Baldauf, Richard; Pilla, Francesco; Broderick, Brian; Di Sabatino, Silvana; Pulvirenti, Beatrice, 2017: Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review. *Atmospheric Environment*, 162. Jg., S. 71–86.
- Albrecht, Wolfgang; Schwitalla, Christoph, 2015: Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS. Möglichkeiten der Wiederverwertung von Bestandteilen des WDVS nach dessen Rückbau durch Zuführung in den Produktionskreislauf der Dämmstoffe bzw. Downcycling in die Produktion minderwertiger Güter bis hin zur energetischen Verwertung. *Forschungsinitiative ZukunftBau F*, Bd. 2932. Stuttgart.
- BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2019a: Grün in der Stadt. Maßnahmen zur Grün- und Freiraumentwicklung im Rahmen der Städtebauförderung. 2018. Auflage. BBSR-Online-Publikation, 2019, Nr. 12. Bonn.
- BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2019b: Urbane Freiräume. Qualifizierung, Rückgewinnung und Sicherung urbaner Frei- und Grünräume : Handlungsempfehlungen für die kommunale Praxis. 2018. Auflage. Bonn.
- BMI – Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2018: Hochwasserschutzfibel. Objektschutz und bauliche Vorsorge. 8. Auflage. Berlin.
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.), 2016: Anpassung an den Klimawandel. Erster Fortschrittsbericht der Bundesregierung zur Deutschen Anpassungsstrategie.
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2017: Weißbuch Stadtgrün. Grün in der Stadt - für eine lebenswerte Zukunft. 2017. Auflage. Berlin.
- Bowler, Diana E.; Buyung-Ali, Lisette; Knight, Teri M.; Pullin, Andrew S., 2010: Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97. Jg. (3), S. 147–155. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204610001234>.
- Brune, Miriam; Bender, Steffen; Groth, Markus, 2017: Gebäudebegrünung und Klimawandel. Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung. Report, Bd. 30. Hamburg.
- Dettmar, J.; Pfoser, Nicole; Sieber, Sandra, 2016: Gutachten Fassadenbegrünung. Vorschlag für Zweck, Umfang und Gebietskulisse einer finanziellen Förderung von quartiersorientierten Unterstützungsansätzen von Fassadenbegrünungen für das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MKUNLV) NRW.
- Diaz, S.; Settele, Josef; Brondízio, Eduardo; Ngo, Hien T.; Guèze, Maximilien; Agard, John; Arneth, Almut; Balvanera, Patricia; Brauman, Kate; Butchart, Stuart; Chan, Kai; Garibaldi, Lucas; Ichii, Kazuhito; Liu, Jianguo; Subramanian, Suneetha Mazhenchery; Midgley, Guy; Miloslavich, Patricia; Molnár, Zsolt; Obura, David; Pfaff, Alexander; Polasky, Stephen; Purvis, Andy; Razzaque, Jona; Reyers, Belinda; Chowdury, Rinku Roy; Shin, Yunne-Jai; Visseren-Hamakers, Ingrid; Willis, Katherine; Zayas, Cynthia, 2019: Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.
- DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, 2016: Merkblatt DWA-M 553. Hochwasserangepasstes Planen und Bauen. Hennef.

- Fahrion, Marc-Steffen; Draeger, Susan; Lakatos, Michael; Schmidt, Timo; Nickl, Christoph; Brombacher, Moritz; Bangalore, Deekshitha; Sundermann, Wolfgang, 2019: KLIBAU - Weiterentwicklung und Konkretisierung des Klimaangepassten Bauens. Endbericht. Stuttgart.
- Fahrion, Marc-Steffen; Nikolowski, Johannes; Zimm, Jakob; Naumann, Thomas, 2012: Relevante Einwirkungen auf Gebäude. In: Weller, Bernhard; Naumann, Thomas; Jakubetz, Sven (Hrsg.): Gebäude unter den Einwirkungen des Klimawandels. Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes REGKLAM - Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden, H. 3. Berlin, S. 1-66.
- Finck, Peter; Heinze, Stefanie; Raths, Ulrike; Riecken, Uwe; Ssymank, Axel, 2017: Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands. Dritte fortgeschriebene Fassung 2017. Naturschutz und Biologische Vielfalt, Bd. 156. Bonn - Bad Godesberg, Münster.
- FVHF – Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V., 2017: FVHF Leitlinie. Planung und Ausführung von Vorgehängten Hinterlüfteten Fassaden (VHF). Berlin.
- Grote, Rüdiger; Samson, Roeland; Alonso, Rocío; Amorim, Jorge Humberto; Cariñanos, Paloma; Churkina, Galina; Fares, Silvano; Le Thiec, Didier; Niinemets, Ülo; Mikkelsen, Teis Norgaard; Paoletti, Elena; Tiwary, Abhishek; Calfapietra, Carlo, 2016: Functional traits of urban trees: air pollution mitigation potential. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14. Jg. (10), S. 543-550.
- Hallmann, Caspar A.; Sorg, Martin; Jongejans, Eelke; Siepel, Henk; Hofland, Nick; Schwan, Heinz; Stenmans, Werner; Müller, Andreas; Sumser, Hubert; Hörren, Thomas; Goulson, Dave; Kroon, Hans de, 2017: More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PloS one*, 12. Jg. (10), e0185809.
- Hassol, Susan Joy; Torok, Simon; Lewis, Sophie; Luganda, Patrick, 2016: (Un)Natural Disasters: Communicating Linkages Between Extreme Events and Climate Change. *WMO Bulletin - The journal of the World Meteorological Organization*, 65. Jg. (2), S. 2-9.
- Hestermann, Ulf; Rongen, Ludwig, 2018: Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 2. 35. Auflage. Wiesbaden.
- Ichii, Kazuhito; Molnár, Zsolt; Obura, David; Purvis, Andy; Willis, Katherine, 2019: IPBES Global Assessment on Biodiversity and Ecosystem Services. Chapter 2.2 Status and Trends - Nature. Paris.
- Jaffal, Issa; Ouldboukhitine, Salah-Eddine; Belarbi, Rafik, 2012: A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 43. Jg., S. 157-164.
- Janhäll, Sara, 2015: Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, 105. Jg., S. 130-137.
- Kowarik, Ingo; Bartz, Robert; Cloos, Ingrid, 2012: Berliner Strategie zur Biologischen Vielfalt. Begründung, Themenfelder und strategische Ziele. Berlin. Zugriff: [https://www.berlin.de/senuvk/natur\\_gruen/naturschutz/downloads/publikationen/biologische\\_vielfalt\\_strategie.pdf](https://www.berlin.de/senuvk/natur_gruen/naturschutz/downloads/publikationen/biologische_vielfalt_strategie.pdf).
- Mann, Gunter; Klinger, Tobias, 2015: Rückhalt, Abflussverzögerung, Speicherung. Regenwasserbewirtschaftung mit Dachbegrünung. *Green Building*, (06), S. 2-5.
- Minkos, Andrea; Dauert, Ute; Feigenspan, Stefan; Kessinger, Susan, 2018: Luftqualität 2017. Vorläufige Auswertung. Dessau-Roßlau.
- Minkos, Andrea; Dauert, Ute; Feigenspan, Stefan; Kessinger, Susan, 2019: Luftqualität 2018. Vorläufige Auswertung. Dessau-Roßlau.
- Morse, D. H., 1971: The Insectivorous Bird as an Adaptive Strategy. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2. Jg. (1), S. 177-200.

- Norton, Briony A.; Coutts, Andrew M.; Livesley, Stephen J.; Harris, Richard J.; Hunter, Annie M.; Williams, Nicholas S.G., 2015: Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134. Jg., S. 127–138. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204614002503>.
- Otto, Martin; Busch, Stefanie, 2009: ES HagelT - Modellierung der Hagelgefahr in der deutschen Kaskoversicherung. 16. Auflage. Schriftenreihe zu aktuellen Themen der Schadenversicherung. Zugriff: <https://www.es-rueck.de/184423/schriftenreihe-nr-16-es-hagelt.pdf> [abgerufen am 19. 10. 2018].
- Patt, Heinz; Jüpner, Robert (Hrsg.), 2013: Hochwasser-Handbuch. Auswirkungen und Schutz. 2. Auflage. Berlin.
- Pisello, Anna; Pignatta, Gloria; Castaldo, Veronica; Cotana, Franco, 2014: Experimental Analysis of Natural Gravel Covering as Cool Roofing and Cool Pavement. *Sustainability*, 6. Jg. (8), S. 4706–4722.
- Plass, Dietrich; Vos, Theo; Hornberg, Claudia; Scheidt-Nave, Christa; Zeeb, Hajo; Krämer, Alexander, 2014: Trends in disease burden in Germany: results, implications and limitations of the Global Burden of Disease study. *Deutsches Arzteblatt international*, 111. Jg. (38), S. 629–638.
- Popek, Robert; Gawrońska, Helena; Wrochna, Mariola; Gawroński, Stanisław W.; Saebø, Arne, 2013: Particulate matter on foliage of 13 woody species: deposition on surfaces and phytostabilisation in waxes—a 3-year study. *International journal of phytoremediation*, 15. Jg. (3), S. 245–256.
- Potts, Simon G., 2016: The assessment report on pollinators, pollination and food production: summary for policymakers. Bonn, Germany.
- Punge, H. J.; Kunz, M., 2016: Hail observations and hailstorm characteristics in Europe: A review. *Atmospheric Research*, 176-177, S. 159–184. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809516300291>.
- Puskeiler, Marc, 2013: Radarbasierte Analyse der Hagelgefährdung in Deutschland. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Fak. für Physik, Diss., 2013. Wissenschaftliche Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung des Karlsruher Instituts für Technologie, Bd. 59. Karlsruhe.
- Pysek, Petr, 1998: Alien and native species in Central European urban floras: a quantitative comparison. *Journal of Biogeography*, 25. Jg. (1), S. 155–163.
- Rennwald, Erwin, 2000: Rote Liste der Pflanzengesellschaften Deutschlands mit Anmerkungen zur Gefährdung. Schriftenreihe für Vegetationskunde, Heft 35, S. 393–592.
- Reznik, G.; Schmidt, E., 2008: Abscheidung von Feinstaub an Pflanzen bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten. *Chemie Ingenieur Technik*, 80. Jg. (12), S. 1849–1853.
- Richter, Eike; Loidl-Reisch, Cordula; Brix, Karen; Kirstein, Rike; Zelt, Jennifer; Zimmermann, Astrid, 2019: Nachhaltig geplante Außenanlagen. Empfehlungen zu Planung Bau und Bewirtschaftung von Bundesliegenschaften. 2018. Auflage. Zukunft Bauen, Band 16.
- Ries, Melanie; Reinhardt, Timm; Nigmann, Ursula; Balzer, Sandra, 2019: Analyse der bundesweiten Roten Listen zum Rückgang der Insekten in Deutschland. *Natur und Landschaft*, 94. Jg. (6/7), S. 236–244.
- Röck, Martin; Saade, Marcella Ruschi Mendes; Balouktsi, Maria; Rasmussen, Freja Nygaard; Birgisdottir, Harpa; Frischknecht, Rolf; Habert, Guillaume; Lützkendorf, Thomas; Passer, Alexander, 2020: Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258. Jg., S. 114107.
- Sæbø, A.; Popek, R.; Nawrot, B.; Hanslin, H. M.; Gawronska, H.; Gawronski, S. W., 2012: Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of The Total Environment*, 427-

428, S. 347–354. Zugriff:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969712004883>.

Schmauck, Sebastian, 2019: Dach- und Fassadenbegrünung - neue Lebensräume im Siedlungsbereich. Fakten, Argumente und Empfehlungen. BfN-Skripten, Bd. 538. Bonn.

Schmitt, Theo G.; Krüger, M.; Pfister, A.; Becker, M.; Mudersbach, Christoph; Fuchs, Lothar; Hoppe, Holger; Lakes, I., 2018: Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex. Korrespondenz Abwasser, Abfall, 65. Jg. (2), S. 113–120.

Schulz, Holger; Karrasch, Stefan; Bölke, Georg; Cyrus, Josef; Hornberg, Claudia, Pickford, Regina; Schneider, Alexandra; Witt, Christian; Hoffmann, Barbara, 2018: Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit. Positionspapier. Berlin.

UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.), 2017: Urban Mining. Ressourcenschonung im Anthropozän.

VKF – Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen, 2018: VKF Prüfbestimmungen Nr. 00a Allgemeiner Teil B. Bern. Zugriff: <https://services.vkg.ch/rest/public/georg/es/publikation/documents/ESPUB-745536923-384.pdf/content> [abgerufen am 29. 10. 2019].

Weber, Frauke; Kowarik, Ingo; Säumel, Ina, 2014: Herbaceous plants as filters: Immobilization of particulates along urban street corridors. Environmental Pollution, 186. Jg., S. 234–240. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749113006441>.

Weerakkody, Udeshika; Dover, John W.; Mitchell, Paul; Reiling, Kevin, 2018: Evaluating the impact of individual leaf traits on atmospheric particulate matter accumulation using natural and synthetic leaves. Urban Forestry & Urban Greening, 30. Jg., S. 98–107. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866717305563>.

Yang, Jun; Chang, Yamin; Yan, Pengbo, 2015: Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM<sub>2.5</sub> pollution. Atmospheric Pollution Research, 6. Jg. (2), S. 267–277. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S130910421530235X>.

## 10.2. Normen und Richtlinien

DAfStb – Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2017: DAfStb-Richtlinie: Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie). 2017. Auflage. DAfStb-Richtlinie. Berlin.

DIN 18515-1:2017-08, 2017: Außenwandbekleidungen - Grundsätze für Planung und Ausführung - Teil 1: Angemörtelte Fliesen oder Platten.

DIN 1986-100:2016-12, 2016: Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke -Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056.

DIN 4108-2:2013-02, 2013: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.

DIN 4108-3:2018-10, 2018: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden -Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.

DIN 68800-2:2012-02, 2012: Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau.

DIN EN 12056-3:2000, 2001: Schwerkraftentwässerungsanlagen innerhalb von Gebäuden. Teil 3: Dachentwässerung, Planung und Bemessung.

DIN EN 13583:2012-10, 2012: Abdichtungsbahnen - Bitumen-, Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen - Bestimmung des Widerstandes gegen Hagelschlag.

- DIN EN 14437:2005-02, 2005: Bestimmung des Abhebewiderstandes von Dachdeckungen mit Dachziegeln oder Dachsteinen (Dachpfannen) - Prüfverfahren für Dachsysteme.
- DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12, 2010: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten.
- DIN EN 1991-1-4:2010-12, 2010: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke -Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen Windlasten.
- DIN EN IEC 61215-2:2019-06, 2019: Terrestrische Photovoltaik (PV)-Module - Bauarteignung und Bauartzulassung - Teil 2: Prüfverfahren.
- DIN EN ISO 9806:2018-04, 2018: Solarenergie - Thermische Sonnenkollektoren - Prüfverfahren (ISO 9806:2017).
- FLL – Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (Hrsg.), 2018a: Dachbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für Planung Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen. 2018. Auflage. Bonn.
- FLL – Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (Hrsg.), 2018b: Fassadenbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für die Planung Ausführung und Pflege von Wand- und Fassadenbegrünungen. 2018. Auflage. Bonn.

### 10.3. Gesetze

- BRD – Bundesrepublik Deutschland, 2009: Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz). BNatSchG.
- BRD – Bundesrepublik Deutschland, 2013: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz). WHG.
- BW – Land Baden-Württemberg, 2015: Gesetz zum Schutz der Natur und zur Pflege der Landschaft (Naturschutzgesetz). NatSchG.
- EU – Europäische Union, 2008: Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa, Bd. 51.

### 10.4. Internetquellen

- IHME – Institute for Health Metrics and Evaluation, 2017: What risk factors drive the most death and disability combined? Deutschland. Zugriff: <http://www.healthdata.org/germany> [abgerufen am 1. 10. 2019].
- ZinCo GmbH, 2019: NEUE Drossel-Sets für Retentionsdächer. Zugriff: <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/zinco-gmbh/NEUE-Drossel-Sets-fuer-Retentionsdaecher/boxid/949468> [abgerufen am 8. 05. 2019].

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mustergebäude .....	7
Abbildung 2: Klimaänderungssignale und regionale Betroffenheit für die Klimaeinwirkungen .....	8
Abbildung 3: Überschlägige Strahlungsbilanz einer Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung (oben) und einer Sonnenschutzverglasung (unten) .....	11
Abbildung 4: Höhenlage der Verglasung und Auswirkungen auf die Tageslichtversorgung .....	12
Abbildung 5: Sonnenschutzsysteme .....	12
Abbildung 6: Verschattung unterschiedlich orientierter Fensterflächen.....	14
Abbildung 7: Verlauf der Erdoberflächentemperatur über die Tiefe zu unterschiedlichen Jahreszeiten. ....	16
Abbildung 8: Ausgangsszenario und Begrünungsszenarien für die Mikroklimasimulationen .....	18
Abbildung 9: Starkregenindex nach Schmitt et al. (2018).....	21
Abbildung 10: Abflussbeiwerte verschiedener Dachoberflächen .....	21
Abbildung 11: Warmdach mit freiliegender Abdichtungsbahn.....	25
Abbildung 12: Umkehrdach mit Kiesdeckung .....	25
Abbildung 13: Warmdach mit extensiver Begrünung .....	25
Abbildung 14: Retentionsdach, intensive Begrünung .....	26
Abbildung 15: Möglichkeiten der Regenwasserrückhaltung auf dem Gelände.....	27
Abbildung 16: Prinzipielle Ansätze zum Umgang mit Hochwasser nach BMI (2018) .....	29
Abbildung 17: Eintrittsmöglichkeiten von Wasser in das Gebäude.....	30
Abbildung 18: Leicht rückbaubarer Fußbodenaufbau .....	32
Abbildung 19: Wasserresistenter Fußbodenaufbau .....	32
Abbildung 20: Bauliche Schutzmaßnahmen gegen eindringendes Oberflächenwasser .....	33
Abbildung 21: Hagelindexkarte für Deutschland (Otto/Busch 2009: 11) .....	35
Abbildung 22: Prinzipieller Aufbau einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade .....	40
Abbildung 23: Windzonenkarte in Anlehnung an DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 .....	43
Abbildung 24: Zusätzliche Sicherung der PV-Anlagen über Seilnetz (oben) und Substrat (unten) .....	45
Abbildung 25: Einwirkung von Windkräften auf einem Flachdach aufgeständerte PV-Module .....	45
Abbildung 26: Einfluss der Gestaltung des Traufbereiches auf die Windsoglasten von Flachdächern .....	47
Abbildung 27: Mögliche Gestaltung eines abgerundeten Traufbereiches eines Gründaches.....	47

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abminderungsfaktoren typischer Sonnenschutzvorrichtungen .....	13
Tabelle 2: Im Hagelregister enthaltene WDVS-Systeme mit in Abhängigkeit des Dämmmaterials erzielten Hagelwiderstandsklassen .....	39
Tabelle 3: Schutzstrategien der Gebäudehülle gegenüber Hagel .....	42
Tabelle 4: Feinstaubgrenzwerte nach EU-Richtlinie und WHO-Empfehlung.....	52
Tabelle 5: Maßnahmen und deren Wirksamkeit auf Quartiersebene .....	60

## **Impressum**

Werner Sobek Green Technologies GmbH  
Albstr. 14  
70597 Stuttgart  
Germany

Tel +49.711.76750-00  
Fax +49.711.76750-44

greentech@wernersobek.com  
www.wernersobek.com

Registergericht Stuttgart, HRB 724117  
Geschäftsführer: Dipl.-Betriebswirt Kurt Denzel

Partners & Associate Partners:  
Prof. Dr. Klaus Sedlbauer  
Prof. Dr. Dr. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek  
Prof. Dr. Michael Bruse  
Prof. Dr. Susan Draeger

## **Autoren des vorliegenden Berichts**

Dr.-Ing. Marc-Steffen Fahrion  
Prof. Dr. Susan Draeger  
Dr. rer. nat. Michael Lakatos  
Prof. Dr. sc. hum. M. Arch. Dipl.-Ing. Timo Schmidt  
M. Eng. Christoph Nickl  
M. Sc. Moritz Brombacher  
M. Sc. Deekshitha Bangalore  
Dr.-Ing. Wolfgang Sundermann