

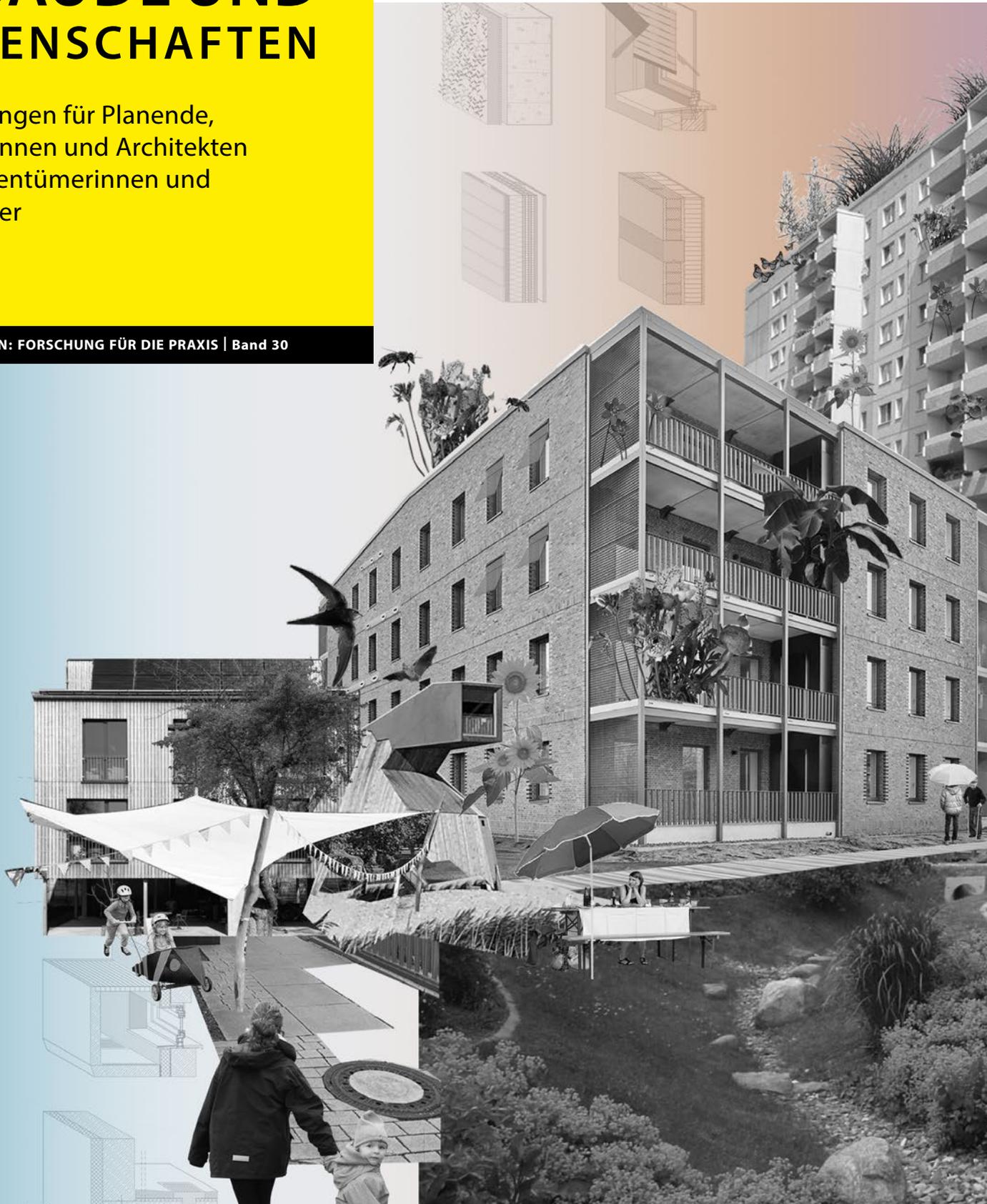
# KLIMAANGEPASSTE GEBÄUDE UND LIEGENSCHAFTEN

Empfehlungen für Planende,  
Architektinnen und Architekten  
sowie Eigentümerinnen und  
Eigentümer



**ZUKUNFT BAU**  
FÖRDERN FORSCHEN ENTWICKELN

ZUKUNFT BAUEN: FORSCHUNG FÜR DIE PRAXIS | Band 30



## Impressum

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Wissenschaftliche Begleitung

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat WB 6 „Bauen und Umwelt“

Svenja Binz  
svenja.binz@bbr.bund.de

Dr.-Ing. Stefan Haas  
stefan.haas@bbr.bund.de

### Autorinnen und Autoren

Institut für Akustik und Bauphysik, Universität Stuttgart  
Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner  
philip.leistner@iabp.uni-stuttgart.de

Adrian Eitle  
Pia Krause  
Linda Meier  
Holger Röseler

### Lektorat/Korrektorat

ORCA Affairs GmbH, Berlin

### Stand

Mai 2022

### Gestaltung

Gestaltungsgrundlage: [www.bussmanns.com](http://www.bussmanns.com)  
Erstellung: ORCA Affairs GmbH, Berlin  
Abbildungen: Institut für Akustik und Bauphysik, Universität Stuttgart

### Druck

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn  
Gedruckt auf Recyclingpapier

### Bestellungen

wb6@bbr.bund.de; Stichwort: KLIBAU

### Bildnachweis

Titelbild: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR); Svenja Binz; Caspar Sessler

### Nachdruck und Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten  
Nachdruck nur mit genauer Quellenangabe gestattet. Bitte senden Sie uns zwei Belegexemplare zu.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit jenen des Herausgebers übereinstimmen.

ISBN 978-3-87994-095-0

ISSN 2199-3521

Bonn 2022

# Klimaangepasste Gebäude und Liegenschaften

Empfehlungen für Planende, Architektinnen und Architekten  
sowie Eigentümerinnen und Eigentümer

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wohnen, Stadtentwicklung  
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Bundesinstitut  
für Bau-, Stadt- und  
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen  
und Raumordnung



**ZUKUNFT BAU**  
FÖRDERN FORSCHEN ENTWICKELN

Dieses Projekt wurde durchgeführt vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.17.7- 21.13 (ID 57)

Projektlaufzeit: 08.2021– 12.2021

# 1 Grußworte

Liebe Leserinnen und Leser,

das Klima ändert sich. Auch in Deutschland steigen Jahresmitteltemperaturen an, extreme Starkregen- und Hochwasserereignisse nehmen zu. Das Bauwesen zeigt gerade vor den aktuellen Klimafolgen wie Hitze, Starkregen, Hochwasser und auch Sturm seine Verletzbarkeit. Die Gefahren sind erkannt und werden in Veröffentlichungen des Weltklimarates (IPCC) Jahr für Jahr bestätigt. Der Bund entgegnet den Herausforderungen mit der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS). Doch was bedeuten die erforderlichen Maßnahmen für das Bauen und Planen von Gebäuden und Liegenschaften?

Gebäude, die wir heute planen und errichten, müssen – allein schon aus Gründen der Nachhaltigkeit – auch noch in 50 Jahren und mehr unter den dann vorherrschenden klimatischen Bedingungen funktionieren und zukünftigen Wetterextremen bestmöglich standhalten. Es ist dabei jedoch weder realistisch noch praktikabel, einen baulichen Komplettschutz anzustreben. Wir müssen lernen, besonders gefährdete und verletzbare Standorte und Gebäudeteile zu identifizieren und frühzeitig und gezielt Strategien der Anpassung zu entwickeln.

Dabei ist es besonders wichtig, dass Stadtentwicklung, Außenraum- und Bauplanung Hand in Hand arbeiten. Denn Klimaanpassung allein auf die Resilienz eines einzelnen Gebäudes abzustellen reicht nicht aus. Robuste, gut geplante Gebäude können am Ende sogar Anpassungsdruck abmildern. Retentionsmaßnahmen beispielsweise entlasten das öffentliche Kanalsystem bei extremen Starkregenereignissen. Gründächer reduzieren nachweislich Hitzeinseleffekte in Städten. Auch Biodiversität und Artenvielfalt dürfen wir durch zukünftige Bauaktivitäten nicht gefährden, sondern müssen durch gezielte Maßnahmen Synergien fördern.

Es gibt bereits viele kluge Ansätze für das klimaangepasste Bauen. Bautechnische Lösungen und innovative Bauprodukte sind vorhanden. Die Herausforderungen liegen in der Umsetzung. Dazu gehört auch die Sensibilisierung von Immobilieneigentümerinnen und -eigentümern. Viele schätzen die Gefährdung durch Extremwetter falsch ein. Planende sowie Architektinnen und Architekten müssen die Anpassung an den Klimawandel in der Gebäudeplanung zum Mainstream machen. Und es gilt, die mit der Anpassung verbundenen rechtlichen Regelungen im Bauwesen weiterzuentwickeln.

Mit der Städtebauförderung, der Energetischen Stadtanierung und der Förderung von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel in urbanen Räumen unterstützt der Bund heute schon insbesondere kommunale Umsetzungsmaßnahmen. Forschende der Universität Stuttgart haben, auf Basis eines Forschungsberichtes von Werner Sobek Green Technologies, diese Informationsbroschüre zum Klimaangepassten Bauen entwickelt. Gefördert wurde das Projekt durch das Innovationsprogramm Zukunft Bau. Entstanden ist nicht nur eine theoretische Einordnung aktueller Herausforderungen in diesem Themenfeld, sondern auch eine praxisorientierte Umsetzungshilfe.

Ich wünsche Ihnen eine informative Lektüre!



Dr. Robert Kaltenbrunner  
Stellvertretender Leiter des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)

**Liebe Leserinnen und Leser,**

die nachhaltige Gestaltung unserer gebauten Umwelt trägt zählbar und spürbar zur Erhaltung unserer Lebensgrundlagen bei. Sie bremst den Klimawandel und erhöht die Resilienz gegenüber seinen Folgen. Die Umsetzung klimaangepasster Gebäude und Liegenschaften ist wegen der vielen konkreten und zugleich komplexen Gestaltungsaspekte eine Gemeinschaftsaufgabe. Um sie bewusst, ganzheitlich und wirksam zu bewältigen, greift diese Broschüre die Themenfelder und Gestaltungsspielräume auf.

Sowohl für eine fachübergreifende Zielgruppe, als auch für (Fach-) Planende sowie Eigentümerinnen und Eigentümer werden Handlungsempfehlungen zur Anpassung an den Klimawandel aufgezeigt. Sie sind nicht nur auf das Gebäude gerichtet, sondern auch auf die Außenraumgestaltung von Liegenschaften, einschließlich Flora und Fauna. Gerade aus diesem Zusammenspiel entwickeln sich vielgestaltige Potentiale zur Klimaanpassung mit Funktionalität, Qualität und Ästhetik.

Die ganzheitliche Transformation von Quartieren, Liegenschaften und Gebäuden kann mit integrierten, inklusiven und vorausschauenden Planungsansätzen gelingen. Diese Gewissheit beziehen wir aus vielen Jahren Forschung und Entwicklung, Lehre und Weiterbildung zur Bauphysik, zu klima- und kultur(en)gerechtem Bauen, zur Ressourcen- und Energieeffizienz. Viel Wissen ist anwendungsreif und viele Menschen nutzen dieses Wissen, erweitern es und übertragen es auf reale Bauprojekte. Dazu, so hoffen wir, können auch die Impulse dieser Broschüre beitragen.

Wir sind gespannt, wie Sie diese Impulse ausgestalten, welche Eindrücke, Erfahrungen und Erkenntnisse Sie dabei sammeln.

Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner,  
Adrian Eitle, Pia Krause, Linda Meier, Holger Röseler

### **Nutzungshinweis/Haftungsausschluss**

Diese Broschüre wurde mit großer Sorgfalt erstellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden.

Die Verantwortlichkeit für die konkrete Planung und die Einhaltung der anerkannten Regeln der Technik liegt im Einzelfall allein beim Planer. Ein Vertragsverhältnis oder vertragsähnliches Verhältnis wird durch diese Broschüre nicht geschlossen. Für die Inhalte der Sekundärquellen sind die Autorinnen und Autoren und der Herausgeber nicht verantwortlich.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grußworte</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Zielsetzung</b> .....	<b>10</b>
2.1	Zielgruppe und Aufbau .....	10
2.2	Politische Rahmenbedingungen .....	12
2.3	Kernaussagen .....	14
<b>3</b>	<b>Klimawandel</b> .....	<b>17</b>
3.1	Grundlagen .....	17
3.2	Klimaszenarien .....	19
3.3	Klimaschutz und -anpassung .....	20
<b>4</b>	<b>Einfluss des Bauwesens</b> .....	<b>22</b>
4.1	Flächenverbrauch .....	23
4.2	Energie und Emissionen .....	23
4.3	Abfall .....	24
4.4	Baumaterialien .....	24
4.5	Lösungspotenziale Klimaschutz .....	25
<b>5</b>	<b>Klima und Wetter</b> .....	<b>26</b>
5.1	Wetterelemente und -faktoren .....	26
5.1.1	Temperatur .....	26
5.1.2	Solarstrahlung .....	27
5.1.3	Niederschlag .....	28
5.1.4	Wind .....	29
5.1.5	Dürre .....	30
5.2	Stadtklima .....	30
5.3	Kenntage, Extremereignisse, Gefahren .....	31
5.4	Betroffenheit, Gefährdung, Verletzbarkeit und Risiko .....	32
<b>6</b>	<b>Klimaanpassungsmaßnahmen im Gebauten</b> .....	<b>36</b>
6.1	Relevanz und Dringlichkeit von Anpassungsmaßnahmen .....	36
6.2	Potenziale und Wirkungen von Anpassungsmaßnahmen .....	38

<b>7</b>	<b>Zielsetzung und Methodik</b>	<b>43</b>
7.1	Beschreibung der Musterliegenschaft	44
7.2	Methodik	46
<b>8</b>	<b>Liegenschaft und Außenraum</b>	<b>48</b>
8.1	Urbane Oberflächen	49
8.1.1	Schadensbilder	49
8.1.2	Anpassung an Hitze	51
8.1.3	Anpassung an Starkregen und Hochwasser	53
8.1.4	Anpassung an Hagel, Wind und Sturm	55
8.2	Vegetation	56
8.2.1	Schadensbilder	59
8.2.2	Anpassung an Hitze	61
8.2.3	Anpassung an Starkregen	65
8.2.4	Anpassung an Wind	67
<b>9</b>	<b>Bauteilkatalog</b>	<b>70</b>
9.1	Vertikale Oberflächen	71
9.1.1	Wärmedämmverbundsystem	72
9.1.2	Zweischaliges Mauerwerk nichthinterlüftet	74
9.1.3	Fachwerk mit Innendämmung	76
9.1.4	Hinterlüftete Holzmassivbaukonstruktion	78
9.1.5	Porenbetonkonstruktion	80
9.1.6	Hinterlüftete Holzleichtbaukonstruktion	82
9.1.7	Porenbetonkonstruktion mit Grünfassade	84
9.1.8	Fenster	86
9.1.9	Sonnenschutzsysteme	88
9.2	Dachkonstruktion	91
9.2.1	Warmdach	92
9.2.2	Kaltdach	94
9.2.3	Gründach extensiv und intensiv	96
9.2.4	Satteldach	98
9.2.5	Oberlichter und Lichtkuppeln	100
9.3	Flutgefährdeter Bereich und erdberührte Bauteile	103
9.3.1	Außenwände flutgefährdeter Bereich	104
9.3.2	Weißer Wanne	106
9.3.3	Gebäudeöffnungen erdberührter Bauteile	108

<b>10</b>	<b>Handlungsempfehlungen</b> .....	<b>110</b>
10.1	Anpassung an Hitze und Strahlung .....	110
10.2	Anpassung an Stark- und Schlagregen sowie Hochwasser .....	114
10.3	Anpassung an Hagel und Sturm .....	117
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>119</b>
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>120</b>

# 2 Zielsetzung

Das Klima ändert sich. Auch in Deutschland sind die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels bereits heute mess- und spürbar. Infolge der Klimaveränderungen erhöhen sich Extremwetterereignisse wie Hitze, Starkregen und Hochwasser sowie Sturm und Hagel. Das Bauwesen ist als einer der ressourcenintensivsten Wirtschaftssektoren nicht nur Mitverursacher für die klimatischen Veränderungen, sondern auch in besonderen Maßen von den Extremwetterereignissen betroffen. Liegenschaften und Gebäude in Deutschland sind an diese klimatischen Veränderungen in vielen Fällen noch nicht flächendeckend angepasst. Gleichzeitig tragen gezielte (bauliche) Anpassungsmaßnahmen maßgebend zum Objektschutz bis hin zur Förderung der Gesundheit und körperlichen Unversehrtheit von Mensch und Tier bei.

An diese Herausforderungen, Handlungsfelder und Gestaltungsspielräume knüpfen die Inhalte dieser Broschüre an. Ziel ist einerseits, über die Auswirkungen und Hintergründe des anthropogenen Klimawandels aufzuklären, und andererseits, fachliche und bautechnische Handlungsempfehlungen für die Bereiche Liegenschaft und Gebäude bereitzustellen. Damit sollen Planenden, Architektinnen und Architekten sowie Eigentümerinnen und Eigentümern Entscheidungshilfen und konkrete Lösungsvorschläge zur Erstellung einer klimaangepassten Architektur an die Hand gegeben werden.

Die Broschüre baut auf den Forschungsergebnissen des Projekts KLIBAU – *Weiterentwicklung und Konkretisierung des Klimaangepassten Bauens* auf (BBSR 2020). Auftragnehmer des Projekts war die Werner Sobek Green Technologies GmbH, Stuttgart. Die Ergebnisse wurden weiterentwickelt, konkretisiert und visualisiert. Als Resultat stehen den Leserinnen und Lesern umfangreiche bautechnische Handlungsempfehlungen zur Anpassung von Liegenschaften und Gebäuden an Extremwetterereignisse zur Verfügung.

## 2.1 Zielgruppe und Aufbau

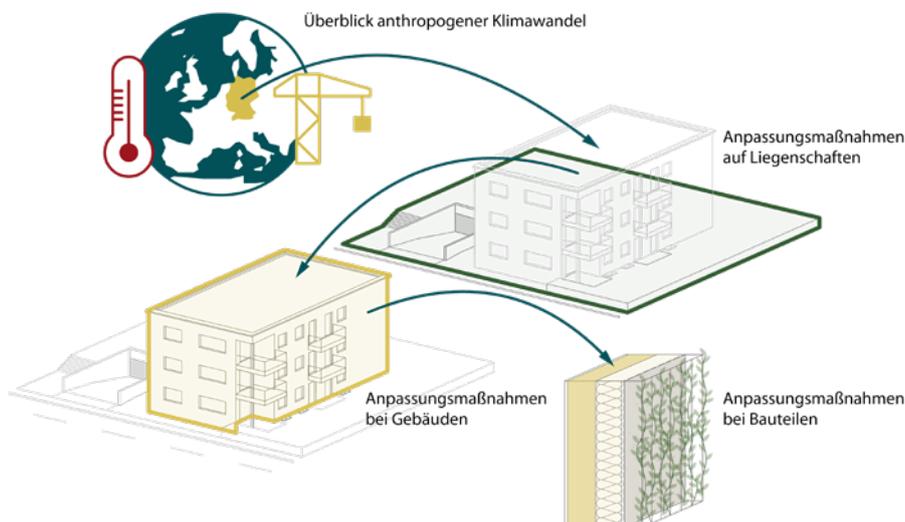
Die Broschüre untergliedert sich mit **TEIL A** und **TEIL B** in zwei Abschnitte. Es werden von der Darstellung allgemeiner, übergeordneter Sachverhalte zur Förderung des Verständnisses gegenüber Klimawandel und -schutz (**TEIL A**) bis ins Baudetail (**TEIL B**) Handlungsfelder sowie -empfehlungen zur Anpassung gegenüber Extremwetterereignissen in der gebauten Umwelt vorgestellt (► **Abb. 1**). **TEIL A** adressiert eine fachgruppenübergreifende Zielgruppe und dient dem allgemeinen Verständnis für die Bedeutung sowie die Auswirkungen des Klimawandels. **TEIL B** dient Planenden, Architektinnen und Architekten sowie Eigentümerinnen und Eigentümern als Planungs- und Entscheidungshilfe.

**TEIL A** gibt einen knappen Überblick über die Auswirkungen und Hintergründe des anthropogenen Klimawandels. Neben allgemeinen Grundlagen werden Klimaszenarien sowie die Differenzierung und das Zusammenspiel von Klimaschutz und -anpassung vorgestellt. Der Einfluss des Bauwesens als einer der ressourcenintensivsten Wirtschaftssektoren und dadurch Mitverursacher des anthropogenen Klimawandels wird im Speziellen thematisiert. Aufbauend wird hervorgehoben, dass Quartiere, Liegenschaften und Gebäude neben der Rolle als Mitverursacher insbesondere auch als Betroffene des Klimawandels zu verstehen sind. Vulnerabilitäten von Liegenschaften und Gebäuden werden beispielhaft dargelegt. So kann der Gestaltung der gebauten Umwelt eine zentrale Rolle mit hohem Klimaschutz und -anpassungspotenzial zugeschrieben werden. Ausgewählte Potenziale, positive Wirkungen sowie Synergieeffekte von Anpassungsmaßnahmen in der gebauten Umwelt werden abschließend zusammenfassend dargestellt.

**TEIL B** gibt einen Überblick über konkrete bautechnische Handlungsempfehlungen für die Bereiche Liegenschaft und Gebäude. Klimaanpassungsmaßnahmen an die Extremwetterereignisse Hitze, Starkregen und Hochwasser sowie Sturm und Hagel werden am Beispiel einer fiktiven Liegenschaft sowie eines Referenzgebäudes behandelt. Einleitend werden Anpassungsmaßnahmen für den Außenraum bzw. das Grundstück definiert. Darauf aufbauend folgt ein Bauteilkatalog für Anpassungsmaßnahmen auf Bauteilebene. Der Katalog beinhaltet die folgenden Bauteilgruppen:

- Gebäudehülle mit vertikalen opaken und transparenten Oberflächen,
- (horizontale) Dachkonstruktionen inklusive Dachoberlichter sowie
- erdberührende Bauteile und flutgefährdete Bereiche.

Für jede Bauteilgruppe werden unterschiedliche Konstruktionsvarianten betrachtet und hinsichtlich des Klimaanpassungspotenzials diskutiert und visualisiert. Verknüpfungen und Synergien von Außen- und Innenraum sowie die Formulierung von Handlungsempfehlungen runden die Broschüre ab. Bautechnische Handlungsempfehlungen für die Bereiche Liegenschaft und Gebäude sollen einerseits helfen, klimaangepasste Baulösungen während der Planungsphase und damit bei Neubauten zu berücksichtigen. Andererseits können ausgewählte vorgestellte Maßnahmen im Bestand integriert werden. So soll sowohl kurz- als auch langfristig das klimaangepasste Bauen auf Liegenschaften und an Gebäuden gestärkt werden.



**Abb. 1** Aufbau der Broschüre. Es werden von der Darstellung allgemeiner, übergeordneter Sachverhalte zu Klimawandel und -schutz bis ins Baudetail Handlungsempfehlungen zur Anpassung gegenüber Extremwetterereignissen vorgestellt.

## 2.2 Politische Rahmenbedingungen

### Infobox

- **International/Global**
  - . Kyotoprotokoll
  - . Übereinkommen von Paris
  - . Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen
  - . Ziel für Nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen (SDGs)



- **EU**
  - . EU-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel
  - . EU-SDGs



- **National**
  - . Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)
  - . Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie



- **Regional**
  - . Beispielsweise Klimaschutz- oder Klimaanpassungsgesetze der Bundesländer



- **Lokal**
  - . Kommunale Klimaschutz- oder Klimaanpassungskonzepte



- **Liegenschaft**
  - . Gebäude
  - . Bauteile

Der Klimawandel und seine Folgen betreffen vielfältige Bereiche der Gesellschaft und der Natur. Um wirksamen Klimaschutz zu betreiben, bedarf es mehrerer Aktivitäten an vielen Orten und auf allen Politik- sowie Handlungsebenen. Analog ist der Umgang mit den dynamischen Folgen des Klimawandels als relativ neues Politik- und Planungsfeld anzugehen. Das Planungssystem in Deutschland beinhaltet unterschiedliche Ebenen. Die Rahmenbedingungen planerischen Handelns und ihre Wirkradien werden stets von höherer Ebene (Global→ EU→ Nation→ Bundesland→ Kommune→ Liegenschaft→ Gebäude) vorgegeben (► **Infobox**). Schlussendlich folgen die Planungsebenen vom räumlichen Radius einer Liegenschaft zum Gebäude und zu den Bauteilkomponenten. Bei baulichen Maßnahmen (Neubau oder Veränderung im Bestand) sind Gesetze, Verordnungen, Regelwerke und unterschiedliche bautechnische Standards zu beachten (► **Infobox**).

Im Jahr 2015 wurden auf **globaler Ebene** 17 Nachhaltigkeitsziele (SDGs, engl. Sustainable Development Goals) von den UN-Mitgliedstaaten im Rahmen der Agenda 2030 verabschiedet. Sie richten sich mit dem Ziel eines weltweiten menschenwürdigen Lebens bei simultaner Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen sowohl an Regierungen als auch an die Zivil- und Privatgesellschaft sowie an die Wissenschaft. Ökonomische, ökologische und soziale Aspekte sind hier inbegriffen. Die in dieser Broschüre primär adressierten Ziele sind *Ziel 3 Gesundheit und Wohlergehen*, *Ziel 9 Industrie, Innovation und Infrastruktur* sowie *Ziel 11 Nachhaltige Städte und Gemeinden* und *Ziel 13 Maßnahmen zum Klimaschutz*. Der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) wies in seinem Synthesebericht des 5. Sachstandsberichts im Jahr 2014 auf die zunehmende Bedeutung einer rechtzeitigen Anpassung an den Klimawandel hin. Es gelte, Risiken durch Klimaänderungen sowie massive Schäden und höhere Anpassungskosten zu reduzieren bzw. zu vermeiden. Ergänzt werden die SDGs von dem 2015 beschlossenen **Übereinkommen von Paris**. Alle Staaten sind völkerrechtlich verpflichtet, einen nationalen Klimaschutzbeitrag (Nationally Determined Contributions, NDCs) zu erarbeiten, Maßnahmen zu beschließen und umzusetzen. Zudem wurden Wege der Klimaanpassung beschlossen. Der Umgang mit Verlusten und Schäden durch den Klimawandel ist mit einem eigenständigen Artikel im Übereinkommen verankert.

Ein europäisches Indikatorenset misst Fortschritte bei der Erreichung der SDGs auf **europäischer Ebene**. Als Ergänzung des Klimaschutzes legte die EU-Kommission 2013 eine Anpassungsstrategie vor. Zuständig für Anpassungsbelange ist innerhalb der EU-Kommission die Generaldirektion Klimapolitik (DG CLIMA). Auch Plattformen (Climate-ADAPT) und weitere Informationsseiten wurden entwickelt.

Auf Bundesebene arbeitet die „Interministerielle Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel“ (IMA-A) daran, die Gemeinschaftsaufgabe Klimaanpassung aktiv voran zu bringen. Hier arbeiten alle Bundesministerien zusammen, stimmen sich regelmäßig über ihre Aktivitäten ab und setzen sich stetig neue Ziele, um die Voraussetzungen für die Klimaanpassung in Deutschland zu schaffen. Das „Behördenetzwerk Klimawandel und Anpassung“ unterstützt die IMAA durch ihr vielfältiges fachliches Know-how.

Die ersten Rahmenbedingungen zur Klimawandelanpassung auf Bundesebene legten die **Deutsche Anpassungsstrategie (DAS)** aus dem Jahre 2008 sowie der 2011 folgenden Aktionsplan Anpassung (APA I) fest. Seitdem werden Fortschritte in der Klimaanpassung systematisch in Aktionsplänen und Monitorings evaluiert. Begleitet wird das Monitoring durch Klimawirkungs- und Risikoanalysen (KWRA). Diese Broschüre widmet sich insbesondere dem Handlungsfeld „Bauwesen“. Mit der **Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie** von 2017 hat die Bundesregierung dargelegt, wie die SDGs in Deutschland umgesetzt werden sollen. Dafür wurden 63 konkrete Ziele beschlossen. Über die Umsetzung der Maßnahmen zur Zielerreichung legt die Regierung jährlich in einem Monitoringbericht Rechenschaft ab. Zudem veröffentlicht das Statistische Bundesamt alle zwei Jahre einen Indikatorenbericht als Basis zur Anpassung der Maßnahmen.

Neben den Regierungsorganen auf Bundes- und Landesebene griffen auch andere Behörden und Organisationen die Dringlichkeit der Klimaanpassung mit der Zeit auf und prägen die Diskussion maßgebend mit. Der Verantwortungs- und der Aktionsradius des **Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB)** deckt ein breites Spektrum ab, welches das Themenfeld der Klimafolgenanpassung im Gebauten betrifft.

Auch bei den gesetzlichen Regelungen hielt die Klimaanpassung Einzug. Unter anderem wurde der Klimawandel in der Raumplanung in der **Novelle des Raumordnungsgesetzes 2008** und der sogenannten **Klimaschutz-Novelle des Baugesetzbuches 2011** adressiert. Um die gestiegene Bedeutung zu betonen, erklärt §1 Absatz 5 Satz 2 **Baugesetzbuch (BauGB)** Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel zu Planungsleitsätzen:

*„... [Bauleitpläne] sollen dazu beitragen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sowie den Klimaschutz und die Klimaanpassung, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, zu fördern, sowie die städtebauliche Gestalt und das Orts- und Landschaftsbild baukulturell zu erhalten und zu entwickeln. Hierzu soll die städtebauliche Entwicklung vorrangig durch Maßnahmen der Innenentwicklung erfolgen.“*

Weiterhin wurden Änderungen **im besonderen Städtebaurecht** vorgenommen, so dass auch im **Rahmen des Stadtumbaus (§171a BauGB)** und bei der **städtebaulichen Sanierung (§136 BauGB)** die Klimaanpassung zu berücksichtigen ist.

Auch wird die Klimaanpassung mittlerweile in der Normung beachtet, u. a.:

- DIN SPEC 35811 (2014-08-00): Szenarioplanung – Empfehlungen für Entscheidungsprozesse im Zusammenhang mit dem Klimawandel,
- DIN EN ISO 14090 (2020-02-00): Anpassung an die Folgen des Klimawandels – Grundsätze, Anforderungen und Leitlinien (ISO 14090:2019); Deutsche Fassung EN ISO 14090:2019,
- Entwurf DIN/TS 35220 (2021-04-00): Anpassung von Normen an die Folgen des Klimawandels – Voraussetzungen und Umsetzung.

## Infobox

### Standards und Regelwerke

Bautechnische Standards und Regelwerke beruhen im Allgemeinen auf Erfahrungen. Sie werden zwar stetig fortgeschrieben, aber berücksichtigen i. d. R. keine Prognosen des Klimawandels. Infolgedessen sind diese Regelwerke für klimaangepasstes Bauen wenig aussagekräftig. Es müssen in Zukunft bauliche/technische Maßnahmen ergriffen werden, die vorausschauend mögliche Änderungen der Wetterereignisse und die damit einhergehenden Folgen berücksichtigen.

Vorsorgemaßnahmen als Teil einer klimaangepassten Bauentwicklung (BBSR 2015):

- Flächenvorsorge (erweitertes Umfeld des Gebäudes),
- Risikovorsorge (Versicherungen abschließen bzw. überprüfen),
- Verhaltensvorsorge (Einüben von Verhaltensmustern im Risikofall),
- Bauvorsorge (Instandsetzung und bauliche Ergänzung eines Gebäudes oder seiner Bauteile).

Der Entwurf DIN/TS 35220 (2021-04-00) ist vorgesehen als Ersatz für DIN SPEC 35220:2015-11 und DIN SPEC 35220 Beiblatt 1:2018-08. Er gibt Empfehlungen und Hinweise, die „...auf die Klärung ausgerichtet [sind], ob bestehende Normen im Zuge einer Überarbeitung an die Folgen des Klimawandels angepasst werden sollten bzw. ob die Notwendigkeit besteht, neue Normen zu erarbeiten, um die negativen Folgen des Klimawandels mit Hilfe normativer Festlegungen zu beherrschen.“

## 2.3 Kernaussagen

In der vorliegenden Broschüre werden die Folgen der erwarteten klimawandelbedingten Veränderungen, die Grundprinzipien der Handlungsmöglichkeiten sowie die daraus resultierenden Anpassungsmaßnahmen dargelegt. Die aufgezeigten Klimaanpassungsmaßnahmen stellen den Stand der Technik dar und sind eng mit den baukonstruktiven Anforderungen verknüpft.

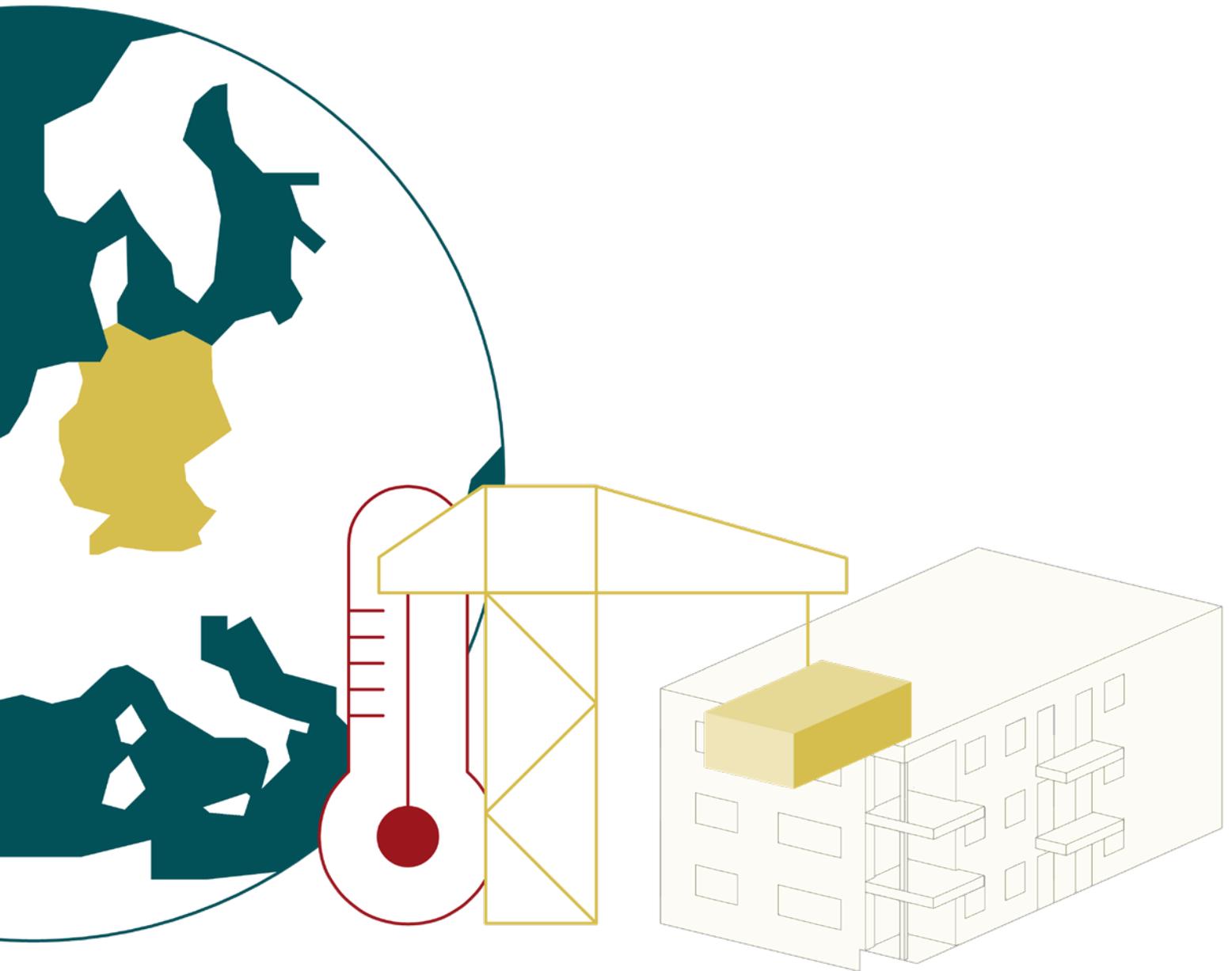
Mit zunehmender Tendenz und Häufigkeit zeigt sich, dass Gebäude, Liegenschaften und Quartiere den Folgen des Klimawandels in vielen Fällen nicht gewachsen sind. Die Klimaveränderungen werden u. a. in sich häufenden Extremwetterereignissen sichtbar. Diese dienen als Grundlage für spezifische Klimaanpassungsmaßnahmen, die auf Basis der folgenden Prinzipien zu konzipieren sind. Anfangs sind die Betroffenheit und die daraus resultierenden Gefährdungen abzuschätzen. Darauf aufbauend sind verschiedene Maßnahmen zu entwickeln und abzuwägen. Die fachgerechte Umsetzung und das anschließende Monitoring zeigen den Erfolg oder Misserfolg der Maßnahmen. Weiterführend wird ersichtlich, dass das Bauwesen aktuell einen großen Treiber des Klimawandels darstellt sowie für erhebliche Teile des globalen Ressourcenverbrauchs verantwortlich ist.

Vermehrt wirken Extremwetterereignisse auf die urbanen Oberflächen ein. Daraus resultieren städtische Hitzeinseln, Tropennächte, Überflutungen durch Starkregen und Sturmereignisse. Diese Auswirkungen verstärken sich infolge des veränderten Klimas, aber auch durch die veränderten physikalischen Merkmale urbaner Räume. Ein hoher Versiegelungsgrad, Baustoffe mit hohen Speichermassen und eine dichte Bebauung weisen veränderte Strahlungsbilanzen sowie geringere Verdunstungspotenziale und Retentionsmöglichkeiten auf. Die konsequente Entsiegelung bei einer gleichzeitigen Verknüpfung mit dem (Regen-)Wassermanagement wirkt sich synergetisch auf die Strahlungsbilanz, die Verdunstungsleistung und die Retentionskapazitäten der Oberflächen aus. Die gespeicherte Feuchte entzieht der Umgebung im Verdunstungsprozess Wärmeenergie, wobei der urbane Raum gekühlt wird. Baustoffe mit einer niedrigen Albedo und geringer Speichermasse sind zu bevorzugen. Die Verwendung von Vegetation führt diese Mechanismen zusammen. Vegetation erhöht die Verdunstungsleistung, vergrößert das Retentionspotenzial, vermindert den Spitzenabfluss, verschattet öffentliche Räume und fördert zudem die Biodiversität. Bei allen Maßnahmen sind die Klimawandeleinwirkungen und die daraus möglichen resultierenden Schadensbilder zu beachten.

Auf Bauteilebene können drei Kernaussagen formuliert werden. Erstens wird der sommerliche Wärmeschutz zukünftig an Bedeutung gewinnen. Hierbei ist der solare Wärmeeintrag durch die transparenten Flächen des Gebäudes von entscheidender Bedeutung. Wirksame Sonnenschutzmaßnahmen in Verbindung mit einer hohen wirksamen Speichermasse (zum Beispiel außenseitig gedämmte Massivwand) der Bauteile führen zu einer geringeren sommerlichen Hitzebelastung. Die Verknüpfung des Außen- und Innenraumes, beispielsweise durch die Verwendung von Bäumen zur Verschattung der Fassade, bietet großes Potenzial. Zweitens sind zum Überflutungsschutz (bei Starkregen oder Flusshochwasser) planerische, technische und konstruktive Maßnahmen zu kombinieren. Der technische Hochwasserschutz auf der Liegenschaft, wie die Verwendung von Dammbalkensystemen, ist nur in Verbindung mit konsequenten planerischen Maßnahmen erfolgreich. Diese Planungsschritte beinhalten beispielsweise die Vermeidung von Geländeneigungen zum Gebäude oder die Ausführung von bodengleichen, ebenen Eingängen. Zuletzt wirken viele Anpassungsmaßnahmen synergetisch. Retentionsdächer bieten im Starkregenfall nicht nur eine wirksame Wasserspeicherung und Abflussverzögerung, sondern tragen durch die erhöhte Verdunstungsleistung zur Gebäude- und Umgebungskühlung bei. Gleiches gilt für entsiegelte Vegetationsflächen auf der Liegenschaft.

# TEIL A

## Überblick anthropogener Klimawandel und Bauwesen



# 3 Klimawandel

Weltweit sind sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler einig (Deutsches Klima-Konsortium 2021).

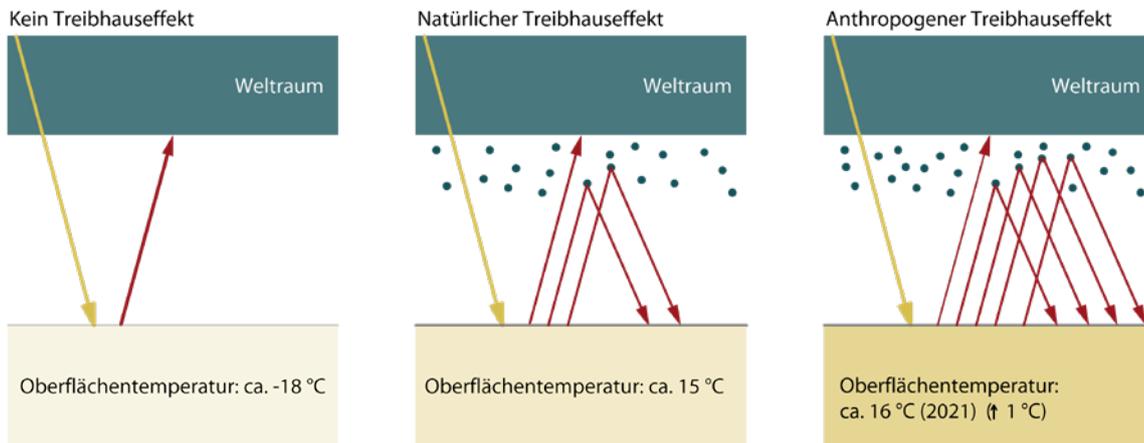
1. Der Klimawandel ist real.
2. Der Klimawandel ist menschengemacht.
3. Der Klimawandel ist eine Gefahr für die Menschheit und die Umwelt.
4. Wir können noch etwas tun!

Die vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen sind mit Sicherheit eine Ursache für die bisherigen und zukünftigen Erwärmungen des Klimasystems mit allen damit verbundenen Folgen für Mensch und Umwelt. Nach aktuellen Aussagen des Weltklimarates (6. Sachstandsbericht (IPCC 2021)) wird sich die Erde bei den aktuellen Entwicklungen bereits im Jahr 2030 um 1,5 K im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter erwärmen. Wetterextreme werden demnach häufiger auftreten, auch wenn der Temperaturanstieg auf 1,5 K begrenzt wird.

## 3.1 Grundlagen

Der schnell voranschreitende Klimawandel ist ein von menschlichem Handeln (anthropogen) verursachter Prozess, der konkrete Umwelt- und Klimaveränderungen zur Folge hat. Natürliche Systeme sowie anthropogene Infrastrukturen tun sich in der raschen Anpassung schwer.

Hauptursache für den Klimawandel ist die kontinuierliche Anreicherung der Erdatmosphäre mit sogenannten Treibhausgasen (THG, u. a. aus der Verbrennung fossiler Energieträger, Landwirtschaft und Entwaldung), die als Absorber von langwelliger (Wärme-)Strahlung fungieren. Es kommt zu einer Verstärkung des **natürlichen Treibhauseffektes**. Dieser Effekt ist seit ca. 200 Jahren bekannt, gilt in der Wissenschaft als unumstritten (IPCC 2014; Deutsches Klima-Konsortium 2021) und ist dafür verantwortlich, dass überhaupt lebensmögliche Temperaturen auf der Erde herrschen. Vergleichbar zum Glas eines Gewächshauses lassen THG die kurzwelligen Sonnenstrahlen „herein“, die Abstrahlung der langwelligen Wärmestrahlung wird hingegen teilweise blockiert (► **Abb. 2**). Ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt betrüge die globale Durchschnittstemperatur etwa  $-18\text{ °C}$  (Deutsches Klima-Konsortium 2021; DWD 2021b).



**Abb. 2** Vereinfachte Darstellung des Treibhauseffektes. Links: Erde ohne Treibhausgasereffekt. Mitte: natürlicher Treibhauseffekt ohne menschlichen Einfluss. Rechts: menschengemachter Treibhauseffekt (Deutsches Klima-Konsortium 2021).

## Infobox

### Vulnerabilität, vulnerabel

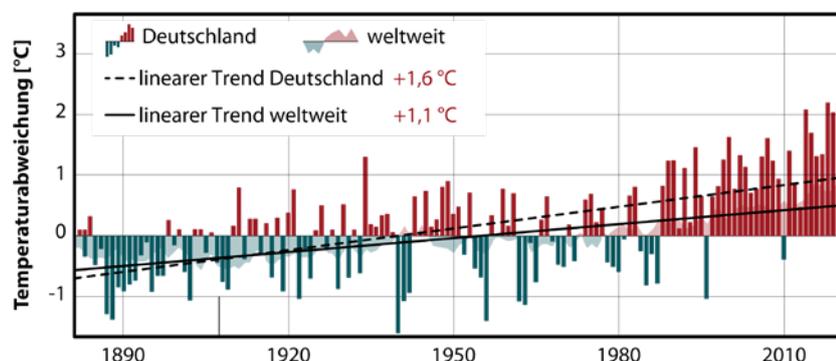
Bezeichnet Verletzlichkeit, beispielsweise gegenüber dem Klimawandel. Das Maß, zu dem ein System gegenüber nachteiligen Auswirkungen der Klimaänderung, einschließlich Klimavariabilität und Extremwerte, anfällig ist und nicht damit umgehen kann. Vulnerabilität ist eine Funktion der Art, des Ausmaßes und der Geschwindigkeit der Klimaänderung und -schwankung, der ein System ausgesetzt ist, seiner Sensitivität und seiner Anpassungskapazität (UBA 2007).

### Resilienz, resilient

Bezeichnet Widerstandskraft, beispielsweise gegen den Klimawandel; Die Fähigkeit eines Sozial- oder Ökosystems, Störungen aufzunehmen und gleichzeitig dieselbe Grundstruktur und Funktionsweisen, die Kapazität zur Selbstorganisation sowie die Kapazität, sich an Stress und Veränderungen anzupassen, zu bewahren (UBA 2007).

Mit der zunehmenden Konzentration dieser THG steigt die atmosphärische Gegenstrahlung und folglich die Temperaturen der Erdatmosphäre. Die wichtigsten THG (und somit Verstärker des Treibhauseffektes) sind Wasserdampf, Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Distickstoffmonoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ , Lachgas). Sie haben eine unterschiedliche Verweildauer in der Atmosphäre und werden Spurengase genannt, da sie nur einen sehr geringen Anteil der Erdatmosphäre ausmachen. Trotzdem sind sie in der Lage, den Strahlungshaushalt der Erde maßgeblich zu beeinflussen. Seit 1750 stiegen die Konzentrationen der Spurenstoffe in der Atmosphäre durch menschlichen Einfluss stark an ( $\text{CO}_2$ : 147 %;  $\text{CH}_4$ : 1156 %;  $\text{N}_2\text{O}$ : 123 %) (IPCC 2021).

Zwischen 2011 und 2020 war die globale Oberflächentemperatur um 1,1 K höher als zwischen 1850 und 1900, über Land sogar um 1,6 K (IPCC 2021). Laut Wetteraufzeichnungen war das vergangene Jahrzehnt in Deutschland das wärmste (► **Abb. 3**) (Deutsches Klima-Konsortium 2021). Die Auswirkungen des menschengemachten Klimawandels sind lokal verschieden. Im Zeitraum von 1970 bis 2019 wurden beispielsweise globale Temperaturerhöhungen von 0,2 K pro Dekade ermittelt, während es in Deutschland 0,4 K waren (DWD - Deutscher Wetterdienst 2020). Zudem erlebte Deutschland einige aufeinanderfolgende deutlich zu trockene Jahre. Gleichzeitig deutet sich an, dass häufiger und intensiver Starkregen ( $>20 \text{ L/m}^2$  pro Tag) fällt. Daher ist der Umgang mit den Umweltveränderungen und den potenziellen Schadensfolgen essenziell und stets räumlich spezifisch anzugehen.



**Abb. 3** Erwärmungstrend in Deutschland stärker als weltweit. Zu sehen sind Lufttemperaturanomalien zum vieljährigen Mittelwert 1961-1990 für Deutschland und weltweit (DWD 2021b).

Mit steigenden Temperaturen kann die Luft mehr Wasserdampf aufnehmen. Eine höhere Menge an absoluter Feuchte in der Luft führt zu regional stärker ausgeprägten Starkregenereignissen. Die Klimaanpassung muss daher ein Kernelement im künftigen Handeln sein. Zentrale Klimawandelauswirkungen sind folgende Phänomene:

- höhere Temperaturen mit mehr Hitzetagen bei gleichzeitiger Abnahme kalter Extreme,
- veränderte Niederschlagsmengen,
- häufigere und stärkere Extremwetterereignisse (Starkregen, Überschwemmungen, Stürme), da mehr Wärmeenergie im Klimasystem vorhanden ist,
- Abschmelzen der gefrorenen Süßwasservorräte (alpine, polare Gletscher und Permafrost) inklusive teilweise CO<sub>2</sub>-Freisetzung (Auftauen Permafrostboden),
- steigende Meeresspiegel durch Schmelzen des Eisschildes über Landmassen, sowie aufgrund der physikalischen Ausdehnung von Wasser bei Erwärmung (IPCC 2021).

Einzelne (Extrem-)Ereignisse wie ein (zu) heißer Sommer oder ein Starkregenereignis bestätigen nicht unmittelbar den Klimawandel. Entscheidend bei Klimawandelaussagen ist der langjährige Trend aus klimatologischen Beobachtungen. Dieser Trend ist objektiv messbar. Die Aussagekraft von Modellen (sog. Klimaszenarien, ► Kap. 3.2) ist durch stetige Weiterentwicklung und Validierung in der jüngeren Vergangenheit, u. a. seit dem neuesten Sachstandsbericht AR6 (Assessment Report Nr. 6) des Weltklimarates (IPCC ► Infobox), gestiegen. Zudem werden nach neuesten Erkenntnissen sogenannte Rückkopplungen oder Kippunkte befürchtet. Sollten gewisse Schwellenwerte von relevanten Elementen des Erdsystems erreicht werden, besteht die Gefahr, dass durch Rückkopplungen ein selbstverstärkender Prozess in Gang gerät, der weitere Systeme verändern kann und somit die Erderwärmung weiter begünstigt. Daher ist das Ziel des Übereinkommens von Paris, die globale Erwärmung unter 2 °C zu halten (idealerweise unter 1,5 °C), dringend anzustreben.

Eine Strategie zur Klimaanpassung ist ebenso wichtig wie der Klimaschutz. Ein Meilenstein in Deutschland war daher die Verabschiedung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel im Jahr 2008 mit dem nachfolgenden Aktionsplan Anpassung. In der Strategie geht es um die passgenaue Entwicklung und Implementierung von Klimaanpassungsmaßnahmen zur Reduzierung von potenziellen Schäden. Die Anforderungen an bebaute Strukturen sind vielschichtig, sodass die Berücksichtigung und die Umsetzung von ganzheitlich zu betrachtenden Prozessen, beispielsweise der Klimaanpassungszyklus, förderlich sind.

## 3.2 Klimaszenarien

Es ist nicht möglich, den Einfluss des Menschen auf die Entwicklung des Klimas exakt zu beschreiben. Annahmen über den wahrscheinlichen Verlauf sind jedoch möglich. In der Wissenschaft sind zwar physikalische Vorgänge (mit einigen Ausnahmen) bekannt, gesellschaftliche Entwicklungen sind jedoch nur sehr bedingt vorhersehbar. Klimamodelle beziehen daher unterschiedliche Möglichkeiten der zukünftigen gesellschaftlichen Verhältnisse in sogenannten Entwicklungspfaden der THG-Konzentrationen und unterschiedliche Klimänderungen ein. Mit voranschreitender Forschung

### Infobox

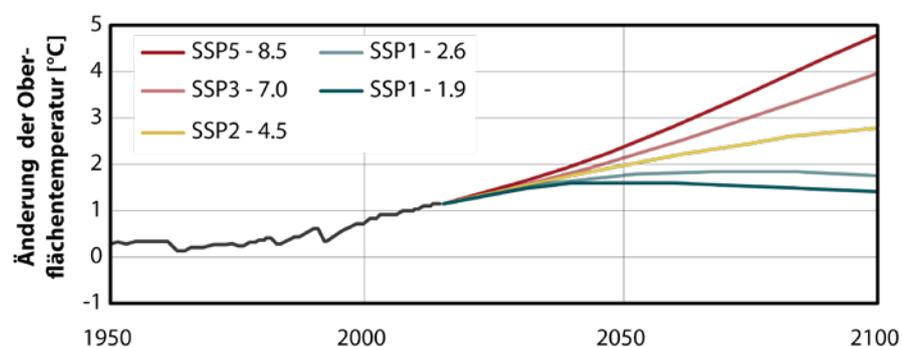
#### IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

Wichtige Meilensteine des internationalen Klimaschutzes sind einerseits der Brundtland-Bericht „Our Common Future“ des Jahres 1987, der erstmals das Ziel der Nachhaltigkeit thematisierte, und andererseits die Gründung des Weltklimarates IPCC 1988 aus der UNEP (Umweltschutzprogramm der Vereinten Nationen) und der WMO (Weltorganisation für Meteorologie). Internationale Forschende tragen im IPCC den aktuellen Stand der Klimaforschung zusammen und bewerten diesen aus wissenschaftlicher Sicht, ohne konkrete Lösungswege oder politische Handlungsempfehlungen zu geben. Lediglich Sachstandsberichte (seit 1990 aktuell 6 Stück) werden aus laufenden Forschungsprojekten erstellt. 2021 wurden für AR6 (IPCC 2021) ca. 14.000 wissenschaftliche Publikationen einbezogen und von 234 internationalen Forschenden ausgewertet.

entstanden bereits mehrere Generationen von Klimaszenarien, die sich sowohl in der Erstellung als auch in den charakteristischen Größen unterscheiden:

- SRES (Special Report on Emissions Scenarios)
- RCP (Repräsentative Konzentrationspfade, Representative Concentration Pathways - RCPs)
- SSP (Gemeinsame sozioökonomische Entwicklungspfade, Shared Socioeconomic Pathways)

Die seit AR6 (IPCC 2021) aktuellen fünf SSP-Szenarien (► **Abb. 4**) stellen neue Versionen der RCPs dar, die auf mehrfach genutzten sozioökonomischen Pfaden und daraus abgeleiteten neuen IAM (Integrated Assessment Model) Modellsimulationen basieren (DWD 2021d). Sie sind wichtig für Klimawandeleinfluss, -anpassung und -verletzlichkeitsstudien (IAV Impact, Adaptation, Vulnerability). Die SSPs repräsentieren den Bereich zwischen hoher und niedriger Herausforderung für Klimaschutz und -anpassung.



**Abb. 4** Darstellung des Verlaufs der Änderungen der globalen Oberflächentemperaturen nach SSP-Szenarien (IPCC2021).

Anpassungsmaßnahmen fallen in unterschiedlichen SSP-Szenarien verschieden aus. In SSP1 ist die Weltbevölkerung gut gebildet, wohlhabend und besitzt eine effektive Verwaltung, wodurch viele Möglichkeiten zur Anpassung an den Klimawandel vorliegen. In der SSP3-Welt fehlen hingegen internationale Kooperationen, die Bevölkerung lebt in weiten Teilen in Armut und der technologische Fortschritt ist langsam. Resultierend ist in SSP3 die Anpassungskapazität gering (Klima-Wiki 2021).

### 3.3 Klimaschutz und -anpassung

Der **Klimaschutz** ist seit vielen Jahren fester Bestandteil der Politik. Er hat sich als ein sehr dynamisches politisches Handlungsfeld seit dem Ende der 1970er-Jahre etabliert. Bereits damals wurden klimatische Anomalien wie anhaltende Trocken- und Dürreperioden identifiziert und 1979 die erste Klimakonferenz in Genf durch die World Meteorological Organization (WMO) einberufen. Diese Klimaschutzpolitik steht im Einklang mit weiteren internationalen Bestrebungen zur Etablierung einer nachhaltigen Entwicklung. Das prominenteste Beispiel ist hierbei die im Jahr 2015 auf dem Weltgipfel der UN in New York verabschiedete globale Agenda 2030. Hierbei entstanden 17 globale SDG-Ziele für eine nachhaltige Entwicklung.

Um wirksamen Klimaschutz zu betreiben, bedarf es mehrerer Aktivitäten an vielen Orten, auf allen Politik- und Handlungsebenen. Ebenso verhält es sich mit der Klimawandelanpassung, die erst später ins allgemeine Bewusstsein und den Fokus der Wissenschaft rückte.

Klimawandelfolgen betreffen vielfältige Bereiche des menschlichen Daseins wie Gesundheit, biologische Vielfalt und Bauwesen (Bundesregierung 2008). Entscheidungen sowie Maßnahmenumsetzungen beinhalten oft lange Zeithorizonte. Eine ganzheitlich gedachte Klimawandelanpassung sollte daher neben Klimaaspekten den Wandel der Gesellschaft und ihre Verwundbarkeit integrieren. Beispielsweise muss beim Thema „Hitze in der Stadt“ das demografisch bedingte zunehmende Alter und somit die Verwundbarkeit der Bevölkerung berücksichtigt werden. Im gesamten urbanen Umfeld wächst die Notwendigkeit von Klimaanpassungsmaßnahmen an die regional unterschiedlich stark ausgeprägten Klimawandelfolgen. Somit gibt es keine allgemeingültige Lösung für jeden Standort. Hieraus folgt sowohl auf Planungs- als auch auf Handlungsebene die Notwendigkeit, Städte und Kommunen mit ihrer gebauten Umwelt optimal an die Einflüsse des Klimawandels anzupassen und sowohl gravierende ökologische, ökonomische als auch soziale Schäden zu verringern. Für die urbanen Gebiete ergeben sich durch eine solch adaptive, nachhaltige Planung sowohl Herausforderungen als auch Chancen.

Ein Vorgehen zur Klimawandelanpassung kann wie nachfolgend beschrieben stattfinden (► **Abb. 5**). Zunächst ist die Abschätzung der **Betroffenheit** der Kommune bzw. Region durch Klimaveränderungen anhand von Beobachtungsdaten, Klimaparametern, -modellen, Emissionsszenarien und regionalen Klimaänderungen zu ermitteln. Die ermittelten künftigen Klimaveränderungen und damit einhergehende Klimaauswirkungen, Anpassungskapazitäten, Analysen von Chancen und **Gefährdungen** sowie die sich hieraus ergebende Vulnerabilität sind zu untersuchen. **Maßnahmen** werden vorgeschlagen und Anpassungsoptionen verglichen. Es geht insbesondere um Anpassungsoptionen, die in der entsprechenden Region oder Kommune als wichtig erachtet werden. Für die ausgewählten Maßnahmen werden die Randbedingungen zur **Umsetzung** sowie möglicherweise auftretende Schwierigkeiten ermittelt. Ziel dieses Schrittes ist eine Integration und Umsetzung der geplanten Anpassungsoptionen. Der Erfolg bzw. Misserfolg der Anpassungsmaßnahmen ist mithilfe eines Klimafolgen- und Anpassungs**monitorings** sowie durch **Evaluationen** zu überwachen und zu bewerten (BBSR 2016).



## Infobox

### Klimaschutz

Auch *Mitigation*, bezeichnet alle auf die Begrenzung der globalen Erwärmung gerichteten Maßnahmen, das heißt vor allem Maßnahmen zur Minderung der durch menschliches Handeln verursachten Treibhausgasemissionen (UBA 2007). Die Mitigation steht seit langer Zeit im Fokus von Wissenschaft und politischen Prozessen.

### Klimaanpassung

Auch *Adaptation*, bezeichnet den Prozess zur Ausrichtung auf das tatsächliche oder erwartete Klima inklusive zugehöriger Auswirkungen (Klimawandelfolgen). Ziel ist der Schutz des Menschen sowie die Verringerung bzw. Vermeidung dieser Schäden. Im Gegensatz zum Klimaschutz wirkt die Anpassung nur in ihrem Umsetzungsort, da sich Klimawandelfolgen und Risiken örtlich stark unterscheiden können. Die Klimaanpassung hat die Erhöhung der Resilienz und Reduzierung der Vulnerabilität zum Ziel.

**Abb. 5** Vorgehen zur Klimawandelanpassung (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR 2016).

# 4 Einfluss des Bauwesens

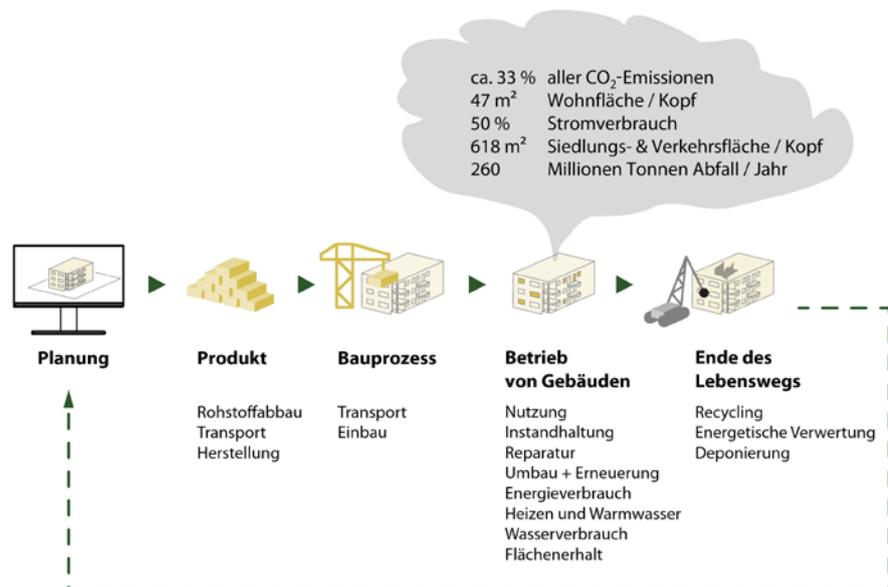
## Infobox

### LCA – Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Assessment)

Auch Ökobilanz genannt, stellt ein normiertes Verfahren für die Quantifizierung globaler Umweltwirkungen eines Produktes während seines Lebens inklusive Vorketten (beispielsweise Abbau und Transport von Materialien) und Lebensende (Recycling oder Deponie) dar. Dabei werden dem Produkt die Energie- und Stoffströme sowie Abfall- und Emissionsmengen zugerechnet, die für Rohstoffgewinnung, Herstellung, Transport, Gebrauch und Entsorgung anfallen. Als Hilfsmittel im Bauwesen kann die Online-Datenbank „ÖKOBAUDAT“ verwendet werden ([www.oekobaudat.de](http://www.oekobaudat.de)). Sie beinhaltet produktspezifische Daten aus Umweltproduktdeklarationen, generische Daten sowie repräsentative Datensätze.

Das Bauwesen in Form von Materialabbau und -herstellung (Baustoffe) sowie Errichtung und Betrieb von Gebäuden und Infrastruktur zieht vielfältige Umweltwirkungen nach sich und trägt erheblich zur globalen Erderwärmung bei. Beziffert werden kann dies über den Ressourcenverbrauch (Fläche, Rohstoffe und Energie, ► Kap. 4.1 - 4.4) sowie die ausgestoßenen Emissionen entlang der Gebäude-Lebensdauer. Die Quantifizierung globaler Umweltwirkungen ermöglicht die Lebenszyklusanalyse (LCA, ► Infobox). Die Umweltwirkungen variieren mit der Wahl der Techniken und Materialien für Gebäude (Neubau und Bestand/Sanierung), aber auch mit einhergehenden Um- und Ausbaubedarfen der Verkehrs- und Versorgungsinfrastrukturen (beispielsweise Neuversiegelung, Rohstoffaufwand). Viele Risiken des Klimawandels können durch funktionierende Anpassungsmaßnahmen reduziert werden. Mehr Klimaschutz bedeutet in den meisten Fällen auch, dass der Anpassungsdruck geringer wird. Guter Klimaschutz in Verbindung mit Ressourcenschonung ist also eine wichtige Grundlage für die Anpassung an den Klimawandel.

Lebensdauern von Gebäuden können bei regelmäßiger Instandhaltung 100 Jahre übersteigen. Zeithorizonte einer vorausschauenden Gebäudeplanung und Stadtentwicklung reichen somit viele Jahre in die Zukunft. Das Mitdenken der Klimawandelfolgen bis Mitte dieses Jahrhunderts ist somit von grundlegender Bedeutung. Seit 2009 steigt das Bauvolumen im Baugewerbe in Deutschland nach Haupt- und Ausbaugewerbe stetig. Die gesamte Bauproduktion, einschließlich nicht werterhöhender Reparaturen, lag 2019 bei ca. 290 Milliarden € (Statistisches Bundesamt 2020a). Im Jahr 2020 wurden in Deutschland rund 113.000 Wohngebäude und 24.000 Nichtwohngebäude errichtet (Statistisches Bundesamt 2021c). Im Folgenden werden einige ausgewählte Beispiele der Umweltaspekte im Bauwesen genannt (► Abb. 6).



**Abb. 6** Darstellung von Einflüssen des Bausektors über den Lebenszyklus von Gebäuden in Deutschland im 21. Jahrhundert (Statistisches Bundesamt 2020a, 2020b).

## 4.1 Flächenverbrauch

In Deutschland stieg die **Siedlungs- und Verkehrsfläche pro Kopf** im Zeitraum zwischen 1950 und 2018 von 300 m<sup>2</sup> auf 618 m<sup>2</sup>. Sie wuchs in den Jahren 2016 bis 2019 um insgesamt durchschnittlich 52 ha/Tag (Statistisches Bundesamt 2021d). Analog stieg in Deutschland die **Wohnfläche pro Kopf** zwischen 1950 und 2020 von weniger als 20 m<sup>2</sup> auf ca. 47 m<sup>2</sup> (Statistisches Bundesamt 2021e). Vom Ziel der Bundesregierung, den bundesweit durchschnittlichen Anstieg bis zum Jahr 2030 auf unter 30 ha/Tag zu begrenzen (Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie), ist dieser aktuelle Flächenverbrauch noch weit entfernt. Zumal der Zeithorizont des Ziels bereits um 10 Jahre nach hinten datiert wurde und ursprünglich für das Jahr 2020 vorgesehen war. Die Zerschneidung der Lebensräume von Flora und Fauna und die mikroklimatischen Änderungen eines versiegelten Bodens sind die Folgen.

## 4.2 Energie und Emissionen

In **Deutschland** gibt es Stand Mai 2021 ca. 19 Millionen Wohngebäude, was einer Fläche von insgesamt rund 3,81 Milliarden m<sup>2</sup> entspricht (Statista 2021). Es gibt zudem ungefähr 2 Millionen Nichtwohngebäude wie Büro- oder Handelsimmobilien, Hotels und weitere Gebäude des öffentlichen Lebens. Obwohl diese mengenmäßig in der Unterzahl liegen, nehmen sie aufgrund ihrer Fläche jedoch rund ein Drittel (34 %) des endenergiebezogenen Gebäudeenergieverbrauchs ein. Dieser lag 2020 für alle Gebäude bei ca. 870 TWh (= Terawattstunden; 1 TWh entspricht einer Milliarde Kilowattstunden). Der Anteil der Wohngebäude hieran beträgt 66 %, wovon der Großteil für Raumwärme (ca. 76 %) und Warmwasser anfällt.

Die Versorgung der Gebäude mit Energie beruht primär auf Heizwärme (ca. 60 %) und Warmwasser (ca. 12 %). Dieser Verbrauch verursacht ca. ein Drittel (33 %) aller THG-Emissionen in Deutschland (THG aus direkter und indirekter Energie, ► **Infobox**). Hier von wird oft gut die Hälfte anderen Sektoren, in erster Linie der Energiewirtschaft (Fernwärme- und Stromproduktion), zugerechnet (BMU 2021). Ein Grund für die hohen Verbräuche ist, dass ca. zwei Drittel der Wohngebäude in Deutschland vor der ersten Wärmeschutzverordnung von 1979 gebaut wurden. 2020 waren mehr als die Hälfte der Wohngebäude teilsaniert, nur ca. 12 % der Wohngebäude in Deutschland vollsaniert oder ein Neubau und 36 % unsaniert. Der Energiebedarf unsanierter Gebäude ist deutlich höher (durchschnittlich 170 kWh/m<sup>2</sup>Jahr) als von Neubauten (durchschnittlich 103 kWh/m<sup>2</sup>Jahr) (BMU 2021).

### Infobox

#### Direkte Energie/Emissionen

Energie, die unmittelbar bei Konsumaktivitäten verbraucht wird. Beispiele: Kraftstoff beim Autofahren; Kohle, Gas oder Holz zum Heizen; Strom zur Beleuchtung von Häusern und Wohnungen. Daraus resultierende Emissionen sind analog direkte Emissionen.

#### Indirekte Energie/Emissionen

Analog als „Energiegehalt“, „graue“ oder „versteckte“ Energie bezeichnet; Energie, die für die Herstellung, den Transport, die Lagerung, den Rückbau und die Entsorgung der eingesetzten Materialien von Konsumgütern benötigt, jedoch erst dem Konsumenten des Produktes zugerechnet wird. Auch Energie von im Ausland erzeugten Konsumgütern fällt hierunter. Die hieraus resultierenden Emissionen sind analog indirekte Emissionen. Hauptsächlich ins Gewicht fallen aufgrund hoher Zementverbräuche bei Gebäuden Tragkonstruktionen, massive Wände, Zwischendecken und Kellerabschlüsse aus Beton. Dämmstoffe sparen i. d. R. mehr Energie und Emissionen ein, als für ihre Herstellung benötigt wird. Bei typischen Neubauten beträgt der Anteil an grauen oder verbauten Emissionen zwischen 10 und 16 kg CO<sub>2</sub>e/(m<sup>2</sup> Wohnfläche pro Jahr) (dena 2021).

## Infobox

### GWP – Globales Erderwärmungspotenzial (engl. Global Warming Potential)

Potenzial einer Substanz bzw. eines Prozesses, den Treibhauseffekt und somit die globale Erderwärmung voranzutreiben. Die Klimawirksamkeit (Potenzial, die Erde zu erwärmen) von klimarelevanten Spurengasen wie Methan, Lachgas und Ozon werden rechnerisch mit CO<sub>2</sub> in Bezug gesetzt. Dieses sogenannte CO<sub>2</sub>-Äquivalent (CO<sub>2</sub>e) ist demnach die Menge CO<sub>2</sub>, welche die vergleichbare Auswirkung aufweisen würde.

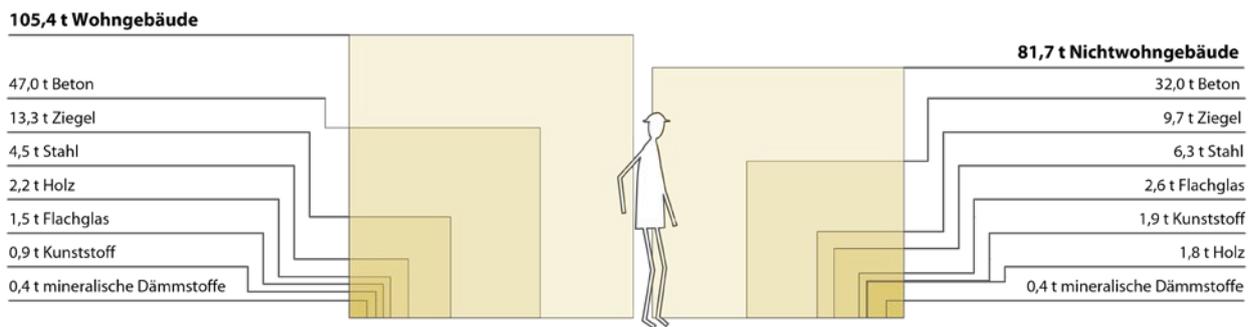
Global betrachtet ist die Lage ähnlich wie in Deutschland. Der Bau und Betrieb von Gebäuden hatte im Jahr 2019 den größten Anteil am globalen Gesamtenergieverbrauch (35 %) und den energiebezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen (38 %). In absoluten Zahlen stiegen die gebäudebezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen und erreichten 2019 ein Allzeithoch von ca. 10 GtCO<sub>2</sub>. Der Gebäudebereich steht für mehr als die Hälfte des globalen Stromverbrauchs (2019 ca. 55 %). Zwar sind die direkt von Gebäuden ausgestoßenen Emissionen konstant geblieben, doch nahmen die indirekten – wie sie etwa für die Stromgewinnung in Kraftwerken anfallen (► **Infobox**) – zu. Die Zunahme der Emissionen im Gebäudesektor liegt an der fortgesetzten Nutzung fossiler Energien wie Kohle, Öl und Gas für Heiz- und Kochzwecke in Verbindung mit höherem Stromverbrauch in Weltregionen, die noch stark auf fossile Brennstoffe setzen. Insgesamt hat sich somit der Bau- und Gebäudesektor im Jahr 2019 von den Pariser Klimaschutzziele entfernt (UNEP 2020). Die IEA (Internationale Energieagentur) schätzt, dass bis 2050 weltweit zwei Drittel aller Haushalte eine Klimaanlage besitzen. Aktuell entfallen ca. 20 % des gesamten Stromverbrauchs in Gebäuden auf ihre Kühlung. Die Kühlung ist somit global betrachtet der am schnellsten wachsende Energieverbrauch im Gebäudesektor und würde sich, unter aktuellen Bedingungen, bis 2050 mehr als verdreifachen (IEA 2018).

## 4.3 Abfall

In Deutschland beliefen sich die Bau- und Abbruchabfälle zwischen 2008 und 2018 auf ca. 190 bis ca. 230 Millionen Tonnen pro Jahr. Sie machten 2019 mehr als die Hälfte (55 %) des Abfallaufkommens nach Abfallströmen in Deutschland aus und liegen gewichtsbezogen auf Platz 1 aller Abfälle (Statistisches Bundesamt 2020b, 2021a, 2021b). Eine Vermeidung, Wiederverwendung, Recycling und Substitution gewisser Stoffe ist aufgrund der großen Volumenströme insbesondere im Bauwesen dringend geboten.

## 4.4 Baumaterialien

Die Auswahl der Baumaterialien beeinflusst die Lebensdauer, die Rückbaufähigkeit, das Recyclingpotenzial, den Energieeinsatz (auch graue Energie) und somit das globale Erderwärmungspotenzial (► **Infobox**) über den Lebenszyklus eines Gebäudes. Klimaangepasstes Bauen berücksichtigt im Idealfall stets oben genannte Kriterien und somit den Klimaschutz. Die Wahl von energiearmen Bauteilkomponenten und -materialien, die sortenrein getrennt und wieder dem Kreislauf zugeführt werden, entlastet die Umwelt und das Klima. In einigen Fällen verringert sich der Energieeinsatz für die Herstellung von Materialien durch Verwertung von Sekundärrohstoffen enorm (beispielsweise Aluminium aus Schrott). Da die Menge (gewichtsbezogen) verbauter Materialien in Gebäuden und Infrastruktur erheblich ist (► **Abb. 7**), können diese gebauten Strukturen bei hoher Recycling- und Rückbaufähigkeit als Materiallager für die Zukunft gesehen werden.



**Abb. 7** Darstellung von Einflüssen des Bausektors über den Lebenszyklus von Gebäuden in Deutschland im 21. Jahrhundert (Statistisches Bundesamt 2020a, 2020b).

## 4.5 Lösungspotenziale Klimaschutz

Anpassungsmaßnahmen sollten stets unter Berücksichtigung von Klimaschutzaspekten ausgeführt werden. Die richtige Abwägung zwischen Klimaschutz, Klimaanpassung und weiteren Zielen des Nachhaltigen Bauens kann unter Umständen komplex sein. Beispielsweise bindet verbautes Holz das zu Lebzeiten des Baumes eingelagerte CO<sub>2</sub>. Gleichzeitig gilt zu beachten, dass das CO<sub>2</sub> bei thermischer Verwertung wieder freigesetzt wird. Baumaterialien, die nach ihrer Erstnutzung wiederverwendet, also recycelt werden können, tragen ebenfalls zum Klimaschutz bei (► **Infobox**).

Die errechnete Rezyklatnutzung für 2010 im Hochbau betrug ungefähr 7 % (BBSR 2017). Sie könnte sich bei positiven Rahmenbedingungen bis 2050 auf ca. 20 % mehr als verdoppeln (dena 2021). Gebäude können bei hoher Wiederverwendung als urbane Materiallager gesehen werden. Urban Mining bezeichnet die Weiternutzung und Wiederverwendung der bereits verbauten Materialien. Damit lässt sich auch der Rohstoffknappheit begegnen und Importe lassen sich reduzieren. Schätzungen gehen in Deutschland von ca. 15 Milliarden Tonnen verbauten Materials aus. Die kreislaufbasierte Planung ist hierbei fundamental (dena 2021).

Viele Planungsfragen und Lösungen wurden bislang einzeln betrachtet. Das klimangepasste Bauen sollte nun ganzheitlich als ein System mit dem Klimaschutz entwickelt werden. Denn Anpassung als Vorsorgemaßnahme geht über den Objektschutz hinaus (BBSR 2021). Systemische Synergien liegen beispielsweise in der Entlastung des öffentlichen Kanalsystems bei extremen Starkregenereignissen durch Dach- und Fassadenbegrünung, Stadt- und Hausbäume, Retentionsflächen und Zisternen. Diese können zudem Hitzeinseleffekte in Städten nachweislich reduzieren.

Auch die Gebäudedämmung und der klimagerechte Gebäudeentwurf mit nachhaltigen Baustoffen bilden positive Wechselwirkungen. Ökobilanzierung, Ressourcenaspekte und Baukosten müssen mit möglichen Schäden an Gebäuden abgewogen werden. Bereits im Vorfeld kann heute eine grobe qualitative Bewertung der Konstruktionen mithilfe von Planungswerkzeugen wie GENERIS erfolgen (IBP 2020). Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung stellt außerdem das Ökobilanzierungstool eLCA (Bauteileditor) zur Verfügung, das im Rahmen des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB) verbindlich anzuwenden ist. Die Lebenszyklusbetrachtung und eine Kosten-Nutzen-Abwägung können somit Bauenden und Planenden bei der Bewertung und Entscheidung unterstützen, welche Maßnahmen sie treffen wollen (BBSR 2021).

### Infobox

#### Rückbaubarkeit/ Rezyklierbarkeit

Je sortenreiner ein Bauteil wieder getrennt werden kann, umso höher ist die Möglichkeit, den einzelnen Baustoff wieder zu verwerten oder wiederzuverwenden. Den Umgang mit Abfällen regelt das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG, BRD 2017) in seiner fünfstufigen Hierarchie:

- Vermeidung,
- Vorbereitung zur Wiederverwendung,
- Recycling,
- sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung,
- Beseitigung.

Essenziell für die sortenreine Trennung ist die Verbindungsart der einzelnen Schichten. Lösbare Verbindungen sind hierbei nicht lösbar verbunden, die nicht vollständig voneinander getrennt werden können, vorzuziehen.

Im Zertifizierungssystem BNB wird die Rückbaubarkeit und die Verwertbarkeit der Baustoffe im Kriterium 4.1.4. bewertet.

# 5 Klima und Wetter

## Infobox

### Wetter

Der augenblickliche, kurzfristige Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort. Seine räumliche und zeitliche Auflösung ist sehr klein, sodass sich das Wetter mehrmals täglich und von Ort zu Ort ändern kann. Die Wetterlage beschreibt das Wetter über eine größere örtliche und zeitliche Ausdehnung, meist tageweise. Bei konstanten Bedingungen über einige Tage hinweg wird von einer Großwetterlage gesprochen.

### Witterung

Betrachtung des allgemeinen und vorherrschenden Charakters des Wetters über einen Zeitraum von mehreren Tagen. Betrachtet werden primär die fühlbaren Elemente Lufttemperatur, Luftfeuchte, Niederschlag und Wind.

### Klima

Mittlerer Zustand der Klimaelemente über einen längeren Zeitraum von mehreren, in der Regel drei Jahrzehnten. Zurzeit wird der Zeitraum 1991 bis 2020 als Referenzperiode genutzt. Der Begriff Klima steht meist für das bodennahe Klima mit seinen Auswirkungen auf Mensch, Tier und Vegetation. Durch die Komplexität und dreidimensionale Kopplung der Prozesse werden auch die höheren Schichten wie die Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre zur Beschreibung des Klimasystems untersucht. Das Klima selbst kann nochmals in Mikro, Meso- und Makroklima unterteilt werden.

Der Begriff „Klima“ leitet sich vom griechischen Wort *klimatos* ab, was so viel wie Neigung bedeutet. Schon in der Antike war demnach die Abhängigkeit des Wettergeschehens vom Einfallswinkel des Sonnenstands bekannt. Heute beschreibt das Klima den langfristigen meteorologischen Zustand, während das Wetter die augenblickliche Situation an einem Ort darstellt (► **Infobox**).

Bei Prognosen wird ebenfalls anhand dieses zeitlichen Maßstabes zwischen Wetter- und Klimavorhersagen unterschieden. Wettervorhersagen der Medien sind Kurzfristvorhersagen, die auf Basis aktueller Modellinformationen laufend aktualisiert werden und sich auf einen 12- bis 72-Stunden-Zeitraum beziehen. Aufgrund der hohen Komplexität der Rechenmodelle sind längerfristige Vorhersagen gröber aufgelöst und damit unzuverlässiger. Langfristvorhersagen von mehr als 10 Tagen lassen nur noch großräumige Witterungstrends erkennen. Klimavorhersagen stellen die Entwicklung des Klimas im langfristigen Maßstab dar, von Jahreszeiten bis hin zu Zeiträumen von mehreren Dekaden.

## 5.1 Wetterelemente und -faktoren

Wetter- bzw. Klimaelemente sind die mess- und beobachtbaren physikalischen Größen zur Beschreibung des Wetters und Klimas. Dies sind Lufttemperatur und Luftfeuchte, der atmosphärische Druck, Wind, Niederschlag, Bewölkung sowie Strahlung, aber auch Sonnenscheindauer und Sichtweite. Der zeitliche und räumliche Maßstab spielt bei der Definition der Begriffe „Klima“, „Witterung“ und „Wetter“ eine große Rolle (► **Infobox**). Wirkungsfaktoren, die das Wetter bzw. Klima an einem Ort beeinflussen, werden Wetter- bzw. Klimafaktoren genannt. Die geografische Breite ist ein natürlicher Klimafaktor und beeinflusst maßgeblich die Sonnenstrahlung. Zu den anthropogenen Faktoren gehört die Bebauung, die beispielsweise zu Wärmeinseln führen kann.



### 5.1.1 Temperatur

Die Außenlufttemperatur ist in der Meteorologie eine der bedeutendsten Größen. Sie wird in zwei Metern Höhe gemessen und in der SI-Einheit Kelvin, im deutschsprachigen Raum in Grad Celsius (°C), angegeben. Extreme Werte sind nachteilig für die menschliche Gesundheit.

Die Lufttemperatur unterliegt im gemäßigten Klima starken saisonalen und tageszeitlichen Schwankungen. ► **Abb. 8** stellt den Tagesverlauf der Lufttemperatur in unterschiedlichen Höhen bei idealen und wolkenlosen Bedingungen dar. Nach Minimalwerten am frühen Morgen, etwa zur Zeit des Sonnenaufgangs, erreicht der Verlauf sein Maximum nachmittags, etwas später als der Zeitpunkt der höchsten Sonnenein-

strahlung. Diese Verschiebung ist durch das hohe Wärmespeichervermögen des Bodens und der Bauwerke bedingt, da die gespeicherte Energie kontinuierlich an die Umgebung abgegeben wird. Aus diesem Grund erfolgt der nächtliche Abfall der Temperatur auch langsamer als der Anstieg tagsüber.

Die täglichen Temperaturamplituden dringen bis ca. 50 Zentimeter in den Erdboden ein und werden mit zunehmender Tiefe abgemildert. Ab etwa 10 Metern Tiefe ist die Temperatur jahreszeitenunabhängig und nimmt einen Wert ein, der in etwa der Jahresdurchschnittstemperatur entspricht. Dies sind je nach Region ca. 10 °C.

Durch eine hohe Siedlungsdichte in Verbindung mit dem Wärmespeichervermögen bebauter Strukturen und der Bodenversiegelung sind urbane Regionen von extremer Hitze meist stärker betroffen als ländliche Räume. Bei großen Städten liegt der Temperaturunterschied bei bis zu 10 °C im Vergleich zum ländlichen Umland. Lang anhaltende Hitzeperioden (Temperaturen über 30 °C) führen zu einer extremen Aufheizung der bebauten Flächen während des Tages. Der langsame nächtliche Temperaturabfall kann nur noch zu einer geringen Abkühlung führen. Infolgedessen erwärmen sich auch die Innenräume der Gebäude. Die Folge sind unbehaglich hohe Temperaturen im Innenraum, die für den menschlichen Organismus sehr belastend sind. So ermittelte das Robert Koch-Institut (RKI) für den Sommer 2018 allein für Berlin und Hessen etwa 1.200 hitzebedingte Sterbefälle (UBA 2019a).

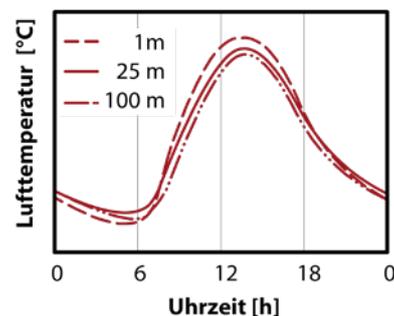


### 5.1.2 Solarstrahlung

Jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts sendet Strahlung in Form von elektromagnetischen Wellen aus. Je höher die Temperatur, desto kurzwelliger wird die Strahlung. Der strahlungsbedingte Energietransport funktioniert im Gegensatz zur Leitung oder Konvektion auch im Vakuum, sodass die Sonne die Hauptenergiequelle der Erde darstellt. Ein Teil ihrer kurzwelligigen Strahlung befindet sich im sichtbaren Bereich und wird als Licht wahrgenommen. Die Solarstrahlung beeinflusst das Klima maßgeblich, wobei nicht die gesamte Sonnenstrahlung die Erdoberfläche erreicht.

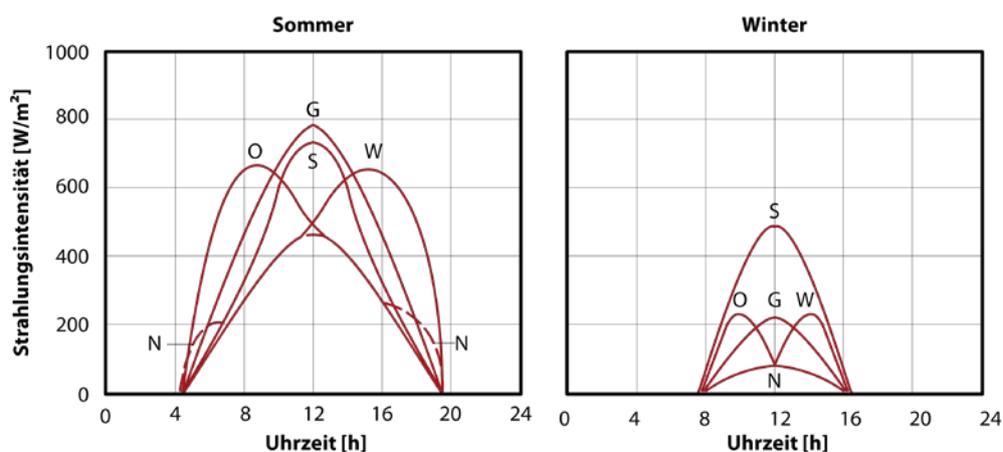
Teile der Solarstrahlung werden bereits an der äußeren Erdatmosphäre reflektiert. Auf dem Weg durch die Atmosphäre wird sie weiter durch Streuung, Reflexion bzw. Absorption an unterschiedlichen Gasmolekülen und Aerosolen wie Staub oder Wasserdampf abgemindert. Nur etwa 22 % der Gesamtstrahlung erreichen die Erdoberfläche als direkte Sonnenstrahlung, weitere 25 % als diffuse Strahlung.

Die Absorption der Solarstrahlung an Erd- oder Gebäudeoberflächen führt zur Erwärmung dieser Körper, die nun wiederum vermehrt langwellige Wärmestrahlung abgeben. Ein Teil dieser Energie wird von der Erde wieder ins Weltall abgestrahlt. In der Atmosphäre stellt sich ein komplexes Strahlungsgleichgewicht ein, das vermehrt durch anthropogene Veränderungen nachteilig beeinflusst wird. Die steigende Freisetzung von klimaschädlichen Gasen, insbesondere von Kohlendioxid, unterbindet die Abstrahlung der Wärme durch die Atmosphäre und führt zur globalen Erwärmung. Dies wird als Treibhauseffekt bezeichnet.



**Abb. 8** Darstellung des schematischen Temperaturverlaufs an einem strahlungsreichen, wolkenlosen Tag in verschiedenen Höhen über dem Boden (Oke, T. R. 1997).

Wie die Temperatur unterliegt die Solarstrahlung tages- und jahreszeitlichen Schwankungen. Die Einwirkung der Strahlung weist zusätzlich eine richtungsabhängige Ausprägung auf. ► **Abb. 9** stellt typische tageszeitliche Verläufe der Strahlungsintensitäten gemäßigter Breiten dar. Die Maxima im Sommer fallen generell höher aus als im Winter. Während im Sommer ost-, west- und südorientierte Fassaden ein annähernd vergleichbares Maximum haben, erhält die Südfassade im Winter den dominierenden Anteil an Strahlung. Die unterschiedlichen Orientierungen weisen zu verschiedenen Tageszeiten ihre Maximalwerte auf.



**Abb. 9** Darstellung der schematischen Strahlungsverläufe verschieden orientierter Flächen im Sommer und im Winter über den Tagesverlauf (Gertis, K. et al. 1983).



### 5.1.3 Niederschlag



Meteorologisch bezeichnet Niederschlag am Erdboden gemessenes oder beobachtetes ausscheidendes Wasser aus der Atmosphäre in flüssiger oder fester Form. Extreme Ausprägungen sind Stark- und Schlagregen sowie Hagel.

Bei sehr großen Niederschlagsmengen in kurzer Zeit (ab  $15 \text{ L/m}^2$  in einer Stunde) handelt es sich um ein **Starkregenereignis**. Aufgrund der höheren Außentemperaturen und der damit verbundenen höheren Wasserdampfkapazität in der Atmosphäre finden Starkregenereignisse vornehmlich in den Sommermonaten statt (LUBW 2016). Die räumliche Ausdehnung beschränkt sich hierzulande auf 10 bis  $100 \text{ km}^2$ , die Dauer beträgt zwischen 5 Minuten und 3 Stunden (Suda, J. et al. 2012). Der Deutsche Wetterdienst (DWD) warnt in zwei Stufen vor Starkregen, da es aufgrund schnell ansteigender Wasserstände zu Überschwemmungen kommen kann (DWD 2020). Eine „markante Wetterwarnung“ wird ab einer Menge von 15 bis  $25 \text{ L/m}^2$  in einer Stunde oder 20 bis  $35 \text{ L/m}^2$  in 6 Stunden ausgegeben. Werden die oberen Grenzwerte überschritten, spricht der DWD von einer „Unwetterwarnung“. **Flut** infolge von Starkregen wird als Überflutung ohne Gewässerbezug bezeichnet. Zusätzlich zu den Hochwassertypen, die auf Starkregen oder Dauerregen beruhen, existieren **Küstenhochwasser** und **Grundhochwasser**. **Überflutungen** stellen aufgrund eines möglichen Wassereintritts in das Gebäudeinnere für Mensch und Inventar ein Risiko dar (BBSR 2016).

Als zweitgrößte Folge des Klimawandels nennt der Naturgefahrenreport 2019 die steigende Anzahl von Starkregenereignissen (GDV 2019). Um das Risiko von Starkregenereignissen besser analysieren und bewerten zu können, ist eine Problembeschreibung mit Abgrenzung zu Hochwasser notwendig. In Bezug auf den Ort des eintretenden Extremereignisses ist es bei Hochwasser möglich, durch eine regionalisierte Gefährdungsabschätzung die jeweiligen Überschwemmungsgebiete festzulegen. Im Gegensatz dazu kann Starkregen prinzipiell überall auftreten. Während Hochwasser vom DWD in der Regel mit einer ausreichenden Vorwarnzeit angekündigt wird, können Starkregenereignisse durch ihr plötzliches Auftreten nur limitiert vorhergesehen werden (LUBW 2016, 2019).

**Schlagregen** ist die Kombination von starkem Regen (nicht notwendigerweise Starkregen) und Wind, der insbesondere am Putz von Außenfassaden Schäden durch Durchfeuchtung (kapillare Saugwirkung) anrichten kann. Wie stark eine Fassade beansprucht wird, hängt somit von ihrer Ausrichtung und der örtlichen Hauptwindrichtung ab. Die DIN 4108-3 fasst die Stärke der Beanspruchung durch die Einteilung in verschiedene Gruppen (1-3) anhand der mittleren Jahresniederschlagsmenge und der Windbelastung zusammen.

**Hagel** gehört zu den fallenden Niederschlägen, die den Erdboden in fester Form erreichen. Hierbei nimmt er die Form von Eiskugeln an, die zwischen 5 und 50 mm (in Extremfällen  $\geq 10$  cm) erreichen können. Ab Durchmessern von  $> 1,5$  cm spricht der DWD von Unwettern. Häufigkeiten von Hagelniederschlägen variieren regional. Oft tritt Hagel gemeinsam mit Sturmböen auf und kann somit Schäden an Gebäuden, Fahrzeugen und in der Landwirtschaft hinterlassen, die mit zunehmenden Korndurchmessern stärker ausgeprägt sind (DWD 2021e).



#### 5.1.4 Wind

Eine Luftströmung als Ausgleich lokaler Luftdruckdifferenzen, wie sie beispielsweise durch Temperaturunterschiede entstehen können, wird als Wind bezeichnet. Er ist charakterisiert durch die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit. Die Geschwindigkeit unterliegt verschiedenen Einflussfaktoren. Sie ist abhängig von der Höhe über dem Boden und der geografischen Lage. So gibt es in der Regel Unterschiede zwischen Küstennähe und Binnenland (Dütz, A. et al. 1982). Flurwinde und damit verbunden das Mikroklima eines Standortes sind stark von seiner Topografie (Geländeform und Geländeuntergrund) abhängig.

Wind ist eine sehr instationäre Größe. Böen sind kurzfristige Intensitätsschwankungen, die durch Bodenrauigkeiten verursacht werden. Als **Sturm** wird dagegen Wind großer Intensität bezeichnet, der nach der 12-stufigen Beaufort-Skala die Stärken 9 bis 11 aufweist. Die Stufen reichen hierbei von Sturm über schweren Sturm bis zu orkanartigem Sturm mit möglichen Geschwindigkeiten von 74 bis 117 km/h. Aufgrund geringerer Bodenreibung treten schwere und orkanartige Stürme über dem Meer häufiger auf. Stürme richten erhebliche Schäden und Zerstörungen an (DWD 2021c). Gebäude müssen so errichtet werden, dass sie Stürmen standhalten. Die Windlast kann situationsbedingt den Hauptlastfall der statischen Berechnung darstellen. An Gebäuden sind insbesondere Windfänge und Traufbereiche von Dächern hohen Windlasten ausgesetzt.



### 5.1.5 Dürre

Dürre bezeichnet Wassermangel, verursacht durch weniger Niederschlag und/oder eine höhere Verdunstung aufgrund erhöhter Temperaturen (oder Wind) als üblich. Mit zunehmender Dürredauer wird von meteorologischer (ein bis zwei Monate trockener als üblich), landwirtschaftlicher (zwei Monate und länger trocken, Ernteeinbußen), hydrologischer Dürre (ab vier Monaten, Grundwasser und Pegel betroffen) oder sozioökonomischer Dürre (ab einem Jahr, Wassermangel bremsst produzierende Wirtschaft) gesprochen. Zur Detektion und Bewertung von Dürren werden Dürreindizes verwendet (DWD 2021a). Zudem betreibt der DWD den Bodenfeuchteviewer, der die Bodenfeuchte und andere Wasserhaushaltsgrößen darstellt. Somit können das Wasserangebot im Boden überwacht und erste Bewertungen von Starkregenphasen, Trockenheit und Dürre ermöglicht werden. Ähnlich liefert der UFZ-Dürremonitor täglich flächendeckende Informationen zum Bodenfeuchtezustand in Deutschland (UFZ 2021).

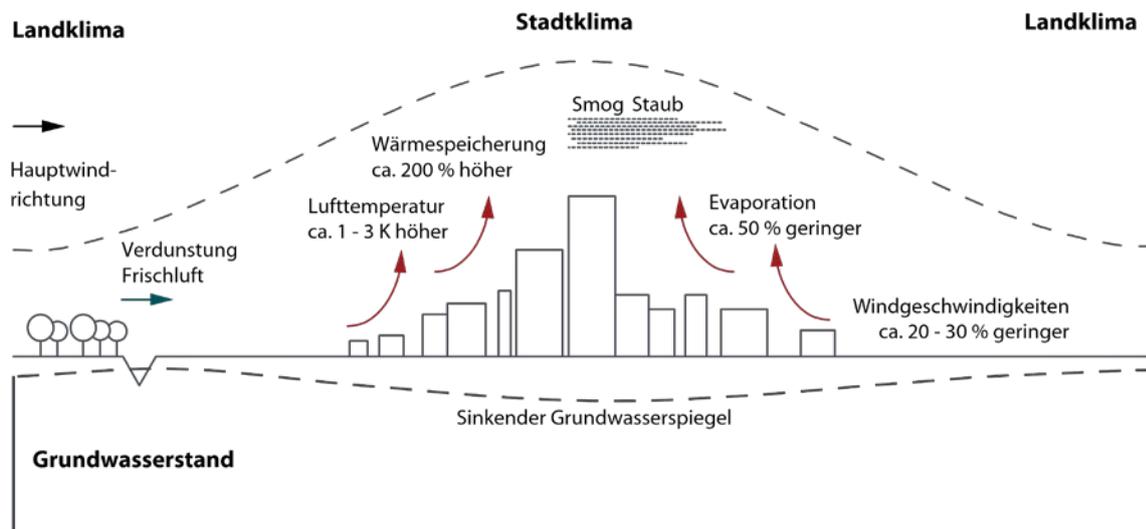
Die Jahre 2018, 2019 und 2020 waren in Deutschland zu trocken. Insbesondere in der Vegetationsperiode, die für das Pflanzenwachstum essenziell ist (April bis September), fehlte Niederschlag. Der fehlende Niederschlag machte sich u. a. in zu trockenen Böden bemerkbar. In Deutschland war der Bodenwasservorrat im April des Jahres 2020 so niedrig wie nie zuvor im Zeitraum 1991 bis 2019 (UBA 2021d). Stand Juni 2021 zeigte der Bodenfeuchteviewer des Deutschen Wetterdienstes (DWD) Trockenstress in weiten Teilen Ost- und Norddeutschlands sowie in einigen Teilen West- und Süddeutschlands an.

## 5.2 Stadtklima

Die bauliche Gestaltung von Städten verändert die physikalische Umwelt. Das sogenannte Stadtklima ist nach der Definition der WMO ein durch die Wechselwirkung mit der Bebauung und ihren Auswirkungen (einschließlich Abwärme und Emission von luftverunreinigenden Stoffen) verändertes lokales Klima (Brazel, A. et al. 2005). Dichte Bebauungen, Versiegelung von Flächen und Emissionen führen in Städten zu folgenden Aspekten (Oke, T. R. 1997; Mehra, S.-R. 2021):

- Erhöhte Lufttemperaturen aufgrund der zusätzlichen Speichermasse, des geringeren Luftaustausches und der geringeren Verdunstungskühlung.
- Geringere relative Luftfeuchte aufgrund der höheren Lufttemperaturen, des hohen Versiegelungsgrades und der schnellen Niederschlagsabführung.
- Verringerte Einstrahlung und Sonnenscheindauer aufgrund des erhöhten Staub- und Aerosoleintrages.
- Geringere Windgeschwindigkeiten aufgrund der erhöhten Bodenrauigkeit.
- Erhöhte Böigkeit aufgrund der komplexen und stark inhomogenen Bebauungsstruktur.

► **Abb. 10** zeigt die Auswirkungen der Bebauung auf das Stadtklima in den mittleren Breitengraden einer etwa 1 Million-Einwohner-Stadt im Sommer. In der Abbildung ist die prozentuale Änderung ausgewählter Stadtklimaparameter gegenüber der freien Landschaft aufgeführt. Insbesondere der thermische Energiehaushalt ist in Städten stark verändert und erhöht die Vulnerabilität von Städten gegenüber Hitzestress.



**Abb. 10** Prozentuale Änderungen ausgewählter Stadtklimaparameter im urbanen Bereich gegenüber dem Umland nach (Mehra, S.-R. 2021; Oke, T. R. 1997).

## 5.3 Kenntage, Extremereignisse, Gefahren

An sogenannten klimatologischen Kenntagen wird ein bestimmter Schwellenwert eines klimatischen Parameters über- oder unterschritten (► **Infobox**). Auch Gewitter- bzw. Hageltage sind Kenntage, an denen im Tagesverlauf das entsprechende meteorologische Phänomen auftritt. Durch statistische Auswertungen der Häufigkeiten können Analysen des Klimas sowie zeitliche und räumliche Vergleiche beispielsweise zwischen städtischen und ländlichen Regionen erstellt werden.

Auf Gebäude wirken spezifische Wetterelemente wie Niederschlag, Wind oder Lufttemperatur. Aus den Wetterelementen resultieren Naturgefahrenereignisse, auch schadensverursachende Ereignisse, beispielsweise bei hoher Intensität eines einwirkenden Wetterelements. Ereignisse wie Starkregen, Hochwasser, Hagel, Sturm, Hitze oder Trockenheit werden folgend als Wettereinwirkung bezeichnet. Durch die Folgen des Klimawandels unterliegen auch die Wettereinwirkungen einem sich regional unterscheidenden Wandel und müssen standortspezifisch neu bewertet werden (► **Tab. 1**).

## Infobox

### Klimatologische Kenntage

Nachfolgend sind ausgewählte klimatologische Kenntage (Hupfer und Kuttler 2006; Deutscher Wetterdienst 2017) dargestellt.

### Eistag

Tagesmaximum der Lufttemperatur kleiner 0 °C

### Frosttag

Tagesminimum der Lufttemperatur höchstens 0 °C

### Heißer Tag

Tagesmaximum der Lufttemperatur mindestens 30 °C (früher auch als Tropentag bezeichnet)

### Tropennacht

Minimum der Lufttemperatur 20 °C

### Niederschlagstag, Regentag

24-stündige gemessene Niederschlags- bzw. Regenhöhe mindestens 0,1 mm, also 0,1 L/m<sup>2</sup>

### Sturmtag

Windgeschwindigkeit mindestens Stufe 8 Beaufort des größten am Tag auftretenden 10-Minuten-Mittels

Tab. 1 Regionale Betroffenheit infolge Klimawandel nach (BBSR 2020).

WETTEREINWIRKUNG	PROGNOSE	BETROFFENHEIT
Sommerhitze	↑↑	Ganz Deutschland, insbesondere der Südwesten, Flusstäler von Rhein, Neckar, Main, Mosel.
Starkregen	↑	Mittelgebirge und Alpenvorland. Abhängig von Topografie. Details in Starkregengefahrenkarten von Kommunen.
Hochwasser	↑	In der Nähe von Gewässern. Details in Hochwassergefahrenkarten der Bundesländer.
Hagel	-	Ganz Deutschland, Süddeutschland höchste Betroffenheit.
Wind	-	Ganz Deutschland, insbesondere Küsten und Norddeutschland.

Legende: ↑↑ = starke Änderung; ↑ = Änderung; - = keine klaren Rückschlüsse

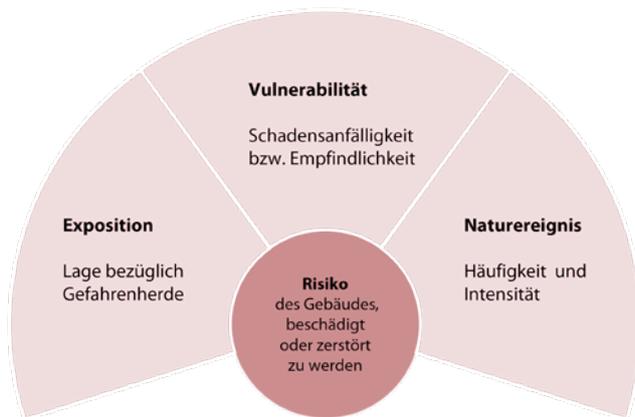
Die Einwirkungen sowie weitere Naturgefahrenereignisse können in folgende Gefahrenklassen eingeteilt werden:

- hydrologische Gefahr (beispielsweise Hochwasser, Starkregen),
- geologische Gefahr (beispielsweise Erdbeben, Erdbeben),
- meteorologische Gefahr (beispielsweise Starkregen, Hitze),
- Schneegefahr (beispielsweise Lawinen, Schneeschmelze),
- Feuergefahr (beispielsweise Trockenheit, Hitze).

## 5.4 Betroffenheit, Gefährdung, Verletzbarkeit und Risiko

Wie zuvor beschrieben, können aus den einwirkenden Wetterelementen Naturgefahren resultieren. Insbesondere die Lage bezüglich des Gefahrenherds (Exposition) und seine Schadensanfälligkeit (Vulnerabilität) charakterisieren das Risiko eines Bauwerks, durch ein Naturereignis oder durch Wettereinwirkungen beschädigt oder zerstört zu werden. Diese Zusammenhänge können für den Bauwerksbereich in Anlehnung an den IPCC dargestellt werden (► Abb. 11) (Suda, J. et al. 2012).

Infolge des Klimawandels ist mit hoher Wahrscheinlichkeit von einer Zunahme spezifischer Wettereinwirkungen und folglich der Naturgefahren auszugehen (► Kap. 3.2). Je ausgeprägter die erwartete Klimaveränderung ausfällt, umso größer wird der Anpassungs- und Handlungsbedarf für bestehende und neu zu errichtende Gebäude. Jedoch sind nicht alle Regionen Deutschlands jeder Wettereinwirkung in gleichem Maße ausgesetzt. Beispielsweise sind die Küstengebiete und der Norden deutlich stärker von Wind betroffen als Süddeutschland. Demgegenüber ergibt sich für Hagel eine umgekehrte Gefährdungslage. Starke Hagelereignisse sind im Süden Deutschlands wahrscheinlicher als im Norden.



**Abb. 11** Darstellung der Bestandteile des Gebäuderisikos infolge Naturgefahren.

### Beispiel Sommerhitze

Die Sommerhitze in Deutschland wird nach derzeitigen Prognosen das stärkste Änderungssignal in den nächsten Dekaden aufweisen (► Kap. 3.2). Bezüglich der sommerlichen Überhitzung von Gebäuden ergibt sich nicht nur eine regional differenzierte Gefährdung, sondern auch die Höhenlage ist von Relevanz. Dies führt aktuell zu einer Einteilung Deutschlands in drei Sommerklimaregionen (DIN 4108-2). Das Ergebnis einer detaillierten Untersuchung anhand der 15 Klimaregionen (DIN 18599-10) zeigt die Unterschiede sehr anschaulich (► Abb. 12). Für die thermischen Bauteiluntersuchungen in TEIL B (► Kap. 7.2) am Standort Potsdam wurden die Übertemperaturgradstunden zum Bezugswert 26 °C ermittelt. Der Wert beinhaltet die jährliche Summe der stündlichen Überschreitungen des Bezugswertes der Operativtemperatur im Innenraum eines Gebäudes. Anschließend wurde der Referenzraum mit denselben Randbedingungen in den weiteren Klimaregionen untersucht und vergleichend dargestellt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde auf die Anpassung des Bezugswertes an die Sommerklimaregion verzichtet. Die Einfärbung zeigt die prozentuale Änderung der Ergebnisse in den Klimaregionen. Eine gelbe Einfärbung stellt Regionen mit weniger Übertemperaturgradstunden dar, eine rote Färbung jene mit mehr. Die Intensität der Einfärbung nimmt mit höheren Abweichungen zu. Die farblichen Unterschiede weisen auf die örtlich stark unterschiedliche Ausprägung der Exposition hinsichtlich der Sommerhitze hin. Neben einem sichtbaren Gefälle von Norden nach Süden wird der Einfluss der höher gelegenen Regionen auf diese Wettereinwirkung sichtbar. Die zunehmende Kontinentalität nach Osten hin ist ein weiterer Faktor.

Im Laufe des aktuellen Jahrhunderts wird das Risiko der sommerlichen Überhitzung entsprechend anerkannten Klimaprognosen deutlich ansteigen, wie die Untersuchung des Referenzraums am Standort Potsdam für die Klimaszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 weiter zeigt (► Abb. 13). Die prozentuale Änderung der Übertemperaturgradstunden erreicht bei beiden Szenarien Werte von über 300 % im Jahr 2050. Im pessimistischen Szenario wird der heutige Wert an Übertemperaturgradstunden im Referenzraum um über 800 % ansteigen. Selbst im optimistischeren Szenario RCP 4.5 erfolgt bis 2100 kein Rückgang gegenüber 2050. Diese Werte zeigen eindringlich die hohe Relevanz der Wettereinwirkung Hitze. Ohne weitere Maßnahmen erscheinen behagliche Innenraumbedingungen an vielen Standorten Deutschlands zukünftig schwierig bzw. nur mit Unterstützung von technischen Anlagen erreichbar zu sein.

## Infobox

### Schaden

Summe der negativ bewerteten Folgen durch Einwirkung von Natur- oder Wetterereignissen am Bauwerk, am Inventar, an der Infrastruktur bzw. an der Umgebung und Umwelt eines Ereignisses. Personen-, Sach- bzw. Umweltschäden sind möglich. Abhängig von der Art der Umwelteinwirkung, der Lage und Art des Objektes/Gebäudes sowie vom Inventar.

### Risiko

Wahrscheinlichkeit und Größenordnung eines möglichen Schadens.

### Gebäude-Vulnerabilität

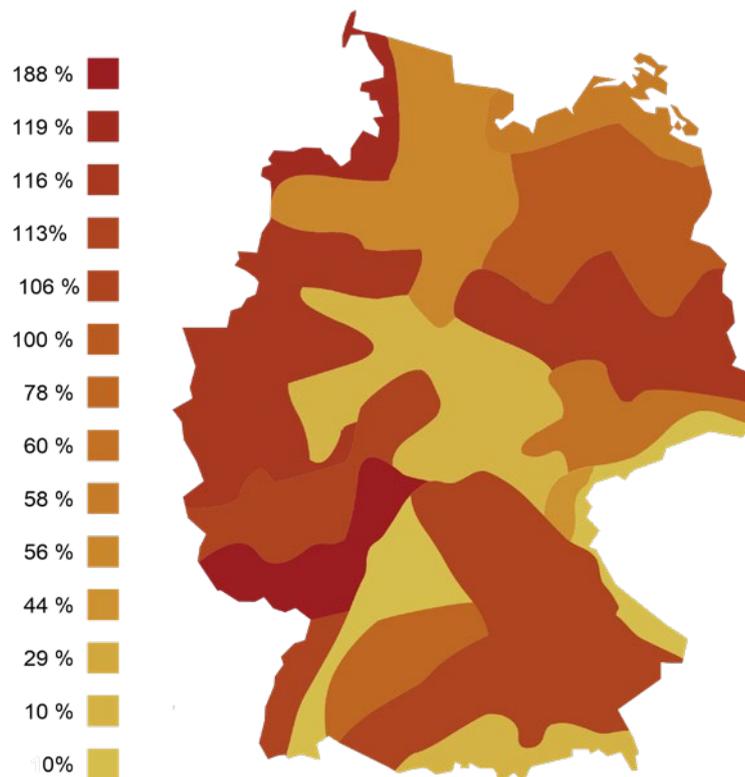
Verletzlichkeit; beispielsweise gegenüber dem Klimawandel bei Einwirkung eines (Extrem-)Ereignisses.

### Gefährdungsbilder

Für das Gebäude auftretende Gefahren, ihre Wirkungsweise und Auswirkungen, mit Abschätzung der Summe der Gefahren sowie Berücksichtigung des räumlichen und zeitlichen Zusammenwirkens unterschiedlicher Gefahren.

### Schadensbild

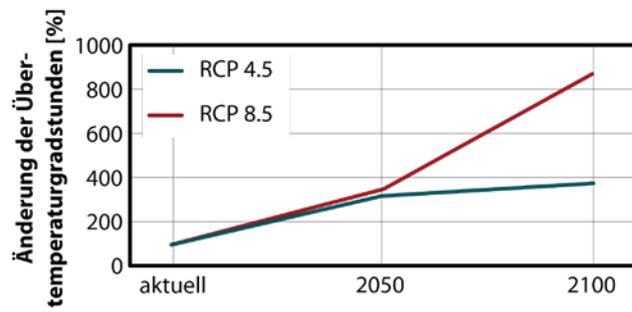
Auswirkungen auf das Gebäude; die wahrscheinlichste Kombination von Schäden einer Einwirkung bestimmter Größenordnung.



**Abb. 12** Darstellung der prozentualen Änderung der Übertemperaturgradstunden des Referenzraums in unterschiedlichen Klimaregionen Deutschlands in Bezug zum Standort Potsdam.

Jede Naturgefahr beinhaltet unterschiedliche Gefährdungsbilder, also Wirkungsweisen und Auswirkungen auf das Gebäude (beispielsweise zerstörter Sonnenschutz infolge Hagel oder eindringendes Wasser infolge Starkregen). Ein geeignetes (Klimaanpassungs-)Konzept kann diese Wirkungen auf ein zumutbares Maß minimieren. Die Wirkung wird durch Ursache, Vorhersehbarkeit, Dauer, Stärke (bzw. Energie), räumliche Ausdehnung und Verteilung sowie Art des zeitlichen Auftretens (zyklisch, episodisch, Häufigkeit) charakterisiert. Es ist also eine quantifizierbare Bewertung durch eine Identifikation von physikalischen Kriterien (Parametern) erforderlich. Exakt kann der konkrete Eintritt des Naturgefahrenprozesses nie hervorgesagt werden. Dem statistischen Erwartungswert wird häufig ein Streubereich als Sicherheitszuschlag zugeordnet. Daraus ergibt sich ein durch Eintrittswahrscheinlichkeit und Intensität beschriebenes Bemessungsereignis, das die Grundlage der Festlegung konkreter Bemessungswerte für die Ausweisung von Gefahrenzonen sowie die Planung, Konstruktion und Dimensionierung von Gebäudeschutzmaßnahmen bildet (► Eurocodes). Für ein spezifisches Bauwerk an einem spezifischen Ort kann in Anlehnung an das integrale Naturgefahren-Management (mit den Phasen *Vorsorge*, *Bewältigung* und *Reduktion der Vulnerabilität*) ein Anpassungskonzept erarbeitet werden (► **Abb. 14**).

Durch angepasste Vorsorgemaßnahmen ist mit einer Verminderung der Schadensanfälligkeit zu rechnen. Hierdurch können Schäden reduziert und in der Bewältigungsphase einfacher überwunden werden. Umfassende Vorsorgemaßnahmen sollten nicht nur den Gebäude- bzw. Objektschutz einschließen. Auch die präventive Raumplanung sowie im Extremfall Umsiedlungen besonders exponierter Bauwerke sind in Betracht zu ziehen. (Meteonorm 2020)



**Abb. 13** Darstellung der prozentualen Änderung der Übertemperaturgradstunden des Referenzraums am Standort Potsdam in den Jahren 2050 und 2100 unter den Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 2100 (Meteonorm 2020).



**Abb. 14** Kreislauf zur Veranschaulichung des Naturgefahren-Managements.

# 6 Klimaanpassungsmaßnahmen im Gebauten

Im Gebauten stellen klimawandelbedingte Risiken vor allem eine Gefahr für die Gesundheit der Menschen und für Sachgüter dar. Somit muss als grundlegendes Prinzip sowohl beim Bau als auch beim Umbau bestehender baulicher Strukturen die Schadensvorsorge Beachtung finden. Hierunter fallen neben den direkten Klimaanpassungsmaßnahmen auch Aspekte des Nachhaltigen Bauens wie die Reduktion von Treibhausgasen und somit die Schaffung einer lebenswerten Zukunft für künftige Generationen. Die zeitgleich auftretenden Veränderungen durch die demografische Entwicklung (beispielsweise anhaltender Bebauungsdruck in Städten) müssen hierbei zudem stets in Einklang gebracht werden. Bereits heute führen die Wettereinwirkungen zu Schäden in urbanen Gebieten an Gebäuden und stellen neue Anforderungen an die Gebäudewiderstandsfähigkeit (Resilienz).

## 6.1 Relevanz und Dringlichkeit von Anpassungsmaßnahmen

Naturgefahrenereignisse führen in Deutschland jedes Jahr zu Sachschäden an Gebäuden in Höhe mehrerer Milliarden Euro. Die zunehmenden Belastungen durch Hitze, insbesondere in Städten, kann vor allem bei älteren und kranken Menschen sowie Kindern zu gesundheitlichen Einschränkungen oder einer erhöhten Morbiditätsrate führen. Private, öffentliche und gewerbliche Immobilieneigentümerinnen und Eigentümer, Kaufwillige sowie Entwicklerinnen und Entwickler stehen damit vor einer völlig veränderten Risikosituation. Der Naturgefahrenreport von 2021 beziffert den monetären Schaden in Sachversicherungen (Wohngebäude, Hausrat, Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft) 2020 auf ca. 1.6 Milliarden €. Hauptwettereinwirkungen waren hierbei Sturm und Hagel. 2021 verursachten Stand August 2021 allein die Sachschäden der „Sturzflut Bernd“ ca. 4 Mal so hohe Aufwendungen (ca. 6,5 Milliarden €) (GDV 2021).

Wie bereits in ► **Kap. 5** erwähnt, können Wettereinwirkungen zu erheblichen Schäden an Gebäuden führen. Schadensbilder entstehen infolge zahlreicher Faktoren in, je nach Wetterereignistyp, unterschiedlichen Kombinationen. Zwar weisen aus diesem Grund Projektionen teilweise hohe Unsicherheiten auf (beispielsweise bei extremen Hochwassern), nichtsdestotrotz sind zusätzliche Anpassungsmaßnahmen ratsam. ► **Tab. 2** stellt für diverse Klimawirkungen im Bauwesen das Risiko infolge des Klimawandels ohne Anpassungsmaßnahmen dar. Hierbei wurden die sich ergebenden künftigen Risiken ausgehend von der „Gegenwart (heute)“ eingeteilt in ein optimistisches und ein pessimistisches Szenario für die Perioden „2031-2060“ und „2071-2100“. Die Einteilungsskala der Risiken unterteilt sich hierbei in hoch, mittel und gering. Die Szenarien der Periode „2031-2060“ sind mit einer mittleren Gewissheit belastbar.

**Tab. 2** Risiken von Klimawirkungen im Gebauten infolge Klimawandel ohne Anpassungsmaßnahmen, eingeteilt in optimistische (O) und pessimistische (P) Szenarien, nach (UBA 2021c).

WIRKUNG	HEUTE	RISIKO INFOLGE KLIMAWANDEL				ANPASSUNGSDAUER [JAHRE]
		2031-2060		2071-2100		
		O	P	O	P	
Gebäudeschäden durch Starkregen	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	10-50
Gebäudeschäden durch Flusshochwasser	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50
Urbane Vegetation	gering	mittel	mittel	mittel	hoch	>50
Wärmeinsel/Stadtklima	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch	10-50
Innenraumklima	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50

Die Tabelle stellt dar, dass die projizierten Änderungen für Hochwasser beim optimistischen Szenario geringer ausfallen als beim pessimistischen. Weiter wird deutlich, dass die urbane Vegetation durch klimawandelbedingte Änderungen wie länger anhaltende Trockenheit, Hitze bzw. Stürme ausgehend von einem heute geringen Risiko zukünftig mittel bis stark betroffen sein wird. Hitze wird in Deutschland flächendeckend zunehmen, was insbesondere Wärmeinseln und Hitzebelastung urbaner Bewohnerinnen und Bewohner begünstigt. Dies wird insbesondere bei pessimistischem Verlauf bereits ab 2031 mit hohem Risiko verbunden stattfinden. Die der Tabelle zugrunde liegende Studie kam außerdem zu dem Ergebnis, dass für die Periode „2031-2060“ die projizierten Änderungen für Hochwasser im Süden und Westen geringer ausfallen als in der Mitte und im Osten Deutschlands.

Zusätzlich werden Anpassungsdauern ersichtlich, also Zeiträume für das Wirksamwerden von Maßnahmen zur Reduzierung einer Klimawirkung. Außer bei urbaner Vegetation (> 50Jahre) betragen sie mindestens 10 Jahre. Dies legt den dringenden Handlungsbedarf dar. Die langen Anpassungsdauern verdeutlichen unter anderem das komplexe und zeitintensive Zusammenspiel entsprechender Standortentscheidungen, die **bauplanungs- und bauordnungsrechtliche Impulse** benötigen. Auch Anpassungsmaßnahmen in technischen Regelwerken, die Schaffung von Strukturen zur Institutionalisierung, Aus- und Fortbildungsangebote oder vegetationsbasierte Ansätze benötigen Zeit und sind nicht selten weiteren Hemmnissen (Besitzverhältnisse, Denkmalschutz etc.) unterworfen (UBA 2021c).

Die Begründung von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel benötigt solide Kenntnisse möglicher klimawandelbedingter Schäden und der Potenziale, diese Schäden durch wirksame Maßnahmen zu verringern. Beide Aspekte wurden in einem Forschungsvorhaben für ausgewählte Klimawirkungen untersucht (UBA 2021a). Geeignete Vorsorge (Klimaanpassung) kann viele Schäden minimieren. Beispielsweise sind bei Hitze Einbußen der Arbeitsproduktivität im Innen- und Außenraum zu erwarten. Für Deutschland wird das BIP-Niveau um 0,12 % niedriger (RCP4.5) im Vergleich zum Basisszenario (SSP2 ohne Klimawandel) angenommen (UBA April 2020). Die Studie (UBA 2021a) ergab zudem unter bestimmten Annahmen ein Schadenspotenzial an Wohngebäuden durch Starkregen von bis zu 13 Milliarden € allein für Nordrhein-Westfalen. Durch geeignete Maßnahmen wie beispielsweise das Abdichten von Kellern sowie die Installation von Rückstausicherungen und Wassersperren ist eine Reduktion der potenziellen Schäden um knapp 40 % möglich. Schäden an Wohngebäuden durch Sturmfluten können durch eine optimale Bauvorsorge durchschnittlich sogar um 60 % gemindert werden (UBA 2021a).

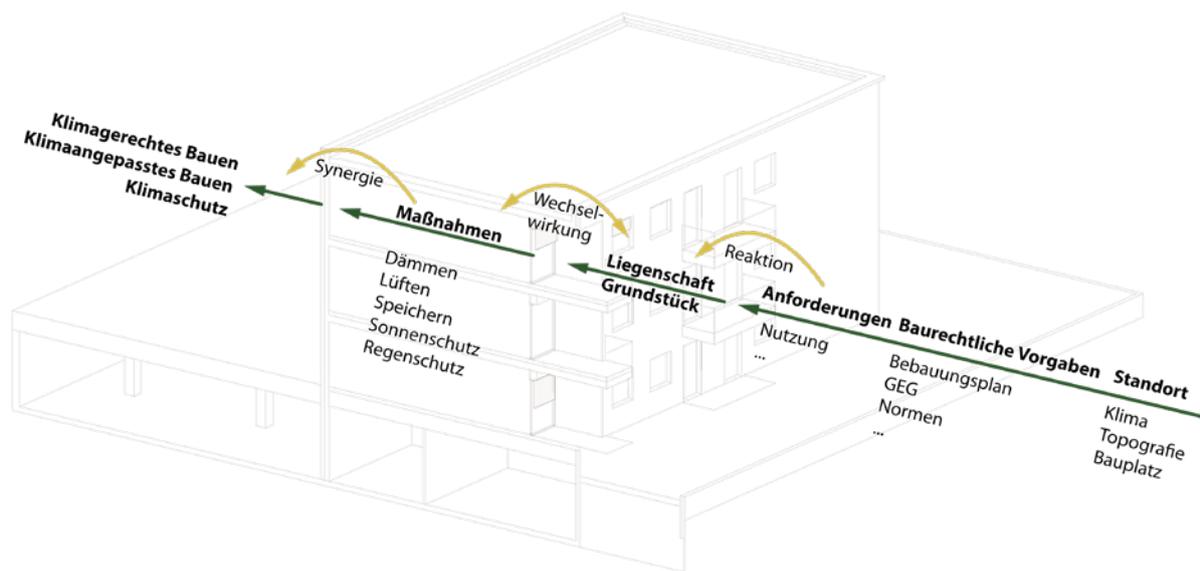
## 6.2 Potenziale und Wirkungen von Anpassungsmaßnahmen

### Infobox

#### Klimagerechtes Bauen

Bauliche Maßnahmen, die an die vorherrschenden Klimata angepasst sind. Bauphysikalische Maßnahmen wie Dämmen, Lüften, Speichern, Sonnen- bzw. Strahlenschutz und Regenschutz werden gezielt, auf jedes Klimagebiet abgestimmt, eingesetzt.

Neben der essenziellen Schadensvermeidung durch Anpassungsmaßnahmen im Falle eines Extremereignisses (► Kap. 6.1) bestehen zwischen der Klimaanpassung und dem klimagerechten Bauen Synergien. Klimagerechtes Bauen (► Infobox) bezieht sich auf die vorherrschenden klimatischen Verhältnisse am Standort. Die bauphysikalischen Maßnahmen **Wärmedämmung**, **Wärmespeicherung**, **Lüftung**, **Sonnenschutz** sowie **Regenschutz** spielen eine essenzielle Rolle und müssen an die Rahmenbedingungen vor Ort angepasst werden (► Abb. 15). Der Gebäudeentwurf wird maßgeblich von äußeren Einflüssen bestimmt. Neben den Anforderungen der Bauherrinnen und Bauherren sind dies auch gesetzliche und rechtliche Vorgaben (zum Beispiel Bebauungsplan) sowie standortspezifische Faktoren (zum Beispiel Klima, Topografie, Bauplatz). Das Ziel einer klimagerechten Architektur ist die Ausschöpfung der passiven Gestaltungsmöglichkeiten im Außenraum (► Kap. 8) und am Gebäude (Form, Ausrichtung, Organisation) unter Einbezug der oben genannten bauphysikalischen Maßnahmen zur Erzielung eines behaglichen Innenraumklimas. Eine gezielte Integration der Haus- und Versorgungstechnik sollte erst nach Ausschöpfung der baulichen Maßnahmen erfolgen und nicht zur Kompensation bautechnischer Kompromisse oder Defizite eingesetzt werden. Durch die Wahl der Baustoffe hinsichtlich sozioökologischer Gesichtspunkte können Klimaschutz und klimagerechtes Bauen optimal kombiniert werden.



**Abb. 15** Rahmenbedingungen eines Gebäudes, die das klimagerechte Entwerfen beeinflussen.

Die Projektion klimagerechter Bauweise in die Zukunft kann als klima(wandel)angepasstes Bauen verstanden werden. Die zur Verfügung stehenden bauphysikalischen Maßnahmen sind dieselben und müssen in Bezug auf die zu erwartenden Klimaänderungssignale gezielt umgesetzt werden. Nachfolgend werden die Grundmerkmale der Maßnahmen Wärmedämmung, Wärmespeicherung, Lüftung, Sonnenschutz sowie Regenschutz erläutert.

**Wärmedämmung** reduziert den Wärmetransport durch ein Bauteil. Dadurch wird der Abkühlung des Gebäudeinneren im Winter bzw. der Erwärmung im Sommer entgegengewirkt. Für die Wärmedämmung eignen sich Baustoffe mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit. Konstruktionen werden über den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) charakterisiert. Mit der Einheit  $W/(m^2K)$  gibt der U-Wert den Wärmedurchgang pro  $m^2$  Konstruktionsfläche und einem Kelvin Temperaturdifferenz zwischen innen und außen durch das Bauteil an. Ein niedriger U-Wert bedeutet eine hohe Wärmedämmung. Neben der Reduktion des Heiz- und Kühlenergiebedarfs trägt eine ausreichende Wärmedämmung des Gebäudes unter anderem zur Vermeidung der Schimmelpilzgefahr an Innenoberflächen und zur Sicherung der thermischen Behaglichkeit bei.

Die **Wärmespeicherung** bei opaken Fassadenbauteilen dient der Aufrechterhaltung einer gleichmäßigen Raumtemperatur. Durch ihre thermische Speichermasse können Bauteile am Tag Wärme aufnehmen und dadurch bei hohem Wärmeeintrag Temperaturspitzen abmildern. Bei kühleren Temperaturen, beispielsweise nachts, wird die gespeicherte Wärme wieder an die Umgebung abgegeben. Ein Indiz für eine hohe Wärmespeicherfähigkeit ist die flächenbezogene Masse, welche die Masse des Bauteils pro  $\text{m}^2$  Konstruktionsfläche angibt. Jedoch wirkt in der Regel nicht das komplette Bauteil, zusätzlich können wärmedämmende Schichten die dahinterliegende Konstruktion entkoppeln. Die Fähigkeit, Wärme zu speichern, wird bei Bauteilen daher über die wirksame Speicherfähigkeit angegeben. Ihre Einheit  $\text{Wh}/(\text{m}^2\text{K})$  gibt die Energie an, die ein  $\text{m}^2$  Konstruktionsfläche bei Erwärmung bzw. Abkühlung um ein Kelvin speichert bzw. abgibt.

Die natürliche **Lüftung** wird durch einen Druckunterschied zwischen dem Innen- und Außenraum, beispielsweise durch Wind oder Luftdichteunterschied aufgrund von Temperaturdifferenzen, verursacht. Der unerwünschte Luftwechsel durch Undichtigkeiten der Gebäudehülle wird als Infiltration bezeichnet und ist möglichst zu minimieren. Eine gezielte Lüftung kann dagegen die Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außenraum zur Steigerung der thermischen Behaglichkeit nutzen. Beispielsweise erzielt die gezielte Nachtlüftung im Sommer bei niedrigeren Außenlufttemperaturen eine Kühlung der Innenräume. Dieser Effekt wird durch eine durchdachte Kombination von Wärmespeicherung und Wärmedämmung optimiert.

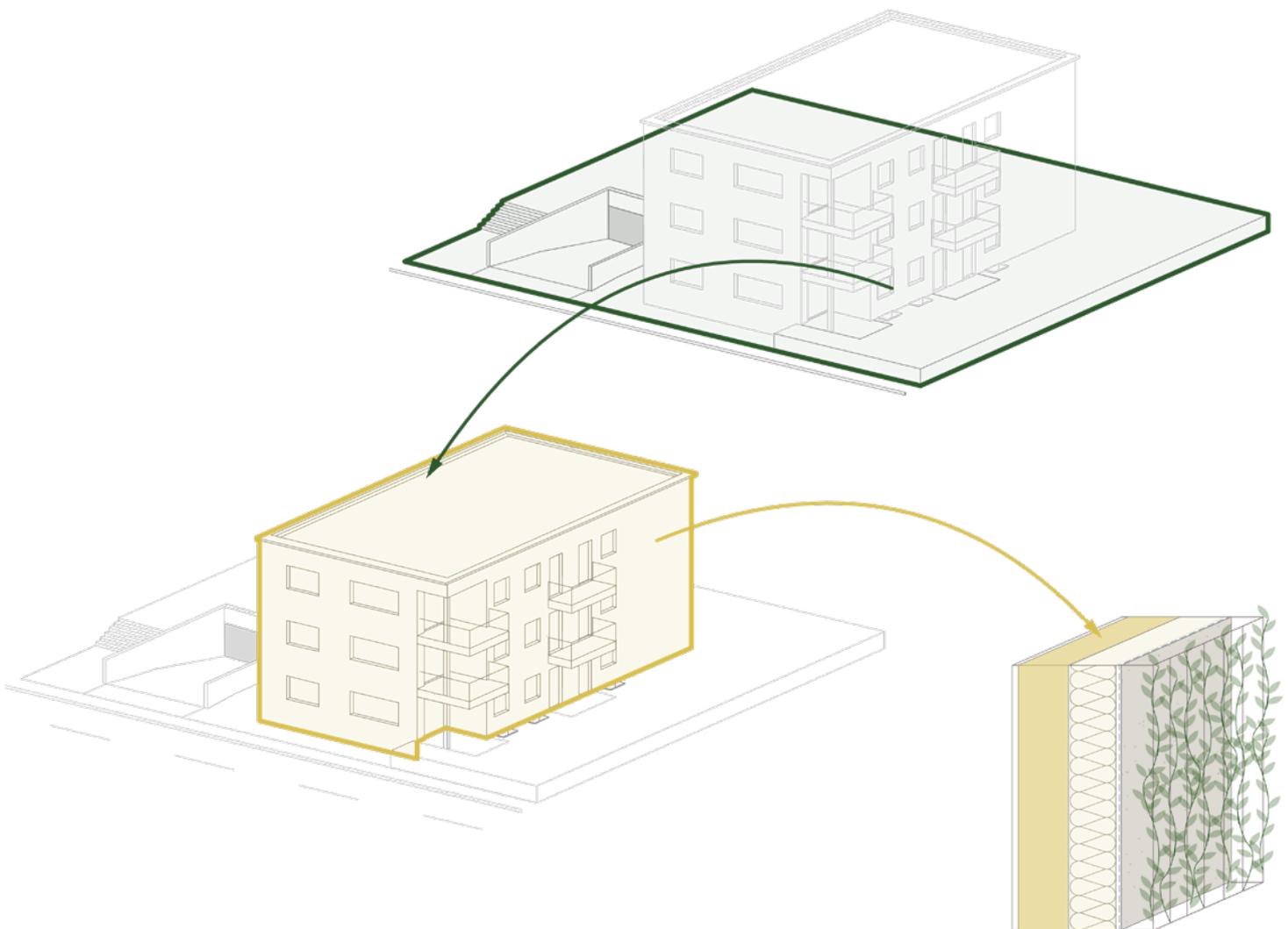
Die geeignete Auswahl des außen liegenden **Sonnenschutzes** kann bei Verglasungen den sommerlichen Wärmeeintrag stark reduzieren. Hierbei ist maßgeblich auf den Sonnenverlauf zu achten. Beispielsweise ist in Deutschland insbesondere für die südorientierte Fassade ein horizontal verlaufender Sonnenschutz oberhalb der Verglasung wirksam. Die hoch am Zenit stehende Sommersonne kann dadurch gut abgehalten werden und die tief stehende Wintersonne in die Räume einfallen. Um Überhitzungen der Innenräume zu vermeiden, erweisen sich außen liegende Sonnenschutzvorrichtungen gegenüber den innen liegenden Verschattungselementen als effektiver, da die Solarstrahlung bereits vor der Gebäudehülle weitgehend reduziert wird. Der innen liegende Sonnenschutz erfüllt folglich eher die Funktion eines Blendungsschutzes. Bei opaken Fassaden reduzieren hellere Bauteiloberflächen und Abdichtungsbahnen durch ihren niedrigen Absorptionsgrad eine Erhitzung des Bauteils und folglich des Innenraums. Die Absorption gibt an, welcher Anteil der anfallenden Strahlung vom Bauteil aufgenommen und in Wärme umgewandelt wird.

Durch den **Regenschutz**, auch konstruktiver Feuchteschutz genannt, wird das Eindringen von Feuchtigkeit in die Bauteile verhindert. Feuchte Dämmstoffe weisen beispielsweise eine höhere Wärmeleitfähigkeit und damit geringere Wärmedämmwirkung auf als trockene. Holzkonstruktionen quellen durch Wassereinwirkung, lang anhaltende Feuchte führt zu Fäulnis. Ein effektiver Feuchteschutz trägt maßgeblich zur Aufrechterhaltung der Funktionen des Bauteils und des Gebäudes bei.

Die zielgerichtete Anwendung dieser rein baulichen und bauphysikalischen Maßnahmen ist der Schlüssel dazu, klimagerecht zu bauen und ein gesundes Innenraumklima mit möglichst wenig Energieeinsatz zu schaffen. Die alternierenden Rahmenbedingungen des hiesigen gemäßigten Klimas erfordern komplexe Lösungen. In Deutschland muss ein Kompromiss zwischen den Anforderungen im Winter und jenen im Sommer getroffen werden. So ist ein hoher Sonneneintrag im Sommer zu vermeiden, im Winter sind dagegen die solaren Gewinne erwünscht und zu maximieren, bei gleichzeitiger Reduktion der Wärmeverluste. Die Gewichtung der Maßnahmen wird sich jedoch mit fortschreitendem Klimawandel vermutlich hin zu den sommerlichen Herausforderungen verschieben. Klimaangepasstes Bauen berücksichtigt auch dies.

# TEIL B

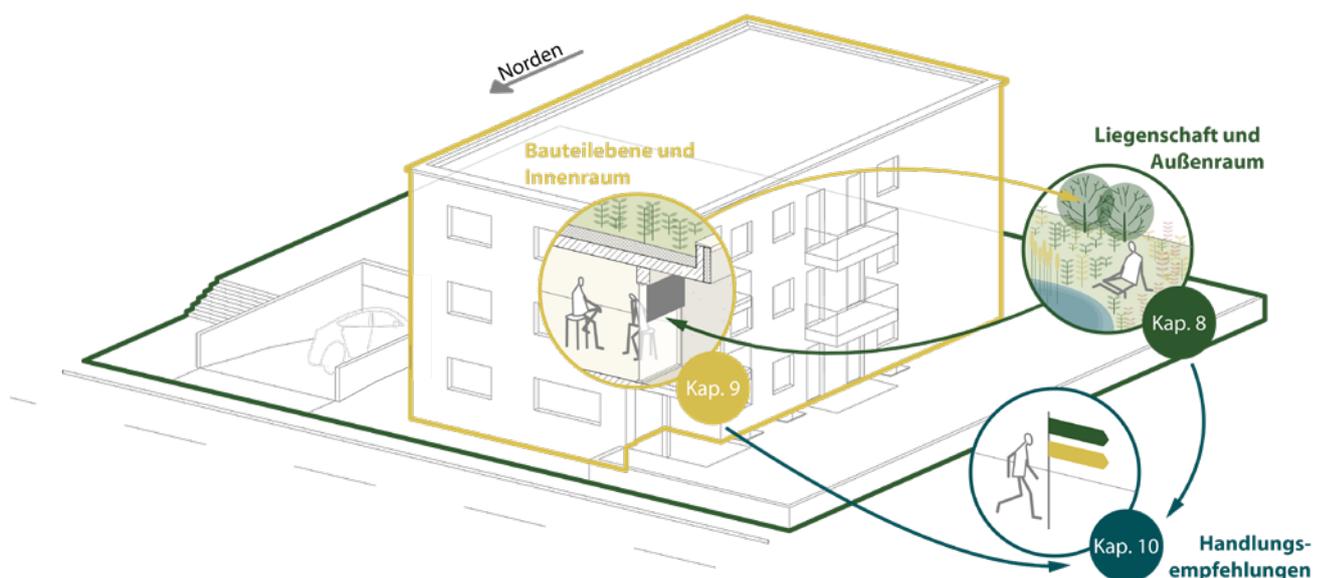
## Handlungsempfehlungen für Liegenschaft und Gebäude



# 7 Zielsetzung und Methodik

**TEIL B** der Broschüre zeigt baufachliche Handlungsempfehlungen zur Anpassung an extreme Wetterereignisse anhand einer fiktiven Musterliegenschaft im urbanen Raum auf (► **Abb. 16**). Es werden sowohl Anpassungsmaßnahmen auf der Ebene der Liegenschaft, d. h. im Außenraum, (► **Kap. 8**) als auch Maßnahmen auf Bauteil- und Innenebene (► **Kap. 9**) anhand eines Referenzobjekts verglichen, analysiert und dokumentiert. Aufbauend werden Verknüpfungen und Synergiepotenziale der Anpassungs- und Präventionsmaßnahmen (Schadenvermeidung bzw. -reduzierung) dargestellt und baufachliche Handlungsempfehlungen formuliert (► **Kap. 10**).

Die Handlungsfelder von privaten Bauherrinnen und Bauherren sowie Grundstückseigentümerinnen und -eigentümern, aber auch von Bauenden und Fachleuten werden im Besonderen adressiert. Auch individuelle Vorsorgen auf dem Grundstück können einen Beitrag zur Klimaanpassung darstellen und maßgebend zum Objektschutz sowie zur Förderung der Gesundheit und körperlichen Unversehrtheit von Mensch und Tier beitragen. Bereits gezielt platzierte (bauliche) Einzelmaßnahmen können Synergieeffekte entfalten. Beispielsweise trägt die Entsiegelung von Flächen oder das Pflanzen von Bäumen zur Reduzierung von sommerlichen Hitzeinseleffekten bei und unterstützt das natürliche Regenwassermanagement. Darüber hinaus wirken sich die Maßnahmen positiv auf das Innenraumklima und den thermischen Komfort von Menschen in Räumen aus. Nicht zuletzt wird der städtischen Flora und Fauna ein Lebensraum bereitgestellt und damit ein Beitrag zur Förderung der urbanen Artenvielfalt geschaffen.



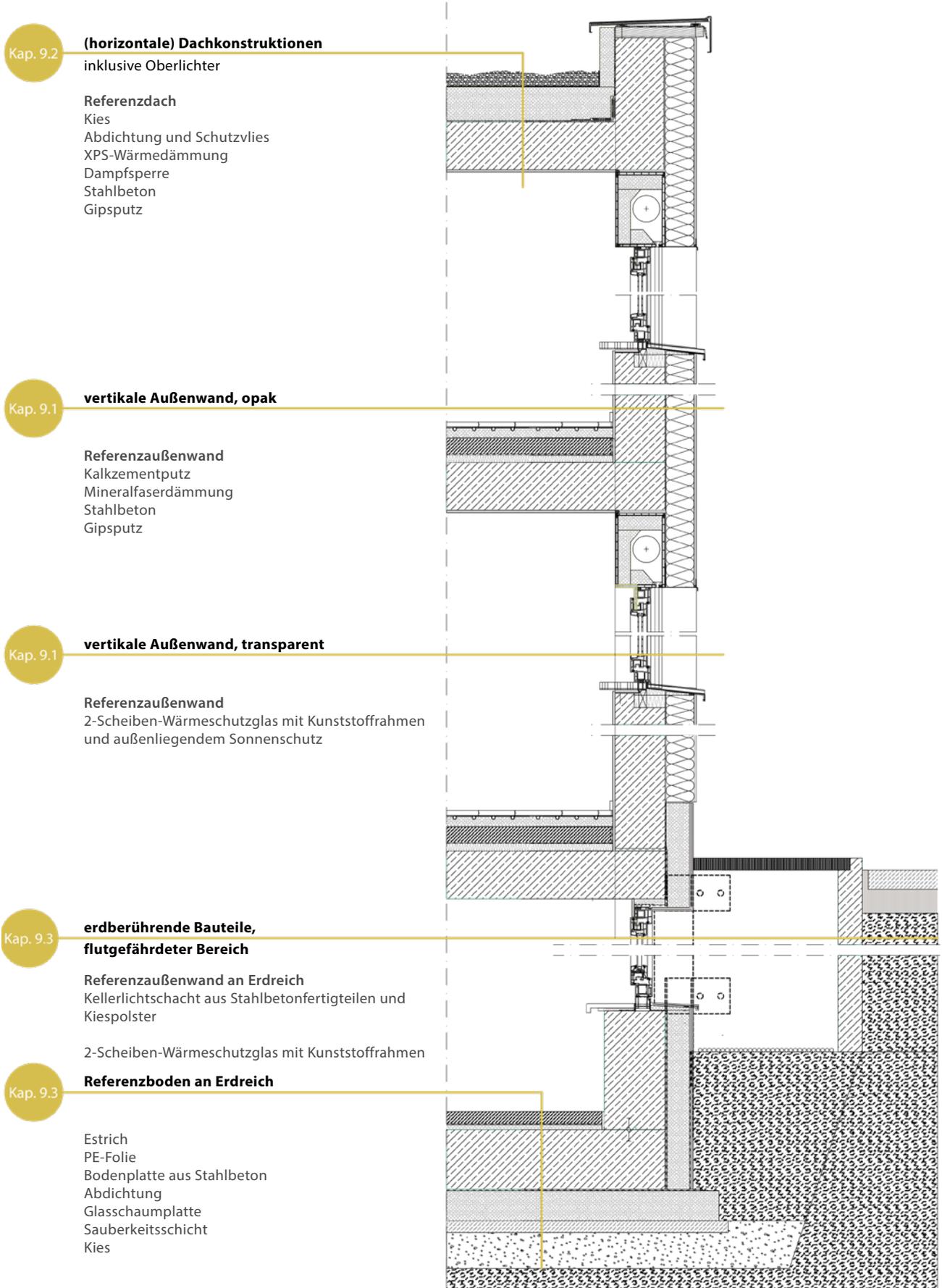
**Abb. 16** Aufbau der Broschüre in Teil B. Der Fokus liegt auf der Darstellung von baufachlichen Handlungsempfehlungen zur Anpassung an extreme Wetterereignisse für Liegenschaft und Gebäude.

## 7.1 Beschreibung der Musterliegenschaft

Bei der Musterliegenschaft handelt es sich um ein fiktives Mehrfamilienhaus im urbanen Kontext. Ein Standort für die Liegenschaft wird nicht festgelegt, da potenziell auftretende Schadensbilder durch Extremwetterereignisse unabhängig von örtlichen Gegebenheiten bzw. der Exposition definiert und analysiert werden.

Im Außenraum der Liegenschaft befinden sich, neben der östlichen Tiefgarageneinfahrt, weitere Infrastrukturwege. Westlich und südlich erstrecken sich zur Liegenschaft zugehörige Freiflächen (► **Abb. 16**). Beim Gebäude auf der Liegenschaft handelt es sich um einen nach Osten/Westen orientierten 3-geschossigen Wohnriegel mit Kellergeschoss. Das Referenzgebäude ist in einem Neubaustandard nach Anforderungen des Gebäudeenergiegesetzes konzipiert und oberirdisch in 9 Wohneinheiten untergliedert. Unterirdisch befinden sich die Tiefgarage mit Automobil- und Fahrradstellplätzen sowie Abstell- und Hauswirtschaftsräume.

Die Bauteilaufbauten sind ► **Abb. 17** zu entnehmen. Bei den Referenzbauteilen werden keine speziellen Schutzvorrichtungen an Extremwetterereignisse sowie Anforderungen an das Nachhaltige Bauen berücksichtigt. Bei der Dachkonstruktion handelt es sich um ein Warmdach aus Stahlbeton mit Gefälledämmung und Kiesschüttung. Die Außenwand besteht ebenfalls aus Stahlbeton mit Wärmedämmverbundsystem. Die transparenten Bauteile bestehen aus Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung mit Kunststoffsterrahmen sowie außen liegendem Rollladen. Der gedämmte Keller wird über einen Lichtschacht beleuchtet und belüftet. Die Kellerfenster sind ebenfalls als Zweifach-Kunststoffsterverglasung ausgeführt.



**Abb. 17** Referenzbauteile sowie Verweise zu den Bauteilgruppen.

## 7.2 Methodik

Für die Beurteilung und den Vergleich von baulichen Klimaanpassungsmaßnahmen für Liegenschaft und Gebäude werden nachfolgend die notwendigen methodischen Schritte und Auswertungsgrößen erläutert. Den Ausgangspunkt aller Untersuchungen bildet die unter ► **Kap. 7.1** vorgestellte Musterliegenschaft inkl. Referenzgebäude. Bauliche Klimaanpassungsmaßnahmen werden mithilfe der Musterliegenschaft dargestellt sowie quantitativ oder qualitativ verglichen und bewertet.

Einführend werden in ► **Kap. 8** die vielschichtigen Auswirkungen im Außenraum infolge der Extremwetterereignisse Hitze, Starkregen und Hochwasser sowie Sturm und Hagel qualitativ in Schadensbildern beschrieben. Vertiefend folgt eine Darstellung von Anpassungsmaßnahmen, mit dem Fokus auf die Transformation urbaner Oberflächen sowie die Integration grüner Infrastruktur. Positive Wechselwirkungen werden exemplarisch anhand dieser Auswahl erläutert.

Der Bauteilkatalog in ► **Kap. 9** dient als „schnelles Nachschlagewerk“. Eine vollständige Auflistung aller möglichen Maßnahmen und Regelwerke wird nicht angestrebt. Für jede Bauteilgruppe werden unterschiedliche Konstruktionsvarianten betrachtet und hinsichtlich des Klimaanpassungspotenzials diskutiert. Schwerpunkte des Katalogs sind die folgenden Bauteilgruppen ► **Abb. 17**:

- Gebäudehülle mit vertikalen opaken und transparenten Oberflächen,
- (horizontale) Dachkonstruktionen inklusive Dachoberlichter sowie
- Kellerbauteile inklusive Tiefgarage.

### Infobox

#### Übertemperaturgradstunde

Wird definiert in Kelvin-Stunden [Kh] und gibt die Temperaturüberschreitung der Operativtemperatur über den definierten Temperatur-Grenzwert je Zeiteinheit an. Sie ist die Summe aller Produkte aus Dauer und jeweiliger Höhe der Temperaturüberschreitungen.

Der Temperatur-Grenzwert ist abhängig von der Sommerklimaregion des Gebäudestandorts und liegt für Potsdam bei 26 °C. Zur Einhaltung der Anforderungen dürfen die Übertemperaturgradstunden den Wert von 1.200 Kh/a bei Wohngebäuden nicht überschreiten. Die Ermittlung erfolgt durch eine thermische Gebäudesimulation, für die nach DIN 4108-2 Vorgaben definiert sind, wie interne Wärmeeinträge oder der Nachtluftwechsel.

Die textliche und visuelle Strukturierung ist je Bauteilgruppe vergleichbar. Beginnend werden zunächst alle Schichtaufbauten des Bauteils sowie zugrunde liegende Kennzahlen gelistet. Die gewählten Konstruktionen sind anhand der gültigen Werte des Gebäudeenergiegesetzes (GEG, Anlage 1 bzw. Anlage 7) dimensioniert. Randbedingungen der Kennzahlen im Bauteilkatalog sind:

- Vergleichbarer Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert). Dies führt im Einzelfall zu unüblichen Schichtdicken im Bauteil, dient jedoch der besseren Vergleichbarkeit.
- Flächenbezogene Masse. Der Wert summiert sich aus den Rohdichten und Schichtdicken der jeweiligen Schichten.
- Wirksame Speicherfähigkeit. Der Wert wird mithilfe des vereinfachten Verfahrens der wirksamen Dicke in Anhang C der DIN EN ISO 13786 ermittelt.

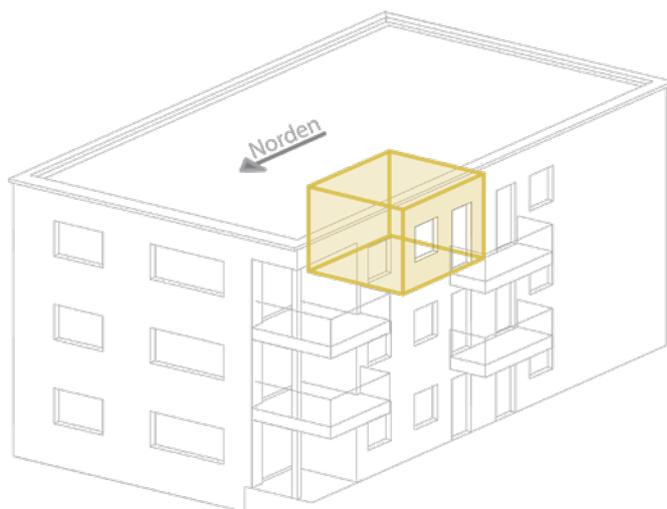
Es folgt die Beschreibung einwirkender Wetterelemente. Mögliche resultierende und relevante Schadensbilder durch Hitze, Schlag- und Starkregen, Hochwasser sowie Sturm und Hagel am Bauteil werden dargestellt. Darauf aufbauend werden Anpassungsmaßnahmen mit Bezug auf die potenziellen Schadensbilder vorgestellt.

Um den Hitzebeitrag durch Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung sowie die maßgebenden Faktoren auf bzw. durch das Bauteil zu ermitteln, werden alle Konstruktionen mithilfe von WUFI Plus (WUFI® Plus 2019) thermisch simuliert. Die Analyse sowie der Vergleich erfolgen anhand der Übertemperaturgradstunden (► **Infobox**) sowie außen- und innenseitiger Oberflächentemperaturen.

Der Referenzraum ist einem westlich orientierten Raum im 2. OG der Liegenschaft nachempfunden (► **Abb. 18**). Um die Ergebnisse möglichst auch auf andere Gebäude übertragen zu können, wurde ein repräsentativer bzw. standardisierter Raum mit einer Grundfläche von  $10,5 \text{ m}^2$  und einem Volumen von  $25,0 \text{ m}^3$  gewählt, der je eine Außenwand sowie eine Dachfläche aufweist. Die Zonen hinter den Innenwänden und unterhalb des Bodens sind als Innenraumzonen angelegt. Die Außenwand besitzt zwei unterschiedlich große Fenster, die insgesamt 39 % ihrer Fläche einnehmen. Das Dach ist der obere Raumabschluss. Die Klimadaten sind anhand der Klimaregionen der DIN 18599-10 zum Referenzstandort Potsdam gewählt. Als Referenz für alle weiterführenden Berechnungen wird der Außenwand, der Verglasung inkl. Sonnenschutzsystem sowie dem Dach eine Referenzkonstruktion zugrunde gelegt, vgl. ► **Abb. 17**. Dieser Referenzraum weist ca. 2.050 Übertemperaturgradstunden auf und erfüllt somit aufgrund des hohen Fensterflächenanteils nicht den sommerlichen Wärmeschutz.

Alle quantitativen Vergleiche der Bauteile stehen im Verhältnis zur Performanz des Referenzgebäudes. Dabei lässt sich das Anpassungspotenzial anhand der prozentualen Abweichung der Übertemperaturgradstunden feststellen, unabhängig von der Einhaltung des absoluten Grenzwerts. Die Veranschaulichung der Oberflächentemperaturen hingegen zeigt detailliertere Erkenntnisse in Bezug auf die Wärmedämmung, die wirksame Speichereigenschaft und die Oberflächeneigenschaften (beispielsweise Einflüsse der Putzfarbe).

Die Anpassungsmaßnahmen an Stark- und Schlagregen, Hochwasser, Sturm und Hagel sowie Sanierungs- und Erweiterungsmöglichkeiten sind qualitativ für jede Konstruktionsvariante dargelegt. Die für jedes Bauteil angegebenen technischen Regelwerke in den Infoboxen dienen der Hintergrundinformation und Planungsgrundlage. Normen zur Tragwerksplanung, zu Untersuchungs- sowie Berechnungsmethoden und Detailausführungen werden nicht aufgeführt.

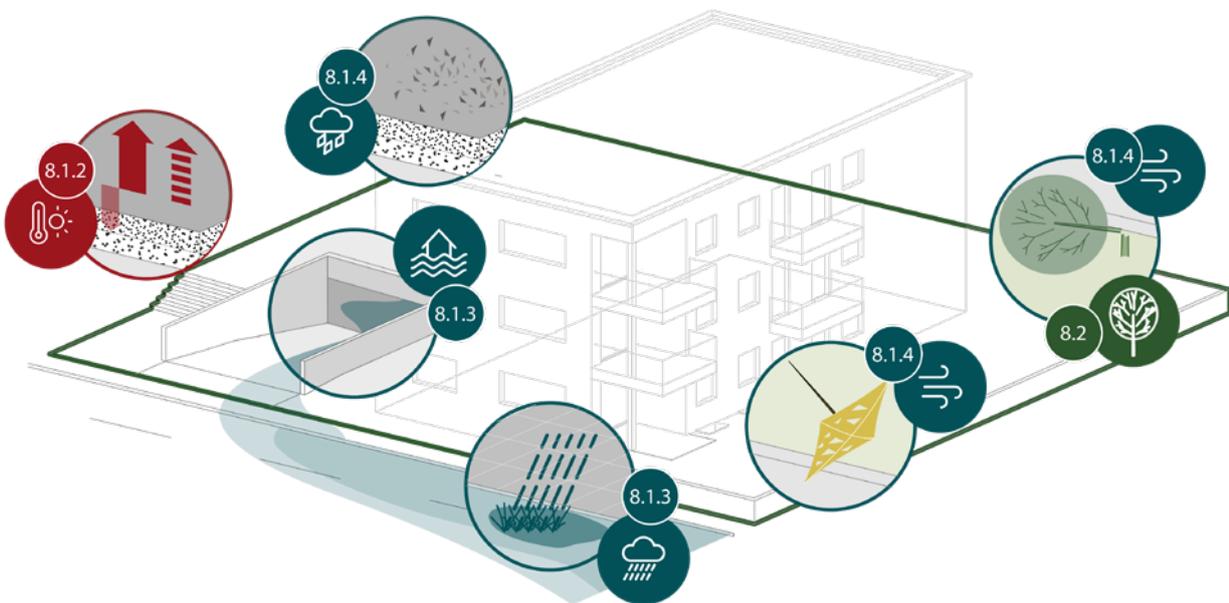


**Abb. 18** Referenzraum für die thermische Untersuchung und den Vergleich der Konstruktionsvarianten.

# 8 Liegenschaft und Außenraum

In diesem Kapitel werden die Potenziale von Liegenschaften, d. h. von Grundstücken, und Außenräumen zur Anpassung an den Klimawandel aufgezeigt.

Diverse Einflüsse wie Solarstrahlung und Temperatur, Wind und Niederschlag sowie Sturm und Hagel wirken auf Siedlungs-, Verkehrs- und Gebäudeoberflächen ein. Treten die Einflüsse mit hoher Intensität auf, können Schadensbilder auf dem Grundstück sowie am und im Gebäude die Folge sein (► **Abb. 19**). Grundstückseigentümerinnen und -eigentümer können bereits durch gezielte Anpassungsmaßnahmen im Außenraum zur Reduzierung von Schadensbildern beitragen und den Objektschutz und die Sicherheit der Liegenschaft erhöhen. Aufbauend auf der Darlegung von potenziellen Schadensbildern und Gefahren infolge Extremwetterereignissen werden in ► **Kap. 8.1** (bauliche) Maßnahmen zur Klimaanpassung durch die Transformation von urbanen Oberflächen auf Liegenschaften aufgezeigt. In ► **Kap. 8.2** werden ergänzend die vielfältigen Anpassungspotenziale von grünen Infrastrukturen thematisiert.



**Abb. 19** Potenzielle Schadensbilder auf einer Liegenschaft infolge der Einwirkung von Extremwittersituationen. Die Ziffern neben den Icons beziehen sich auf die Kapitelverweise der entsprechenden Anpassungsmaßnahmen.

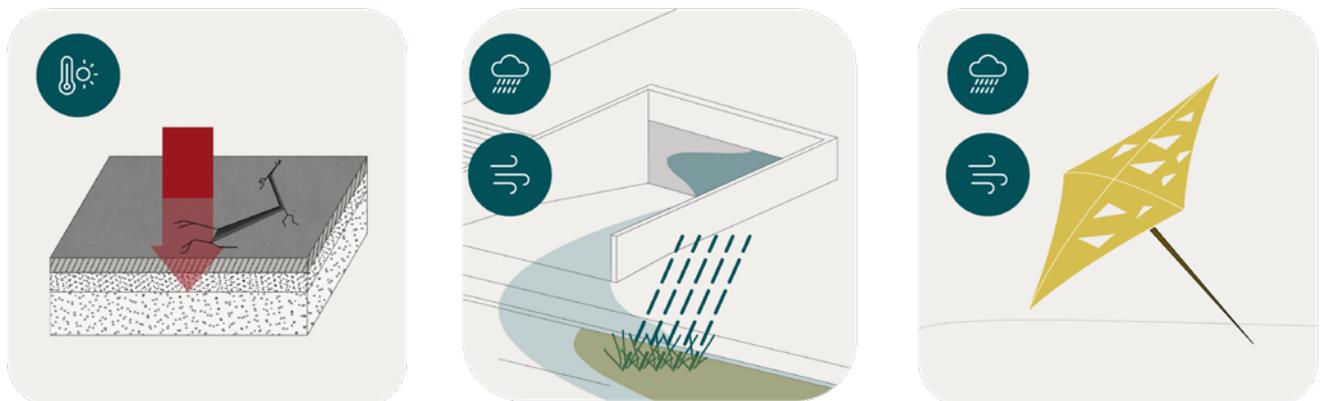
## 8.1 Urbane Oberflächen

Die baulich-räumliche Gestaltung urbaner Oberflächen im Außenraum gehört zu den wesentlichen transformativen Handlungsfeldern der Städte. Lebens- und Umweltqualität, Identität und Eigenart sowie die Teilhabe in der kommunalen Gesellschaft werden durch die Gestaltung urbaner Oberflächen maßgeblich beeinflusst. Die meisten Siedlungs-, Verkehrs-, Grundstücks- und Gebäudeoberflächen sind bislang auf die möglichst dauerhafte Erfüllung einzelner monofunktionaler Zwecke ausgerichtet. Sie bieten aber einen deutlich größeren Gestaltungsspielraum bezüglich Funktionalität und Adaptivität sowie Qualität und Ästhetik. Zugleich bestehen untrennbare Wechselbeziehungen von Nutzung und Gestaltung urbaner Flächen zur Anpassung an extreme Wetterereignisse wie Hitze, Starkregen und Hochwasser sowie Hagel und Sturm. (Leistner, P. et al. 2018)

Die Transformation von urbanen Oberflächen auf (privaten) Liegenschaften und Grundstücken bietet vor allem zur Anpassung an Hitze und Starkregen vielfältige Potenziale. Bei Neu- und Umgestaltungen von Liegenschaften sollten immer sogenannte „No-regret-Maßnahmen“ umgesetzt werden. Diese Maßnahmen verfolgen das Prinzip, dass sie unabhängig der Klimawandelfolgen ökonomisch, ökologisch und sozial Vorteile bieten. Der positive Nutzen für die Gesellschaft ist damit auch dann gegeben, wenn der Grund für die eigentliche Anpassung nicht eintritt. (Hereon 2013)

### 8.1.1 Schadensbilder

Einflüsse durch spezifische Wetterelemente wie Solarstrahlung und Temperatur, Wind und Niederschlag sowie Sturm und Hagel wirken auf alle Oberflächen ein. Treten die Einflüsse mit hoher Intensität innerhalb eines kurzen Zeitraums auf, können daraus Schadensbilder resultieren (► **Abb. 20**). Eintrittswahrscheinlichkeit und Ausprägung der Wetterelemente und die daraus abzuleitenden Vulnerabilitäten hinsichtlich eines Risikos sind regional stark unterschiedlich. Entsprechend divers sind die Schadensbilder infolge Hitze, Starkregen und Überschwemmung, Hagel und Sturm. Auf jeder Liegenschaft sind Vulnerabilitäten individuell zu berücksichtigen und Vorsorgen zu treffen. Grundstückseigentümerinnen und -eigentümer können beispielsweise anhand (digitaler) Karten oder Risikoanalysen Aussagen zur Risikoeinschätzung gegenüber Extremwetterereignissen einer spezifischen Region sowie für Immobilien abrufen (BBSR 2018a).



**Abb. 20** Darstellung möglicher Schadensbilder urbaner Oberflächen infolge auftretender Extremwetterereignisse durch links Hitze, mittig Starkregen und Hochwasser sowie rechts Hagel und Sturm.

### **Potenzielle Schadensbilder durch Hitze**

Urbane Räume sind besonders vulnerabel gegenüber Hitze. Insbesondere die nächtliche Auskühlung ist im Vergleich zur freien Landschaft stark eingeschränkt (► Kap. 5.2). Dadurch sind Tropennächte (► Kap. 5.3) vermehrt in urbanen Räumen festzustellen. Lang anhaltende und hohe Lufttemperaturen sowie eine beeinträchtigte Nachtruhe stellen ein Gesundheitsrisiko für Menschen dar. Bei älteren Personen und Vorerkrankten treten infolge von Hitze vermehrt Regulationsstörungen und Kreislaufprobleme auf. (UBA 2021b)

Gleichzeitig können Oberflächen infolge einer hohen sowie lang anhaltenden Hitze einwirkung einen Hitzeschaden oder -bruch erleiden. Dabei handelt es sich um ein Aufwölben und -platzen der Oberfläche aufgrund einer Materialermüdung, auch „Blow-up“ genannt. Primär sind von diesem Schadensbild Verkehrswege wie Betonstraßen oder Brückenlager betroffen. Ein „Blow-up“ entsteht, wenn die Dehnungsfuge beispielsweise zwischen Betonfertigelementen zu gering dimensioniert ist. Durch auftretende Spannungen infolge der Materialerwärmung schieben sich die Betonplatten gegeneinander und platzen schließlich auf. (Eger, M. H. P. 2019)

### **Potenzielle Schadensbilder durch Starkregen und Hochwasser**

Der Versiegelungsanteil in Ballungsräumen kann bis zu 90 % der Gesamtläche betragen und den Wasserhaushalt von Städten stark beeinträchtigen. Dadurch wird einerseits die Niederschlagsabflussmenge beschleunigt, andererseits reduziert die Versiegelung die Verdunstung sowie die Grundwasserneubildung. Intensive Regenereignisse können durch oberflächlichen Wasserzufluss einzelne Grundstücke oder auch ganze Siedlungsbereiche überschwemmen. Eine identische Gefahr stellen ausufernde Bäche infolge von Starkregenereignissen dar. (BBSR 2018b)

Eine Überflutung der Liegenschaft kann weiter durch Dach- und Platzwasser sowie aufgrund der topografischen Lage der Grundstücke wie in Hang- und Muldenlage sowie Ufernähe begünstigt werden. Daneben kann bei intensiven Regenereignissen das Grundwasser steigen und es kommt zu einem Rückstau in der Kanalisation. Wasser fließt auf das Grundstück und tritt meist durch undichte oder tiefer gelegene Stellen, wie zum Beispiel Lichtschächte, in das Gebäude ein. Schadensbilder fallen je nach Intensität von Regen und Hochwasser stark unterschiedlich aus. Hierzu zählt neben den eigentlichen Schäden durch das Wasser auch die Kontamination durch Schadstoffe wie Heizöl, Treibstoffe oder Fäkalien. Infolge lang anhaltender Starkregenfälle kann sich weiter der Boden, vor allem in Hanglage, aufweichen und zum Abgleiten von Gesteins- und Erdmassen führen. (BBSR 2018b)

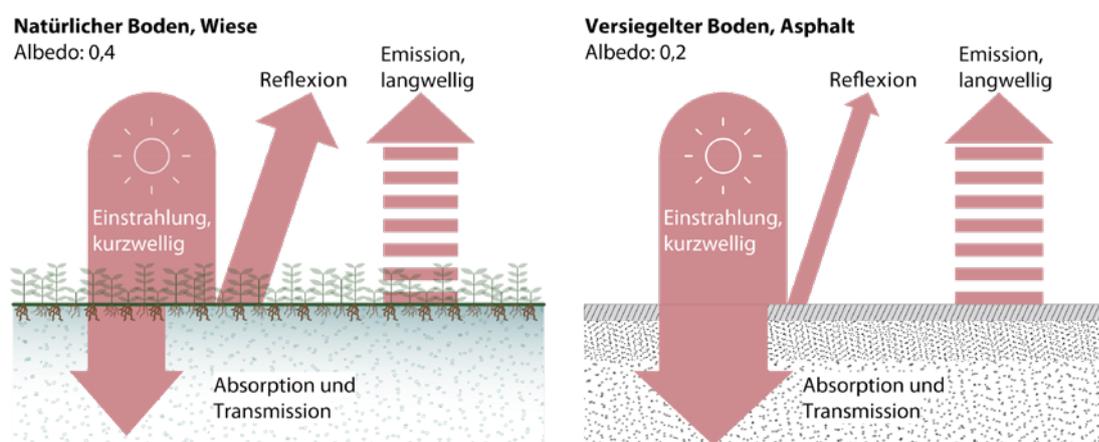
### **Potenzielle Schadensbilder durch Sturm und Hagel**

Hagelkörner können je nach Korngröße und Einschlagskraft Schäden auf der Liegenschaft hervorrufen. Besonders vulnerabel gegenüber Hagelschlag sind Pflanzen (► Kap. 8.1.4) sowie Gegenstände mit geringer Materialstärke wie Regenrinnen oder Sonnenschirme und Terrassenüberdachungen. Moderne Photovoltaikanlagen halten in der Regel einem Hagelschlag von bis zu fünf Zentimetern Korngröße stand. Weitere Informationen zu der Bauartegnung und Bauartzulassung von PV-Modulen können der DIN EN IEC 61215-1 entnommen werden. Dennoch führen in seltenen Fällen bereits kleinere Hagelkörner zu feinen Haarrissen und in der Folge zu Leistungseinbußen. Anlagenbetreiber sollten das äußere Erscheinungsbild sowie die Leistung unmittelbar

nach einem Hagelschlag auf Schäden überprüfen. Zusätzlich können durch starken Wind herumfliegende Gegenstände wie Blumenkübel oder Sonnenschirme schwere Schäden auf der Liegenschaft hervorrufen sowie eine Gefahr für Mensch und Tier darstellen.

### 8.1.2 Anpassung an Hitze

Der städtische Energiehaushalt wird insbesondere durch die kurzwellige Einstrahlung der Sonne und die langwellige Abstrahlung von Wärme bestimmt (► Kap. 5.1.2). Wärmeübertragungsvorgänge an und in Böden im qualitativen Vergleich bei natürlichen sowie versiegelten Oberflächen stellt ► Abb. 21 dar. Eintreffende kurzwellige Strahlung wird von Flächen absorbiert, transmittiert bzw. reflektiert. Gleichzeitig wird langwellige Wärmestrahlung emittiert.



**Abb. 21** Qualitative Darstellung der Strahlungsbilanz infolge solarer Einstrahlung einer natürlichen (links) und versiegelten (rechts) Umgebung.

Für die Energieaufnahme und die daraus resultierende Erwärmung von Oberflächen ist das kurzwellige Absorptionsverhalten entscheidend. Es hängt von der Wellenlänge des einfallenden Lichts, vom Material sowie von der Oberflächenbeschaffenheit und Farbgebung ab. Dunkel gefärbte Oberflächen erwärmen sich aufgrund einer erhöhten Absorption stärker als helle Oberflächen. Dieser Prozess hat auf die thermische Beanspruchung von Außenbauteilen erhebliche Konsequenzen. Eine wichtige Größe zur Bestimmung der thermischen Beanspruchung kann über die Albedo angegeben werden. Die Albedo definiert die Helligkeit von Körpern sowie Oberflächen und gibt an, wie groß der reflektierende Strahlungsanteil ist. Eine Albedo von 0,1 bedeutet, dass 10 % der einfallenden Strahlung vom Material reflektiert und 90 % absorbiert werden. (Mehra, S.-R. 2021)

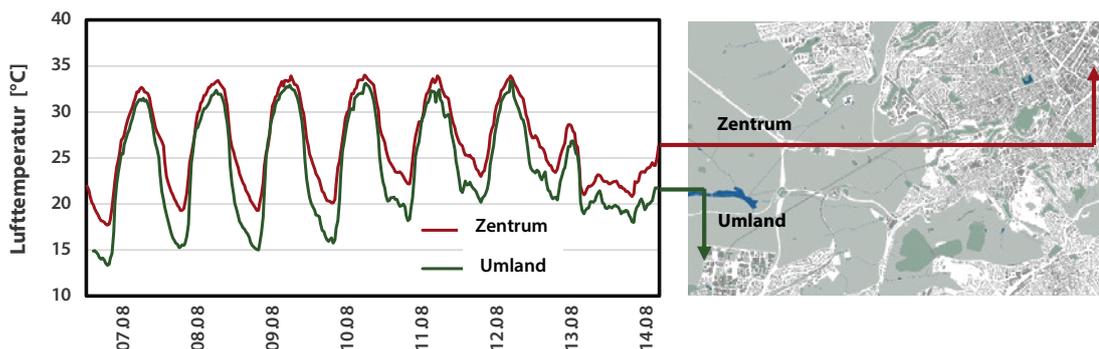
Eine Konsequenz der oben beschriebenen Prozesse ist die Erwärmung der Oberflächen in urbanen Räumen. Die Emission der langwelligen Strahlung führt zu einer Modifizierung der Lufttemperatur. ► Abb. 22 zeigt den Lufttemperaturverlauf einer Woche im August 2020 im Stuttgarter Zentrum (Abt. Stadtklimatologie 2020) sowie im Stuttgart Umland (IWS 2020). Insbesondere in der Nacht ist die Auskühlung im Zentrum mit einer Differenz von mehr als 4 K gegenüber dem Umland signifikant geringer (► Kap. 5.2, ► Abb. 22). Neben den unterschiedlichen Topografien der Standorte ist

#### Infobox

##### Anpassung an Hitze

Zur Anpassung an Hitze auf Liegenschaften sind helle Oberflächen dunklen Oberflächen vorzuziehen. Dabei ist auf einen geringen Absorptionsgrad bzw. eine hohe Albedo der Oberfläche zu achten.

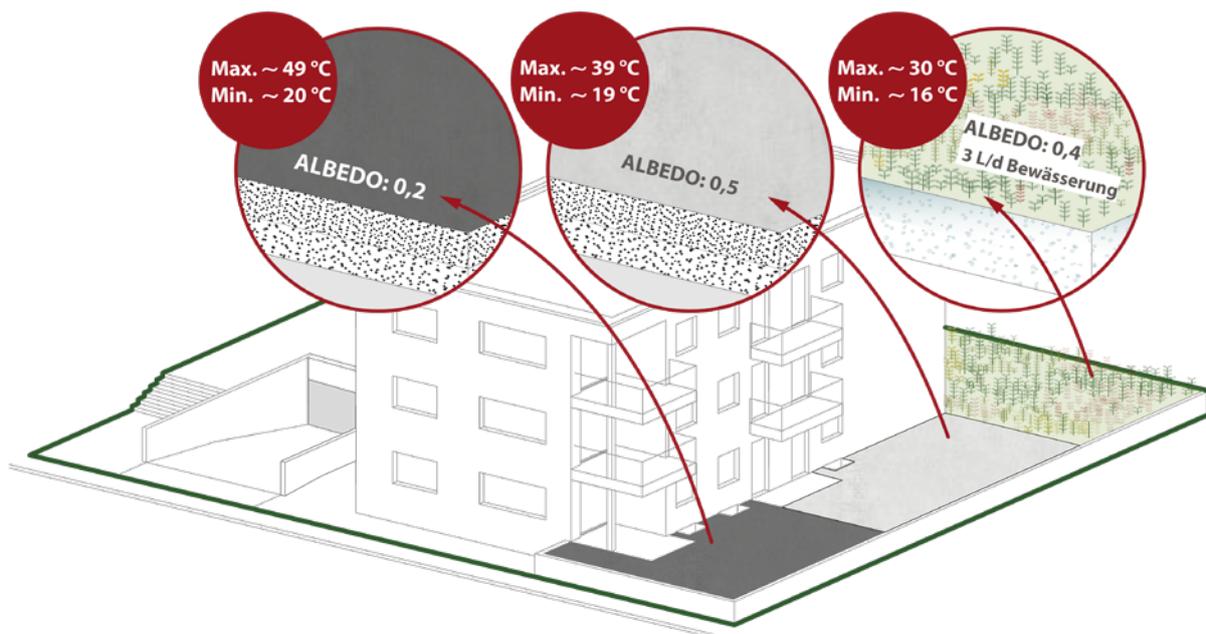
dies mit der hohen Wärmeabsorption im Zentrum am Tag und mit der zeitversetzten Wärmeabgabe (Emission) der Materialien in der Nacht zu begründen. Zur Anpassung an Hitze in urbanen Räumen ist daher nicht nur die Entsiegelung, sondern auch die Materialwahl und Oberflächenfarbe von Bedeutung. Zur Reduzierung von Hitzeinselseffekten sind Oberflächen mit hoher Albedo zu wählen, um den reflektierenden Strahlungsanteil zu maximieren. Gleichzeitig darf die Oberflächenfarbe keine Blendung der Stadtbewohnerinnen und -bewohner hervorrufen.



**Abb. 22** Vergleich der gemessenen Lufttemperatur im Stuttgarter Zentrum (Abt. Stadtklimatologie 2020) sowie im Stuttgarter Umland (IWS 2020) während einer Woche im August 2020. Links: Darstellung der Messdaten der Lufttemperatur. Rechts: Karte mit markierten Standorten.

► **Abb. 23** enthält den Vergleich von Oberflächentemperaturen zweier Betonflächen mit unterschiedlicher Farbgebung bzw. Albedo sowie einer Wiesenfläche an einem strahlungsreichen Tag auf der Referenzliegenschaft. Deutlich zeigt sich der Einfluss der Oberflächenfarbe anhand der minimalen und maximalen Oberflächentemperaturen. Bei der Wiesenfläche mit einer Bewässerung von drei Litern pro Tag und Quadratmeter wirkt sich zudem der Verdunstungsprozess bzw. die latente Kühlungsleistung positiv auf die Oberflächentemperatur aus (► **Kap. 8.1.2**).

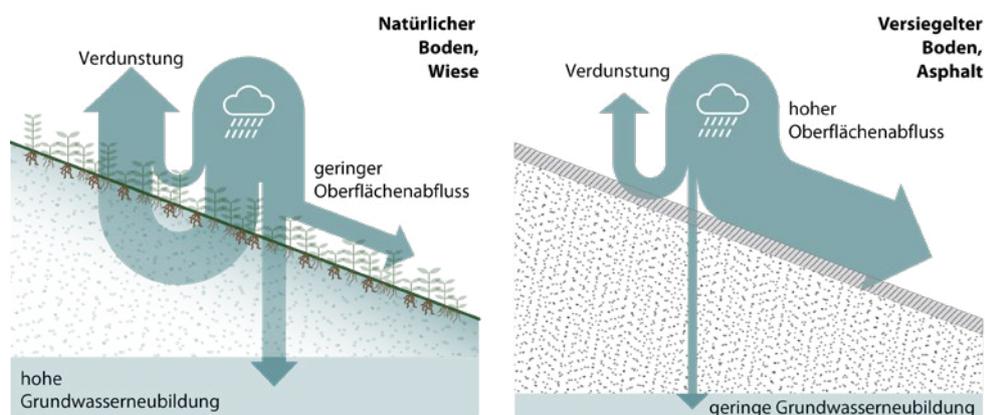
Darüber hinaus beeinflussen Wasserflächen in vielfältiger und positiver Weise das Stadt- und Mikroklima. Durch Evaporation sowie Transpiration wird die umgebende Luft abgekühlt. Synergien zu weiteren Extremwetterereignissen sind bei der Planung zu berücksichtigen. So können Wasserflächen das Regenwassermanagement auf Liegenschaften wirkungsvoll ergänzen (► **Kap. 8.1.3**).



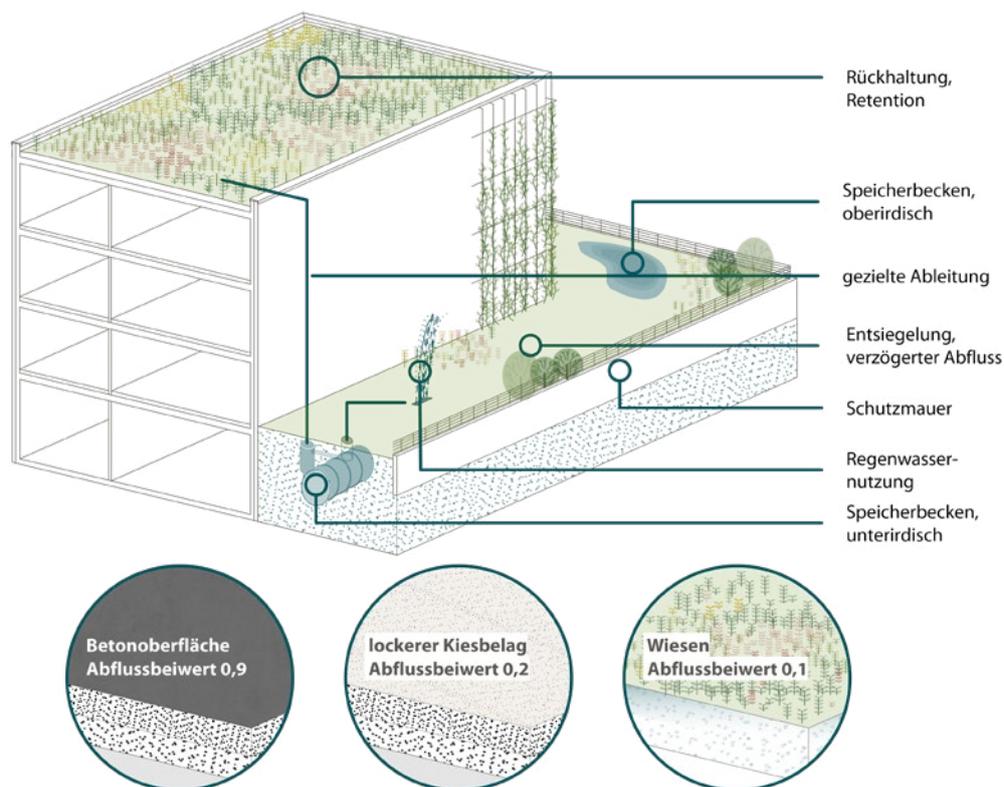
**Abb. 23** Vergleich der minimalen sowie maximalen Oberflächentemperaturen unterschiedlicher Oberflächen an einem strahlungsreichen Sommertag auf der Referenzliegenschaft in Potsdam.

### 8.1.3 Anpassung an Starkregen und Hochwasser

Zur Anpassung an Starkregen sowie zur Vorsorge gegen Hochwasser spielt das integrale Regenwassermanagement durch eine multifunktionale Flächennutzung eine bedeutende Rolle. Das Management greift insbesondere, wenn das natürliche Wasserhaltevermögen bei Böden und Oberflächen überschritten wird. In verdichteten, urbanen Räumen ist der Wasserhaushalt gegenüber dem Umland stark verändert (► Kap. 8.1.1). Durch eine hohe Oberflächenversiegelung kann nur ein geringer Anteil des Regenwassers durch den Boden versickern. Primär fließt das Regenwasser im urbanen Raum oberflächlich ab und wird unmittelbar in die Kanalisation geleitet. ► Abb. 24 zeigt beispielhaft den qualitativen Vergleich des Oberflächenabflusses bei natürlichen sowie versiegelten Böden. Bei natürlichen Böden wie Wiesen beträgt der Abflussbeiwert (► Kap. 9.2.2) nach DIN 1986-100 im flachen Gelände 0,1 sowie im steilen Gelände 0,2. Versiegelte Böden erreichen einen Abflussbeiwert von 0,9 sowie einen Spitzenabflusswert von 1. Weitere Abflussbeiwerte für urbane Oberflächen sind ► Tab. 3 zu entnehmen. (BBSR 2018b)



**Abb. 24** Qualitative Darstellung des Regenwasserabflusses. Links: Regenwasserabfluss auf einem steilen Gelände mit unversiegelter Wiesenfläche. Rechts: Regenwasserabfluss auf einem steilen Gelände mit versiegelter Asphaltfläche.



**Abb. 25** Ausgewählte vorbeugende Maßnahmen für Liegenschaften zur Anpassung an Starkregen und Hochwasser. Untenstehend sind weiter beispielhaft drei Abflussbeiwerte von gängigen Oberflächen auf privaten Grundstücken dargestellt.

## Infobox

### Anpassung an Starkregen

Zur Anpassung an Starkregen auf Liegenschaften sowie zur Unterstützung des kommunalen Regenwassermanagements sind unversiegelte Oberflächen versiegelten Oberflächen vorzuziehen.

Für eine wirksame Vorsorge in urbanen Räumen muss eine Zusammenarbeit von kommunalen Beschäftigten (insbesondere Entwässerungsbetrieb, Tiefbauamt, Grünflächenamt, Straßenbaulastträger und Stadtplanungsamt) sowie Privatleuten erfolgen. Kommunen können auf Basis der DIN 1986-100 die maximalen Abflussspenden von Grundstücken begrenzen und damit Verpflichtungen zu einem Regenwassermanagement auf Liegenschaften einführen. Um auch bei außergewöhnlichen Starkregenfällen Schäden zu reduzieren, muss ebenfalls ein gezielter Objektschutz auf Gebäude- sowie Bauteilebene berücksichtigt und umgesetzt werden. Anpassungsmaßnahmen auf Bauteilebene werden ausführlich unter ► **Kap. 9** thematisiert. Daneben kann die urbane Oberflächengestaltung der Liegenschaft wie folgt als vorbeugende Maßnahme dienen (BBSR 2018b):

- Abflussvermeidung und -verzögerung,
- Regenwasserspeicherung,
- Wegleiten des Wassers vom Gebäude.

► **Abb. 25** stellt ausgewählte vorbeugende Schutzmaßnahmen auf privaten Grundstücken am Beispiel der Referenzliegenschaft zusammenfassend dar (BBSR 2018b). Neben der Entlastung der Kanalisation beugen entsiegelte und bepflanzen Flächen wirkungsvoll gegen Hitzeinseleffekte vor. Ist der Boden nach oder während eines Starkregenereignisses gesättigt, greifen weitere Regenwasserrückhaltungsmöglichkeiten bzw. das gezielte Ableiten und Speichern des Wassers. Dazu zählt die (dezentrale) Rückhaltung, beispielsweise durch Gründächer oder Blau-Grüne Dächer (► **Kap. 9.2.3**), durch unter- und oberirdische Speicherbecken sowie durch Retentionsmulden und Sickerschächte. Wenn sich eine Geländetopografie in Richtung Gebäude neigt, sollten weitere Maßnahmen getroffen werden, um Wasser gezielt vom Gebäude abzuleiten. Hierzu zählen Senken, Bodenschwellen und Schutzmauern.

**Tab. 3** Abflussbeiwerte nach DIN 1986-100 bei unterschiedlichen urbanen Oberflächen.

ART DER FLÄCHE	SPITZENABFLUSS- BEIWER	MITTLERER ABFLUSS- BEIWER
Beton (Straße)	1	0,9
Betonpflastersteine	0,9	0,7
wassergebundene Kiesfläche	0,9	0,7
Verbundsteine mit Sickerfuge	0,4	0,2
Rasengittersteine	0,4	0,2
Rasenfläche	0,2	0,1

### 8.1.4 Anpassung an Hagel, Wind und Sturm

Bei versiegelten Oberflächen im Außenraum ist auf einen entsprechenden Hagelwiderstand zu achten. Natursteinplatten, Beton- oder Rasengittersteine weisen in der Regel eine hohe Resistenz gegen Hagelschlag auf. Holzterrassendielen können, je nach Hagelkorngröße und Einschlagskraft, Schäden erleiden. Bei behandelten Dielen ist nach einem Hagelereignis zu prüfen, ob Beschädigungen an der Oberfläche aufgetreten sind. Dringt Wasser über eine Schadensstelle in das Holz ein, kann dies bei diffusionshemmenden Schutzanstrichen zu Folgeschäden, beispielsweise Holzfäule, führen. Bei Freiland- und Terrassenüberdachungen ist der Einsatz von geeigneten Materialien zu berücksichtigen. Verbundsicherheitsglas, Doppelstegplatten oder auch speziell gewebte Sonnenschutzsegele weisen einen hohen Hagelwiderstand auf.

Für Obstbäume sowie Pflanzen- und Hochbeete im Freiland gibt es spezielle Hagel-schutzgewebe (► **Abb. 26**). Die Vorrichtungen sind über die Bäume und Beete mithilfe einer Metall-, Kunststoff- oder Holzkonstruktion zu spannen. Bodengebundene Vegetation mit geringer Wuchshöhe kann bei einer Hagelvorwarnung temporär mit Vliesen abgedeckt werden.

Regenrohre und -rinnen können bei Hagelschlag Dellen erleiden. Ist das Rohr aus Titanzink, Kupfer oder Aluminium, entsteht ausschließlich ein optischer Schaden. Zinkbeschichtete Rohre o. Ä. können infolge einer Beschädigung der Beschichtung rosten. Sowohl Regenrohre als auch -rinnen sind nach einem Hagelereignis zu kontrollieren. Hagelkörner können in Verbindung mit Laub und Verschmutzungen die Abläufe verstopfen und Wasserschäden am und im Gebäude verursachen. Zur Vorbeuge gegenüber Hagelschlag bei PV-Modulen sollte vor der Installation auf die Hagelhäufigkeit am Standort geachtet werden. Daraufhin ist die Exposition der Module gegenüber Hagelschlag zu berücksichtigen. Beim Kauf der Anlage ist neben einem passenden Versicherungsschutz auch auf Herstellergarantien sowie Zertifizierungen (beispielsweise nach DIN EN IEC 61215-1) zu achten. Nach einem Hagelschaden sind die beschädigten Module auszutauschen. Wird nach einem Hagelereignis eine geringere Leistung festgestellt, sollte ein Sachverständiger eingebunden werden.

## Technische Regelwerke

### Allgemein

Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen - DWA-A 118

### Grundstücksentwässerung

DIN 1986-100 - Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke

### Speicherung und anschließende Nutzung von Regenwasser

DIN 1989-1 - Regenwassernutzungsanlagen - Teil 1: Planung, Ausführung, Betrieb und Wartung

Einleitung von Regenwetterabflüssen aus Siedlungsgebieten in Oberflächengewässer

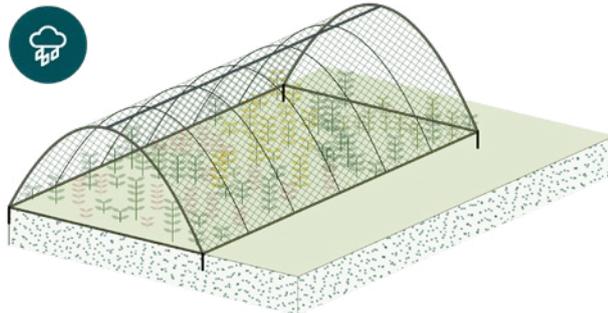
DWA-A 102/BWK-A 3, Teil 1 und Teil 2

## Infobox

### Anpassung an Hagel

Zur Anpassung an Hagel, Wind und Sturm auf Liegenschaften ist bei dem Verbauen von versiegelten Oberflächen auf einen entsprechenden Hagelwiderstand zu achten. Lose Gegenstände sind bei Unwetterwarnung aus dem Außenraum zu entfernen oder sturmsicher zu verankern.

Zur Vorbeugung gegen Sturmschäden ist bei Freiland- und Terrassenüberdachungen sowie Hagelschutzgewebevorrichtungen auf sturmsichere Befestigungen und Verankerungen zu achten. Für eine hohe Stabilität sind neben der Materialwahl und -stärke auch die Aussteifung sowie das Fundament entscheidend. Lose Gegenstände auf dem Grundstück, beispielsweise Trampoline, Sonnenschirme oder Blumenkübel etc., sind bei Sturmwarnung aus dem Außenraum zu entfernen oder sturmsicher zu verankern.



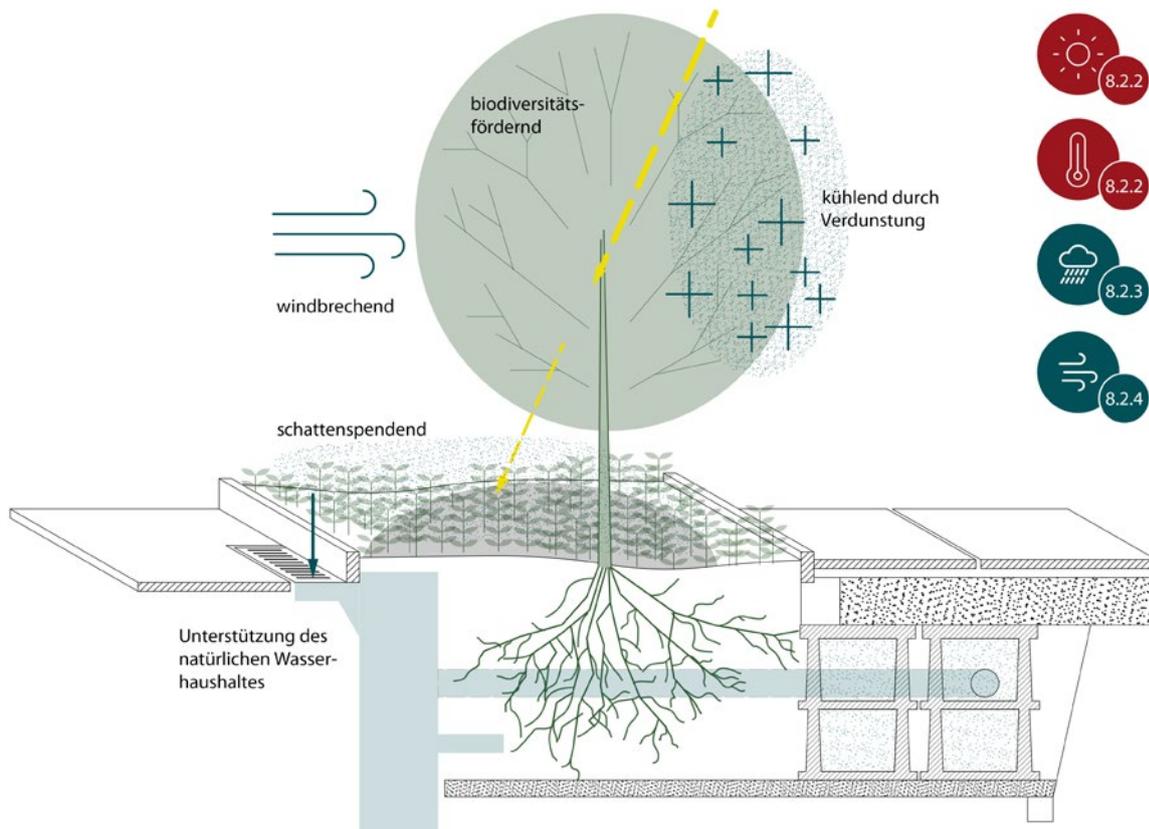
**Abb. 26** Hagelschutzgewebe zum Schutz von Obstbäumen sowie Pflanzen- und Hochbeeten im Freiland.

## 8.2 Vegetation

Urbanes Grün trägt auf vielfältige Weise zur Förderung einer nachhaltigen und zukunftsfähigen Stadtentwicklung bei. Hierzu zählen u. a. (BMUB 2015):

- Abmilderung der Folgen des Klimawandels (= Klimaschutz),
- Anpassung an den Klimawandel (= Klimaanpassung),
- Schutz des Bodens, des Wassers und der Luft,
- Erhalt des Artenreichtums,
- Förderung der Gesundheit und des Wohlbefindens der Menschen,
- Sicherung sozialer Funktionen,
- Steigerung der Lebensqualität und der Standortqualität.

In ► **Kap. 8.2.2 bis 8.2.4** werden die Funktionen von Grün zur Anpassung an den Klimawandel thematisiert. Die vielfältigen Beiträge eines einzelnen Baums zur Anpassung an Extremwetterereignisse stellt ► **Abb. 27** zusammenfassend dar. Synergien zur Resilienz der Klimaeinwirkungen Hitze (mit Strahlung und Temperatur), Sturm und Starkregen sowie Wechselwirkungen zur Biodiversität werden im Anschluss vertiefend am Beispiel von Stadtbäumen erläutert. Der Begriff „Stadtbaum“ ist dabei als Synonym für Bäume auf Liegenschaften und Grundstücken zu verstehen. Die Funktionen von Gründächern und -fassaden als Bestandteile der urbanen Vegetation werden in den ► **Kap. 9.1.7** sowie **Kap. 9.2.3** vertiefend aufgegriffen.



**Abb. 27** Zusammenfassende Darstellung der Funktionen eines einzelnen Stadtbaums zur Anpassung an Hitze, Sturm und Starkregen. Die Ziffern neben den Icons beziehen sich auf Kapitelverweise der entsprechenden Anpassungsmaßnahme.

Durch Planungs-, Management- und Förderinstrumente der Landschafts- und Freiraumplanung beeinflussen Kommunen in hohem Maße die Gestaltung und Entwicklung von Grün in der Stadt. Dabei sind neben der öffentlichen Hand Privatleute, Unternehmen mit Flächenbesitz sowie landwirtschaftlich-gärtnerische Unternehmen wichtige Akteure. Die Handlungsräume zur Gestaltung von Grünflächen sowie ihre Managements unterscheiden sich im privaten und öffentlichen Sektor. Zur Förderung von Grün auf privaten Flächen verfügen Kommunen über planungsrechtliche Werkzeuge, Informationsinstrumente wie Beratungen und Broschüren sowie finanzielle Förderungen. (BMUB 2015)

Die ► **Kap. 8.2 bis 8.2.4** bauen auf den Ergebnissen und Erkenntnissen des Grünbuchs Stadtgrün (BMUB 2015), des Weißbuchs Stadtgrün (BMUB 2017), der BBSR-Broschüre zum nachhaltigen Planen von Außenanlagen (BBSR 2019) sowie verschiedener Normen, Richtlinien und Empfehlungen auf. Hierzu zählen insbesondere Richtlinien und Empfehlungen der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau (FLL), der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) sowie des Arbeitskreises „Stadtbäume“ der Deutschen Gartenamtsleiterkonferenz (GALK).

Der Arbeitskreis „Stadtbäume“ der Deutschen Gartenamtsleiterkonferenz hat die sog. GALK-Straßenbaumliste erarbeitet (GALK 2021). Diese Liste beinhaltet konkrete Empfehlungen für Baumarten im städtischen Kontext. Die Auswahl von geeigneten sowie klimaresilienten Straßenbäumen erfolgte unter besonderer Berücksichtigung extremer Standortbedingungen in hoch verdichteten Städten. Weiter soll die Liste dazu beitragen, heterogene, klimaresiliente Baumarten bewusst in stadtplanerische Aufgaben zu integrieren. Der Arbeitskreis fordert, durch eine deutlich größere Pflanzenvielfalt das städtische Grün zu bereichern. So sind heterogene Baumbestände wesentlich besser an Extremwetterereignisse angepasst als monokulturelle Bestände. Im Jahr 2021 wurde zudem die Information „Bienengehölz“ in die Straßenbaumliste aufgenommen. Dargestellt ist das Nahrungspotenzial der Baumart für (Wild-)Bienen und weitere Insekten. Eine beispielhafte Auflistung nach (GALK 2021) von geeigneten Baumarten für den städtischen Kontext ist ► Tab. 4 zu entnehmen.

**Tab. 4** Auflistung von geeigneten Baumarten für den städtischen Kontext nach (GALK 2021).

	KLIMATOLERANZ	STRASSENBAUM- TAUGLICHKEIT	BIENENGEHÖLZ
<i>Acer campestre</i> Feldahorn	wärmeliebend, verträgt selbst an kalkhaltigen Südhängen große Trockenheit	geeignet	ja
<i>Alnus x spaethii</i> Purpurerle	frosthart, windfest	gut geeignet	
<i>Amelanchier arborea</i> Felsenbirne	frosthart, anspruchslos, nicht zu nass	geeignet	ja
<i>Gleditsia triacanthos</i> Dornenlose Gleditschie	stadtklimafest, gebietsweise frostempfindlich	geeignet	ja
<i>Tilia tomentosa</i> Silberlinde	verträgt längere Trockenheit, stadtklimafest, frosthart	gut geeignet	ja

### 8.2.1 Schadensbilder

Die durch das Stadtklima ► Kap. 5.2 veränderten (mikro-)klimatischen Bedingungen können ein gesundes Pflanzenwachstum stark beeinträchtigen. Zudem sind grüne Strukturen in urbanen Räumen direkten anthropogenen Einflüssen wie Schadstoffen sowie verdichteten und salzhaltigen Böden ausgesetzt. Die Vulnerabilität von Pflanzen ist daher in Städten besonders hoch. Gleichzeitig ist die Integration von Grün in der Stadt eine essenzielle Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel.

Nachfolgend werden anhand des Beispiels von Stadtbäumen mögliche Schadensbilder durch die Extremwetterereignisse Hitze, Sturm und Starkregen sowie Hagel dargestellt (► Abb. 28). Ein Schadensbild wird meist dann hervorgerufen, wenn multiple Stressoren über einen längeren Zeitraum auf den Baum einwirken. So ist ein Baum beispielsweise infolge eines lang anhaltenden Hitze- und Trockenstresses besonders vulnerabel gegenüber Schädlingsbefällen und Krankheiten.



**Abb. 28** Darstellung möglicher Schadensbilder bei Stadtbäumen infolge auftretender Extremwetterereignisse durch links Hitze, mittig Starkregen und Sturm sowie rechts Hagel.

#### Schäden durch Hitze- und Trockenstress

Bäume, die über einen lang anhaltenden und periodisch wiederkehrenden Zeitraum unter Hitze- und Trockenstress stehen, werfen ihr Blattwerk frühzeitig ab. Durch das Abwerfen des Laubes wird die transpirationsfähige Blattfläche verringert und folglich die verdunstende Wassermenge reduziert. (NABU 2021)

Eine unzureichende Wasserversorgung in Verbindung mit hoher, direkter Sonneneinstrahlung kann weiter zum Trocken- bzw. Sommerbruch führen. Große Äste brechen aufgrund von Spannungen im Geäst infolge der Erwärmung der Astoberfläche vom Stamm ab. Die Rissbildungen und Brüche erleichtern das Eindringen von Pilzen und erhöhen die Anfälligkeit gegenüber weiteren Schädlingen. Oft führt dies zu einer stark verkürzten Lebenserwartung des Baumes. (UBA 2019b)

### **Schäden durch Starkregen und Sturm**

Starkregenereignisse oder Sturmereignisse führen zum Abbrechen von Ast- sowie Blattwerk. Schwere Stürme (ab 89 km/h) können das Abknicken des Hauptstammes sowie die Entwurzelung des Baumes hervorrufen. Besonders vulnerabel gegenüber den Windeinwirkungen sind solitär stehende Bäume innerhalb einer Windeinzugschneise. Herabfallende Äste und umstürzende Bäume stellen insbesondere in dicht bebauten Gebieten eine erhebliche Gefahr für Mensch und Tier sowie angrenzende Objekte wie Gebäude und Kraftfahrzeuge dar. Durch Kontrollgänge sowie Baum-, Gehölz- und Unterhaltungspflegearbeiten können Sturmschäden vorgebeugt werden. Insbesondere alte Bäume sowie Bäume mit Krankheitssymptomen sind regelmäßig von Baumgutachtern zu kontrollieren. (NABU 2021; UBA 2019b)

Starkregenereignisse führen weiter zu aufgeweichten Böden und können somit die Standfestigkeit des Baumes bzw. des Wurzelwerks beeinflussen. Insbesondere nach anhaltenden Regentagen soll neben der Begutachtung des Kronen- sowie Stammbereichs auch die Bodenstruktur und das Wurzelwerk bzw. die Standfestigkeit des Baumes kontrolliert werden (UBA 2019b). Weitere Hinweise zur Pflege und Kontrolle von Bäumen im urbanen Raum können den „Richtlinien für Regelkontrollen zur Überprüfung der Verkehrssicherheit von Bäumen, Baumkontrollrichtlinien“ entnommen werden (FLL 2020).

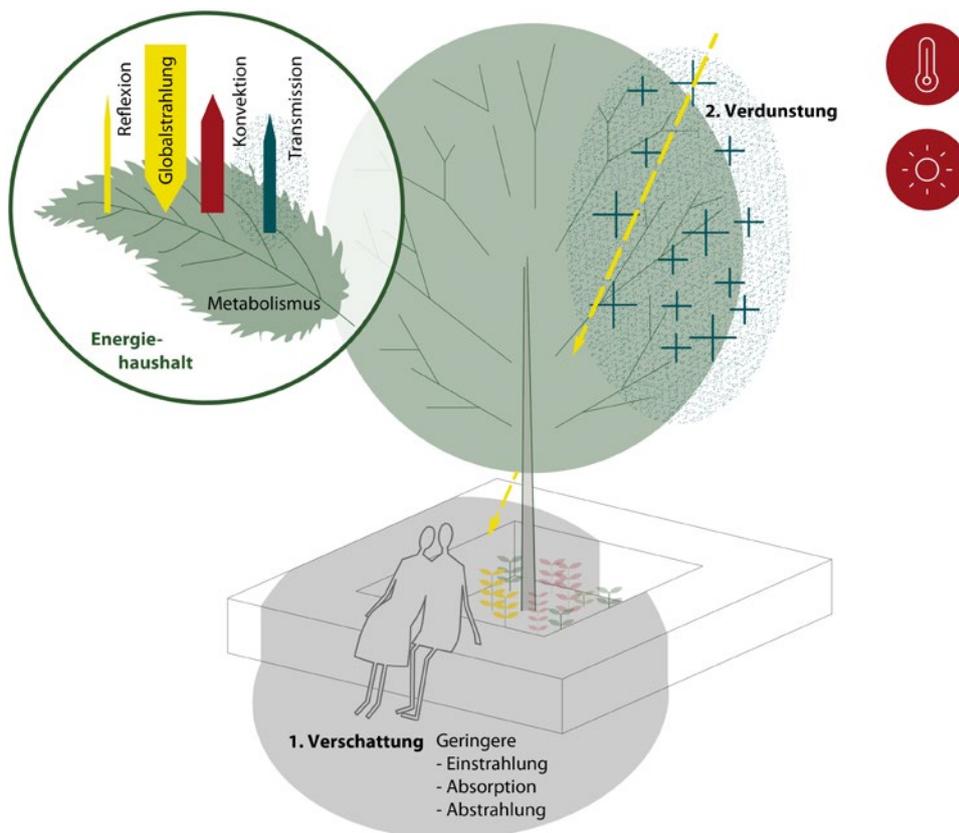
### **Schäden durch Hagel**

Schäden durch Hagel treten an Stamm, Ästen, dem Blattwerk und den Früchten auf. Großkörniger Hagel ruft Wunden an grobborkigen Baumteilen hervor. Dadurch wird das Eindringen von Wundfäulepilzen begünstigt, was wiederum zum partiellen Absterben des betroffenen Pflanzenteils führen kann. Weiter erleiden Triebe und Zweige Verletzungen durch „stumpfe Schläge“ und ein Pilzbefall wird an der Schadensstelle begünstigt (Triebsterbepilze). Die Blätter von Laubbäumen können je nach Hagelkorngröße und auftretender Geschwindigkeit durchschlagen und zerrissen werden. Die verletzten Blatteile verfärben sich nach wenigen Tagen und verwelken. Früchte eines Baumes werden abgeschlagen oder verletzt.

## 8.2.2 Anpassung an Hitze

Wie in ► Kap. 5.3 dargelegt, wird die Sommerhitze in Deutschland nach derzeitigen Prognosen das stärkste Änderungssignal in den nächsten Dekaden aufweisen. Grüne Strukturen tragen durch zwei unterschiedliche Wirkfunktionen zur Reduzierung von Hitzestress in der gebauten Umwelt bei und sind demnach besonders wirkungsvoll (► Abb. 29).

1. Modifizierung der urbanen Strahlungsbilanzen. Grüne Strukturen haben eine geringere Wärmespeicherkapazität als Gebäude und versiegelte Flächen. Bei Bäumen kommt hinzu, dass durch den Schattenwurf der Baumkrone die kurzweilige Sonnenstrahlung abgeschirmt wird und daraus eine veränderte Energiebilanz bei urbanen Oberflächen resultiert. Dies führt wiederum zu einer Reduzierung der Oberflächen-, Luft- und Strahlungstemperaturen (► Kap. 8.1.2).
2. Reduzierung der Lufttemperatur. Pflanzenblätter verdunsten über ihre Oberflächen Wasser. Das Wasser wird vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand umgesetzt, was Energie benötigt (= Verdunstungs- oder Transpiration-skühlung). Die Pflanze schützt sich durch diesen Prozess vor Überhitzung. Gleichzeitig wird der Luft Wärme entzogen und sie kühlt ab.



**Abb. 29** Wirkfunktionen grüner Strukturen am Beispiel von Bäumen zur Reduzierung von Hitzestress sowie zur Anpassung an Überhitzung durch Verschattung und Verdunstung.

## Infobox

### Bäume auf Liegenschaften

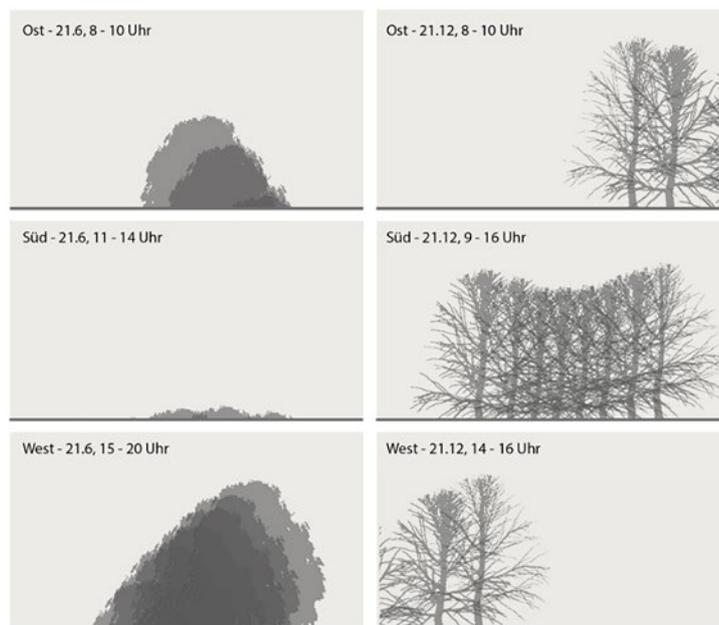
Bereits ein einzelner Baum auf einer Liegenschaft kann den Strahlungshaushalt der umgebenden Oberflächen signifikant verändern und zur Verbesserung von Mikro- und Raumklima beitragen.

Bäume sollten zur Unterstützung von positiven Wechselwirkungen des Innenraumklimas primär vor Ost- sowie Westfassaden gepflanzt werden.

## 1. Veränderte Strahlungsbilanzen durch Stadtbäume

Verschattungen durch Baumkronen können die Strahlungsbilanz von Fassaden ändern und eine Reduzierung des kurzwelligeren Solarstrahlungseintrags auf die Fassade hervorrufen. Ein reduzierter Strahlungseintrag verringert die Absorption am Bauteil und damit sein Aufheizen (► Kap. 8.1.2). Dadurch wird der Wärmestrom bzw. -eintrag in den Raum reduziert, was wiederum das Raumklima positiv beeinflusst.

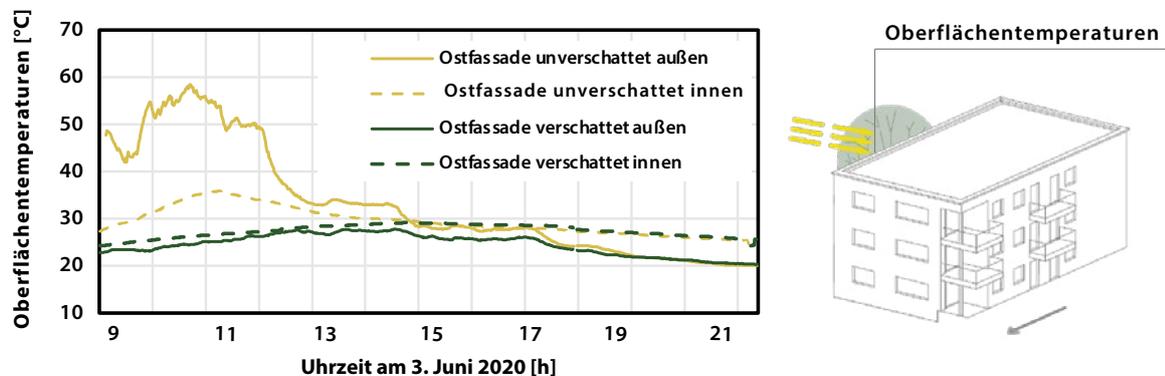
Zur gezielten Veränderung der Strahlungsbilanzen von vertikalen sowie horizontalen Oberflächen durch Stadtbäume sind in der Planung die geometrischen Beziehungen von Baum, Sonnenverlauf sowie Oberflächen zu berücksichtigen. Weiter ist zu beachten, dass sowohl der Sonnenverlauf in der alternierenden Klimazone über den Tages- sowie Jahresverlauf variiert (► Kap. 5.1.2) als auch Laubbäume ihr Blattwerk und damit den Transmissionsgrad über die Vegetationsperioden verändern. Ziel in der alternierenden Klimazone ist es, den Schattenwurf auf die Fassade in den Sommermonaten zu maximieren sowie in den Wintermonaten zu minimieren. Dadurch können, neben der Verbesserung des Mikroklimas, auch positive Wechselwirkungen auf Raumebene, wie die Reduzierung der Raumlufttemperatur im Sommer, erzielt werden. ► Abb. 30 zeigt beispielhaft den Schattenwurf einer Winterlinde auf der Liegenschaft auf die vertikalen Oberflächen des Referenzgebäudes je nach Orientierung. Die Krone der Linde mit einem Radius von 4,5 m befindet sich 5 m von der jeweiligen Fassadenseite entfernt. Der Vergleich des Schattenwurfs zeigt, dass Bäume besonders effektiv vor Ost- und Westfassaden wirken. Auf der Südfassade verschatten sie hingegen im Winter stark, im Sommer nur zu einem geringen Anteil die Fassade. Bäume sollten, zur Unterstützung von positiven Wechselwirkungen des Innenraumklimas, daher primär vor Ost- sowie Westfassaden gepflanzt werden.



**Abb. 30** Wirkfunktionen grüner Strukturen am Beispiel von Bäumen zur Reduzierung von Hitzestress sowie zur Anpassung an Überhitzung durch Verschattung und Verdunstung.

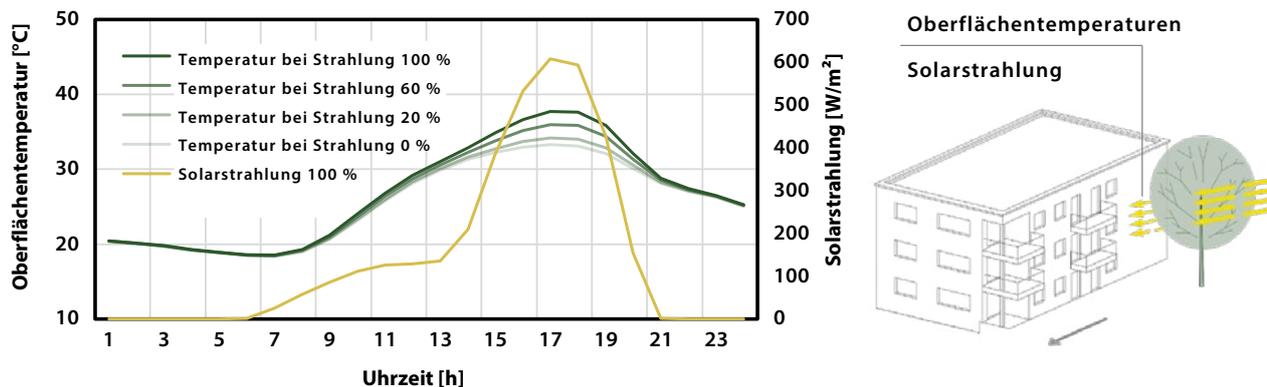
Ein reduzierter Strahlungseintrag auf (urbane) Oberflächen hat aufgrund geringerer Absorption eine niedrigere Oberflächentemperatur zur Folge (► Kap. 8.1.2). Diese wirkt sich in mehrfacher Weise positiv auf das Mikro- sowie Raumklima aus. Beispielsweise wird der Umgebung durch eine verringerte Emission der langwelligen Strahlung weniger Wärme zugeführt. Weiter reduziert sich der Wärmestrom und damit der Wärmeeintrag in das Gebäude. Beide Prozesse tragen zur Vermeidung von Überhitzungen von urbanen Außen- und Innenräumen bei.

► **Abb. 31** zeigt die gemessenen Oberflächentemperaturen im Außen- und Innenraum einer nach Osten orientierten Fassade in Stuttgart. Die Fassade mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von  $0,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  wurde im Juni 2020 an einem wolkenlosen Tag messtechnisch untersucht. Der gelbe Graph zeigt den Temperaturverlauf eines unverschatteten Fassadenabschnitts. Der grüne Graph zeigt den Temperaturverlauf eines durch eine Winterlinde verschatteten Fassadenabschnitts. Deutlich ist die Auswirkung des Baumes auf die Oberflächentemperaturen der Fassade zu erkennen. Die verschattete Außenoberfläche ist bis zu max. 30 K kühler. Die geringeren Oberflächentemperaturen im Außenraum haben eine Wirkung auf die Oberflächentemperaturen im Innenraum und somit auf den Wärmeeintrag in den angrenzenden Raum. Bei der verschatteten Fassade ist die innenseitige Oberflächentemperatur um max. 9 K niedriger. Der hohe Wärmeeintrag wird durch den schlechten bzw. hohen Wärmedurchgangskoeffizienten des Bauteils verstärkt. Die Potenziale zur Reduzierung von Wärmeeinträgen und Überhitzungen durch grüne Strukturen sind daher bei unsanierten Bestandsgebäuden besonders hoch.



**Abb. 31** Außenseitige und innenseitige Oberflächentemperaturen einer unverschatteten sowie einer verschatteten Ostfassade (durch Winterlinde) im Vergleich. Die messtechnische Untersuchung wurde im Juni in Stuttgart durchgeführt.

Eine Untersuchung der Oberflächentemperaturen im Außenraum in Abhängigkeit des Strahlungseintrags auf die Westfassade der Liegenschaft zeigt ► **Abb. 32**. Durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Transmissionsgrade (= einfallende Strahlung) lässt sich die Wirkung der Baumkronendichten auf die Oberflächentemperatur beispielhaft darstellen. Deutlich zeigt sich der Zusammenhang zwischen einfallender Strahlung und Oberflächentemperatur. Je geringer die einfallende Strahlung, desto geringer ist die Oberflächentemperatur der Fassade.



**Abb. 32** Änderung der Oberflächentemperatur im Außenraum in Abhängigkeit des Strahlungseintrags auf die Westfassade über 24 h. Die Oberflächentemperatur wird jeweils mit 100 %, 60 %, 20 % und 0% Strahlungseinfall simuliert.

## 2. Reduzierung der Lufttemperatur durch Verdunstung

Wie einleitend beschrieben, können Pflanzenblätter durch Verdunstungskühlung die Lufttemperatur der Umgebung reduzieren. Für diesen Prozess ist vor allem der Energiehaushalt von Pflanzenblättern in Abhängigkeit der Wetterparameter der Umgebung bedeutend. Von der gesamten auf das Blatt treffenden Globalstrahlung wird ein Anteil der Strahlung von der Pflanzenoberfläche reflektiert. Nur ein geringer Anteil der Strahlung wird für die Photosynthese benötigt. Ein wesentlich größerer Anteil wird nach Absorption durch das Blatt in Wärmeenergie umgewandelt und durch Konvektion (= fühlbarer Wärmestrom, sensible Wärme) sowie Transpiration (= nicht fühlbarer Wärmestrom, latente Wärme) wieder abgegeben (► Abb. 29). Beim Transpirationsvorgang geht das Wasser im Blatt vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand über, wozu Energie benötigt wird. Rechnerisch kann die Quantifizierung des Kühlpotenzials durch die Multiplikation der Transpirationshöhe mit dem für die Verdunstung von Wasser benötigten Energiebedarf erfolgen (2,45 kJ/g bei 20 °C). In (Konarska, J. et al. 2016) werden messtechnisch die Transpiration sowie der latente Wärmestrom von unterschiedlichen Baumarten im urbanen Umfeld untersucht. Während der Mittagszeit wird durch die Baumtranspiration im Mittel ein Energieverlust von 206 W/m<sup>2</sup> erzielt. Damit werden im Durchschnitt 30 % der einfallenden Sonnenstrahlung in einen latenten Wärmestrom umgewandelt. Um ein Austrocknen der Pflanze bei Hitze und Trockenheit zu verhindern, wird in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung, der Windgeschwindigkeit, der relativen Feuchte sowie der Bodenwasserverfügbarkeit der Transpirationsstrom durch das Schließen der Stomata eingeschränkt. Das Kühlpotenzial einer Pflanze, die unter Wasserstress leidet, ist demnach aufgrund der eingeschränkten Transpirationsrate deutlich geringer (Schopfer, P. et al. 1999).

Damit Pflanzen ein hohes Kühlpotenzial in den Sommermonaten erzielen, ist stets auf eine ausreichende Bewässerung zu achten. Dies unterstützt neben der Verdunstungskühlung auch die Gesundheit der Pflanze. Auf Liegenschaften sind dabei bestenfalls Synergien zum Regenwassermanagement zu erstellen. Die Nutzung von Trinkwasser zur Bewässerung des Baumes sollte vermieden werden.

### 8.2.3 Anpassung an Starkregen

Neben geeigneten Oberflächen sowie Regenwasserrückhaltungsmöglichkeiten (► Kap. 8.1.2) verbessern vegetative Strukturen das natürliche Wassermanagement in Städten sowie Liegenschaften und sind damit Bestandteil der urbanen Überflutungsvorsorge. Insbesondere Gehölze mit einem großen Kronenvolumen weisen mehrere abflussmindernde Wirkungen auf (Bartsch, N. et al. 2016):

- Rückhaltung von Niederschlagswasser durch die Blätterkrone,
- Verdunstung von Niederschlagswasser durch Blatt- und Bodenoberflächen,
- Zwischenspeicherung von Niederschlagswasser in Pflanzengruben (durch zum Beispiel Retention).

Dadurch tragen sie zur Reduzierung von Abflussspitzen bzw. zur Entlastung der Kanalisation sowie zum Schutz gegen Hochwasser bei. Die abflussmindernden Wirkungen werden primär durch den natürlichen Wasserkreislauf von Gehölzen mit Interzeption, Transpiration sowie Evaporation hervorgerufen (► Abb. 33). Zu beachten gilt, dass sich ► Abb. 33 auf die Wasserbilanz bei Eichenwäldern nach (Bartsch, N. et al. 2016) bezieht. Bei Einzelbäumen im städtischen Kontext kann das Verhältnis von Interzeption, Transpiration sowie Evaporation unterschiedlich ausfallen.

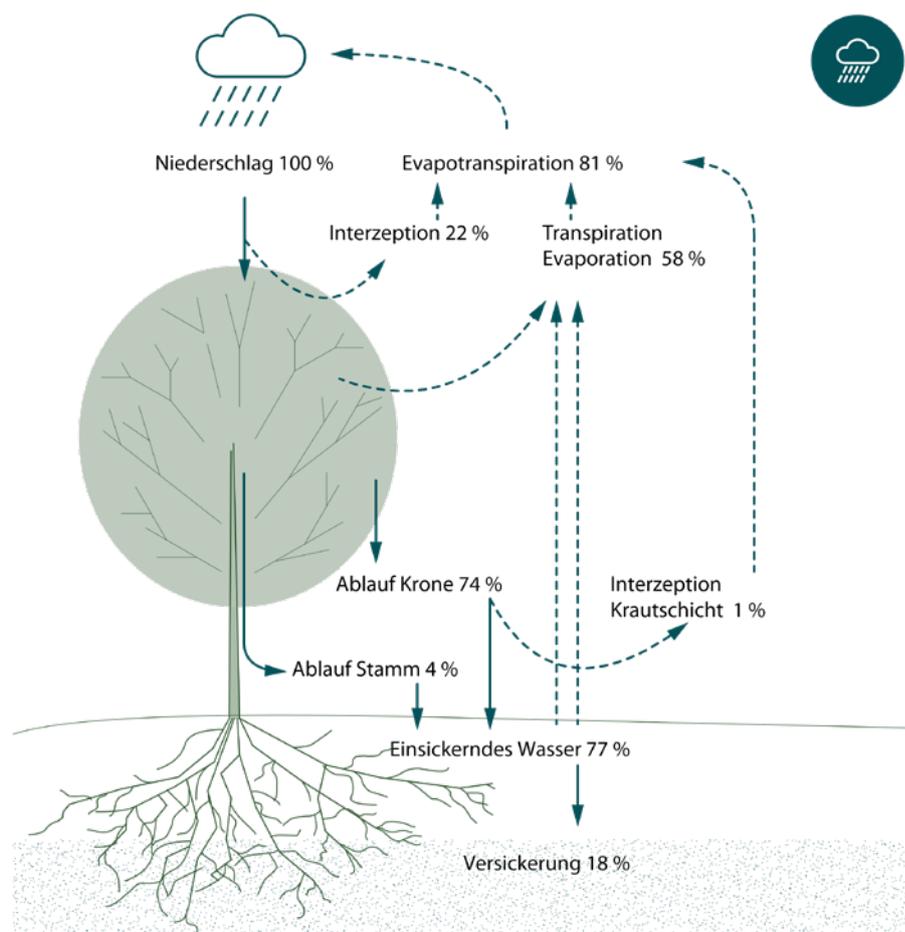


Abb. 33 Wasserbilanz bei Eichenwäldern nach (Bartsch, N. et al. 2016).

## Technische Regelwerke und Richtlinien

**DIN 18916** - Vegetationstechnik im Landschaftsbau; Pflanzen und Pflanzarbeiten

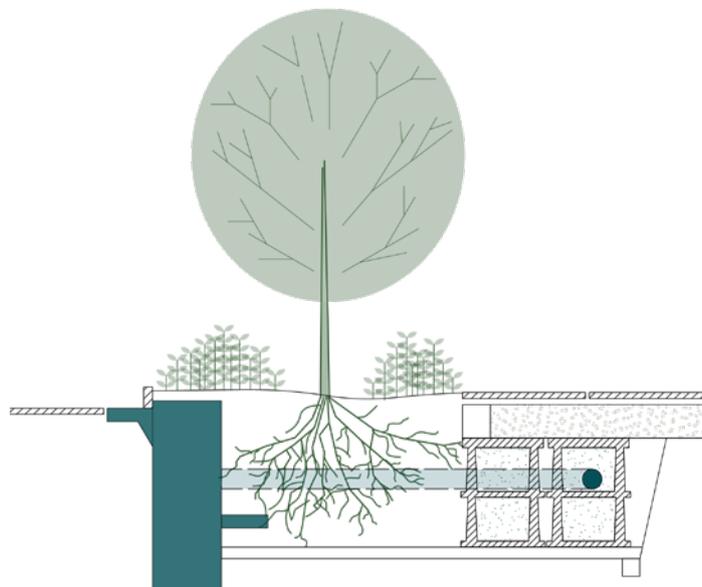
**FLL 2015:** Empfehlungen für Baumpflanzungen - Teil 1: Planung, Pflanzarbeiten, Pflege. Bonn.

**FLL 2010:** Empfehlungen für Baumpflanzungen - Teil 2: Standortvorbereitung für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate. Bonn

Das Zurückhalten von Niederschlagswasser durch die Baumkrone wird als **Interzeption** bezeichnet. Auf der Pflanzenoberfläche haftendes Wasser verdunstet und reduziert den Oberflächenabfluss. Weiter findet eine aktive Verdunstung von Bodenwasser durch Transpiration statt. Das Wasser wird über das Wurzelwerk aufgenommen sowie anschließend über die Blattoberfläche transpiriert. Die Verdunstung an Oberflächen, zum Beispiel an unversiegelten Baumscheiben, ist die sogenannte **Evaporation**.

Je nach Ausführung von (Baum-)Pflanzgruben kann Wasser gezielt gespeichert sowie zeitversetzt über die Pflanzenblätter oder die Oberfläche verdunstet werden. Weitere Hinweise, DIN-Normen und Richtlinien zur Ausführung von Pflanzgruben bei Straßenbäumen können der ► **Infobox** entnommen werden. Die gezielte Förderung einer Versickerung von Regenwasser als Bestandteil der Überflutungsvorsorge wird in der Norm bisher nicht berücksichtigt. Aktuell gibt es neben Forschungsprojekten zur Ausführung von Pflanzgruben als Komponenten der Überflutungsvorsorge auch Planungsbeispiele aus dem internationalen Raum. ► **Abb. 34** zeigt ein Rigolensystem der Stadt Toronto (Deeproot 2017). Die Rigolen werden mit einer Oberbodenmischung aus Sand, Ton und Schluff gefüllt. Der Boden wird nicht verdichtet und bietet neben guten Wachstumsbedingungen für das Wurzelwerk auch eine hohe Wasseraufnahmespeicherfähigkeit.

So können Bäume selbst bei einer Versiegelung der umgebenden Oberflächen Niederschlagswasser aufnehmen und verdunsten. Ein Baum mit einer Wurzelmasse von 300 bis 500 kg kann nach (BMK 2020) bis zu 70.000 L Wasserabfluss pro Jahr verhindern.

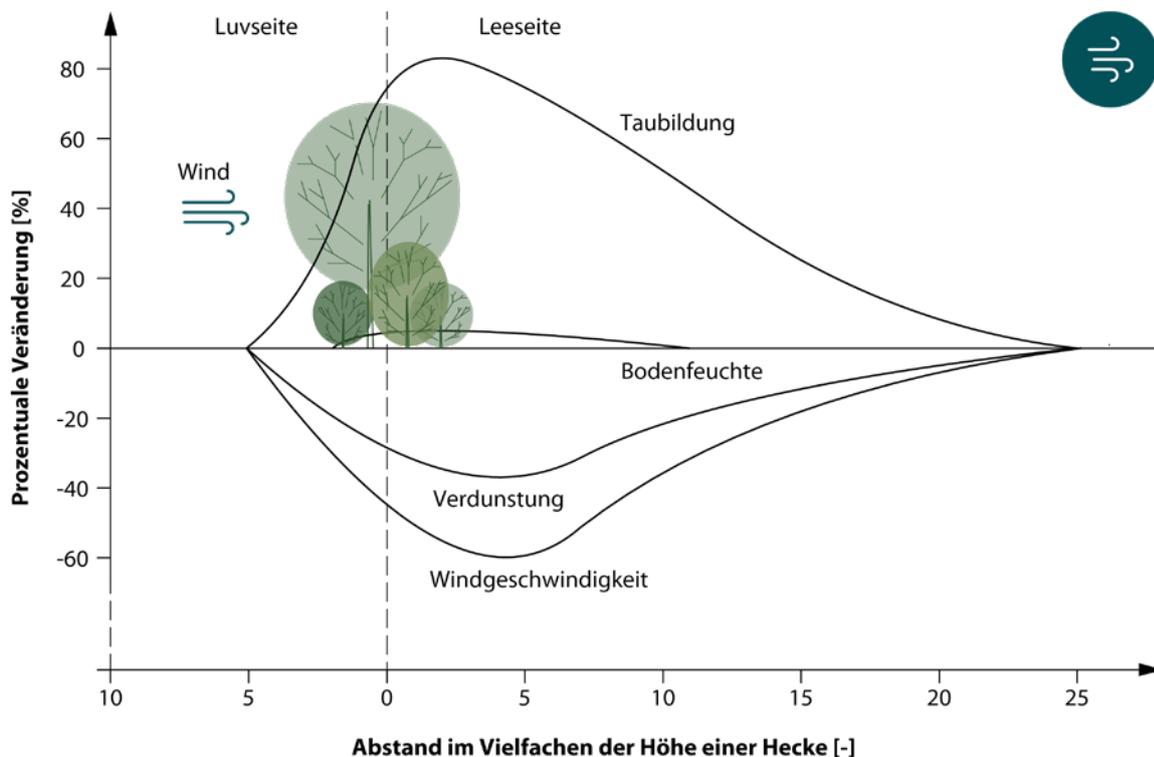


**Abb. 34** Rigolensystem zur Bewässerung von Straßenbäumen in Toronto nach (Deeproot - 2017).

## 8.2.4 Anpassung an Wind

Bäume, Hecken sowie Sträucher verringern den Windangriff auf Grundstück und Hausfassade. Bei der Anströmung von Gehölzen entsteht auf der Luvseite (in Windrichtung vor dem Hindernis) ein Überdruck sowie auf der Leeseite (in Windrichtung hinter dem Hindernis) ein Unterdruck. Gehölze sind als Windschutz besonders effektiv, da diese eine raue sowie winddurchlässige Oberfläche besitzen. Der Wind wird nicht abgelenkt, sondern gebrochen sowie gebremst. Auf der Leeseite kann die Windgeschwindigkeit bei Hecken um bis zu 60 % reduziert werden. Die Bildung von Luftverwirbelungen sowie -umlenkungen wird im Vergleich zu winddichten Oberflächen reduziert. Um eine größtmögliche Windschutzwirkung zu erzielen, ist das Gehölz quer zur Windrichtung anzulegen. Gehölze mit einer Mindesthöhe von 1,8 m sowie mit vielen Verästelungen sind besonders geeignet.

Neben der Wirkung als Windschutz haben Gehölze weitere mikroklimatische Funktionen (► **Abb. 35**). Beispielsweise nimmt direkt hinter dem Gehölz die Verdunstung ab, da die Windgeschwindigkeit reduziert ist. Infolgedessen erhöht sich die Verdunstungsleistung der dahinterliegenden Pflanzen. Gleichzeitig erhöhen sich die Taubildung sowie die Boden- und Luftfeuchten. Diese Prozesse tragen zur Stabilisierung des Wasserhaushaltes von Böden, zur Verringerung der Bodenerosion sowie zum Schutz der dahinterliegenden Pflanzen bei. (StartClim2008 2009)

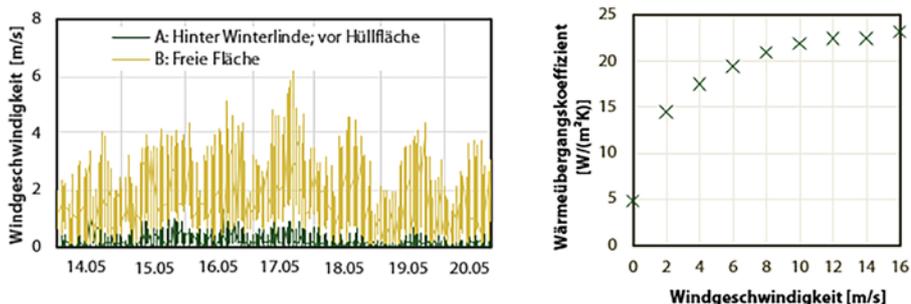


**Abb. 35** Qualitative Darstellung der Wirkungen von Gehölzen auf mikroklimatische Faktoren der direkten Umgebung bei Windeinwirkung nach (StartClim2008 2009). Größe der Bepflanzung überhöht dargestellt.

### Auswirkung auf Grundstück und Hüllfläche

► **Abb. 36** links zeigt einen Vergleich der gemessenen Windgeschwindigkeiten im Mai 2020 in Stuttgart-Vaihingen. Der Messsensor von Graph A wurde zwischen einer Winterlinde mit einem Kronenradius von 6 m sowie einer Hausfassade (außenseitig) im 2. Stock platziert. Graph B zeigt die Messergebnisse der Windgeschwindigkeit auf einem naheliegenden freien Feld in 2 m Höhe. Deutlich ist die Auswirkung der Winterlinde sowie der Bebauung auf den Windeinfluss zu erkennen. Im Durchschnitt ist die Windgeschwindigkeit bei Graph A um 1,5 m/s niedriger als bei Graph B. Die maximale Reduzierung der Windgeschwindigkeit beträgt 6,1 m/s. Bei dem messtechnischen Vergleich ist zu beachten, dass Freiflächen eine erhöhte Windgeschwindigkeit aufweisen.

Die Windgeschwindigkeit an der Oberfläche von Gebäuden beeinflusst den Wärmeverlust der Gebäudehülle. Dieser Sachverhalt lässt sich durch den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten der Bauteiloberfläche darstellen. ► **Abb. 36** rechts zeigt, dass der konvektive Wärmeübergangskoeffizient mit steigender Luftgeschwindigkeit zunimmt (Mayer, E. et al. 2018). Windschutzpflanzen können daher zur Reduzierung von Wärmeverlusten durch die Bauteilhülle beitragen.



**Abb. 36** Links: Vergleich der Windgeschwindigkeit zwischen Winterlinde und Fassadenoberfläche (Graph A) sowie einer freien Fläche (Graph B) bei einer Messreihe im Mai 2020 in Stuttgart-Vaihingen. Rechts: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten nach (Mayer, E. et al. 2018).

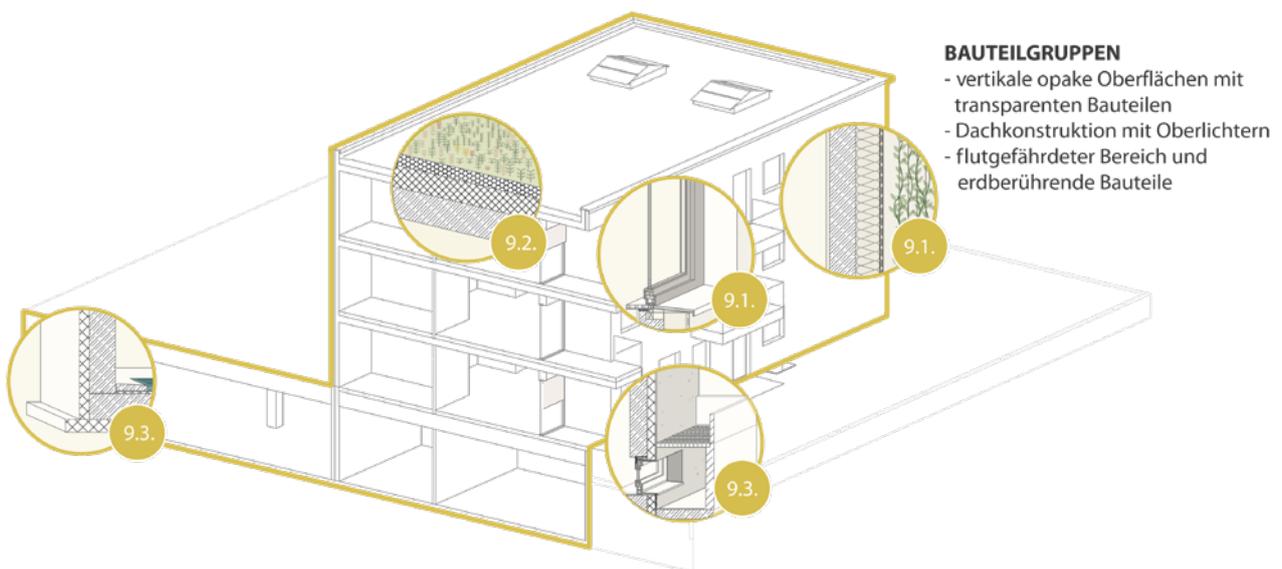
### **Weitere positive Wirkungen**

Neben den mikroklimatischen Funktionen weist ein pflanzlicher Windschutz viele weitere positive Eigenschaften für die Liegenschaft auf. Unter anderem fördern Gehölze einen wirksamen Erosionsschutz und filtern Staub sowie Schmutz. Zudem bieten Gehölze, neben der Funktion als Sichtschutz, zahlreichen Tierarten einen Lebensraum sowie eine Nahrungsquelle. Letzterer Aspekt lässt sich im Besonderen fördern, wenn auf heimische Gehölze zurückgegriffen wird. Eine Auflistung von heimischen oder biodiversitätsfördernden Arten kann beispielsweise (GALK 2021) entnommen werden. Weiter wirkt es sich vorteilhaft auf die Artenvielfalt aus, wenn eine Mischung aus Gehölzen zusammen mit einem Krautsaum am Boden gepflanzt wird (NABU 2020).

# 9 Bauteilkatalog

Der Bauteilkatalog dient der Darstellung und dem Vergleich unterschiedlicher Konstruktionsvarianten hinsichtlich ihrer Potenziale zur Anpassung an die Extremwetterereignisse. Details zur Struktur der Ergebnisdarstellungen und -vergleiche sind der Methodik (► Kap. 7.2) zu entnehmen. ► Abb. 37 zeigt zusammengefasst die im Katalog berücksichtigten Bauteilgruppen vertikale opake und transparente Oberflächen, (horizontale) Dachkonstruktionen inkl. Dachoberlichtern sowie Kellerbauteile inkl. Tiefgarage. In Summe beinhaltet der Katalog 17 Konstruktionsvarianten.

Eine Trennung von vertikalen Bauteilen bzw. Außenwandkonstruktionen und Gründung erfolgt oberhalb des flutgefährdeten Bereichs. Bei den vertikalen Bauteilen in ► Kap. 9.1 werden daher nicht explizit Anpassungsmaßnahmen an Starkregen und Hochwasser aufgegriffen. Die Betrachtung des überflutungsgefährdeten Bereichs erfolgt unter ► Kap. 9.3 im Zusammenhang der Vorstellung der Anpassungsmaßnahmen von Kellerbauteilen inkl. Tiefgarage.



**Abb. 37** Bauteilgruppen des Katalogs. Die Ziffern neben den Icons beziehen sich auf die Kapitelverweise der entsprechenden Anpassungsmaßnahmen.

## 9.1 Vertikale Oberflächen

Fassade opak, Massivbau, mehrschichtig

Fassade opak, Massivbau, monolithisch  
Fassade opak, Leichtbau, mehrschichtig

Fassade opak, Massivbau, Zusatz

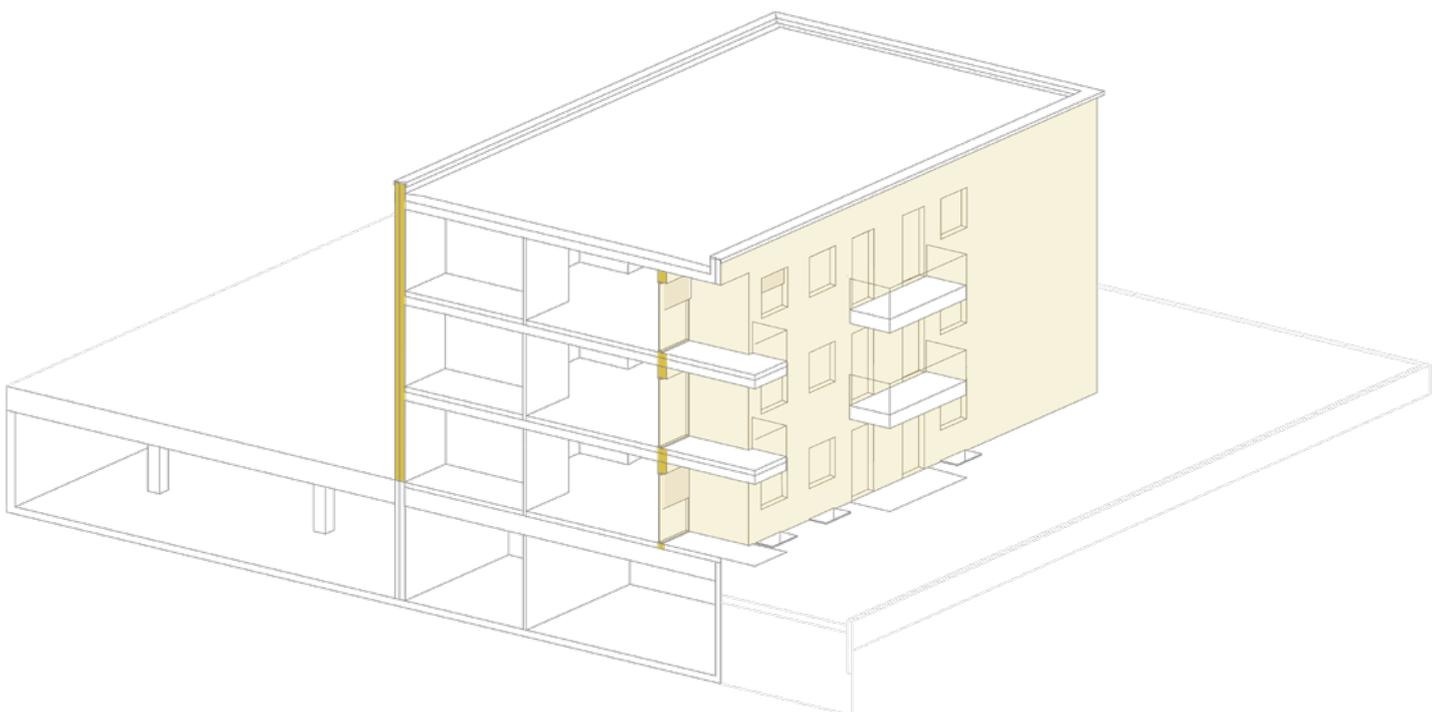
Fassade transparent

**Wärmedämmverbundsystem**  
**Zweischaliges Mauerwerk nicht hinterlüftet**  
**Fachwerk mit Innendämmung**

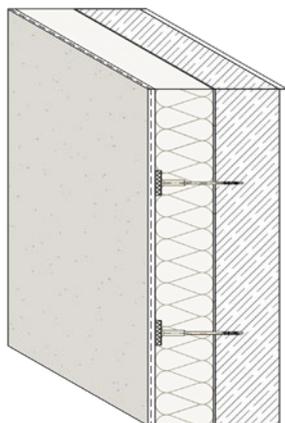
**Porenbetonkonstruktion**  
**Hinterlüftete Holzleichtbaukonstruktion**

**Porenbetonkonstruktion mit Grünfassade**

**Fenster**  
**Sonnenschutzsysteme**



### 9.1.1 Wärmedämmverbundsystem



Schichtart	d [cm]
Kalkzementputz	2
Mineralfaser 035	13
Stahlbeton C12/15	20
Gipsputz	1,5

U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,24
flächenbezogene Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	512
wirks. Speicherfähigkeit [Wh/(m <sup>2</sup> K)]	50

Abb. 38 Schnittansicht – Wärmedämmverbundsystem (WDVS).

#### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Wetterelemente mit relevantem Schadenspotenzial für das vertikale Bauteil sind Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung sowie Schlagregen, Sturm und Hagel. Auswirkungen infolge hoher Lufttemperaturen und Sonneneinstrahlungen führen zu einem erhöhten Energieeintrag in das Bauteil und somit in das Gebäude. Es kann dadurch zu einer sommerlichen Überhitzung des Gebäudes kommen. Potenzielle Schadensbilder infolge Schlagregen, Sturm und Hagel treten insbesondere an der Fassadenoberfläche am Putzsystem auf. Durch Schlagregen kann Wasser in die äußere Bauteilschicht eindringen und zu konstruktiven sowie energetischen Mängeln führen. Vorhandene Hagelschäden verstärken die Auswirkungen infolge Schlagregen (► Abb. 39).

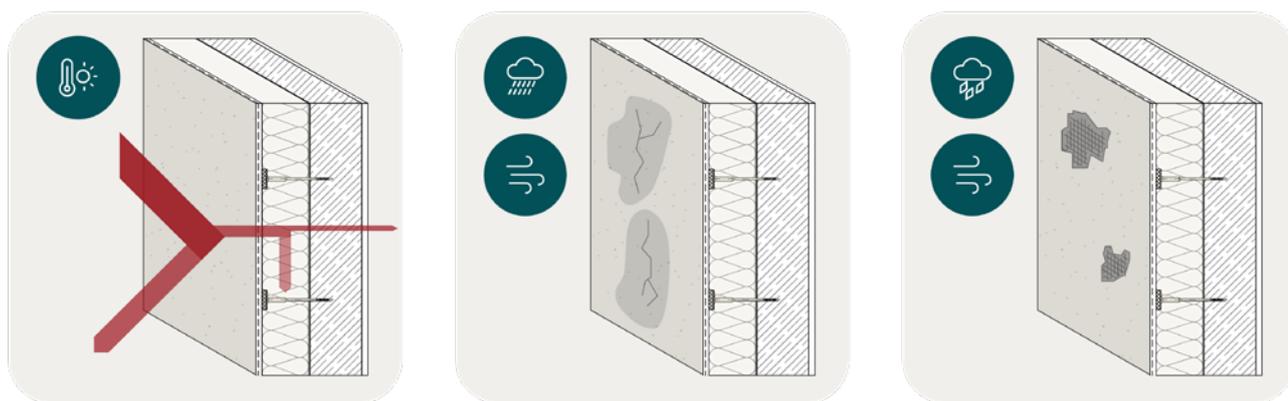


Abb. 39 Auswirkungen der Wetterelemente auf das Wärmedämmverbundsystem. Links: Hitzeeintrag in das Bauteil. Mitte: Feuchteintrag infolge Schlagregen. Rechts: Schäden am Putzsystem infolge Hagel und Sturm.

### Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung

Das Wärmedämmverbundsystem mit einer hellen Fassadenfarbe dient als Fassadenkonstruktion des Referenzraumes (► Kap. 7.2). Dieser weist im Referenzzustand ca. 2.050 Übertemperaturgradstunden auf. Bei der Verwendung von dunklen Fassadenfarben werden diese um 19 % erhöht. ► Abb. 40 veranschaulicht die Oberflächentemperaturverläufe. Ein dunkler Außenputz zeigt gegenüber einem hellen Außenputz an der Außenoberfläche eine deutliche (~10 K) und an der Innenoberfläche eine geringe Zunahme (~0,5 K) der maximalen Temperatur am Tag. Die geringe Temperaturerhöhung im Innenraum ist auf die gute Wärmedämmung und die hoch wirksame Speichereigenschaft des Bauteils zurückzuführen. Die Dämmung reduziert den Wärmeeintrag durch das Bauteil insgesamt. Durch die Speichermasse wird dieser zusätzlich verzögert, gleichzeitig werden Temperaturspitzen im Innenraum (beispielsweise durch solare Einstrahlung) abgemildert (► Kap. 6.2).

### Starkregen und Schlagregen

Bei nichthinterlüfteten Fassaden sind der Wärme- und Witterungsschutz gekoppelt. Somit muss die Dämmschicht bei Schlagregenbelastung vor eindringender Feuchtigkeit geschützt werden. Die Wahl des geeigneten Putzsystems ist abhängig von der Intensität der Schlagregenbeanspruchung und der daraus resultierenden Beanspruchungsgruppe für Schlagregen, DIN 4108-3. Neben der allgemeinen Einteilung der DIN ist die örtlich vorherrschende Hauptwindrichtung zu beachten. Für geringe Schlagregenbelastungen sind Außenputzsysteme ohne besondere Anforderungen ausreichend. Für mittlere oder starke Schlagregenbeanspruchungen sind wasserabweisende Putze nach der DIN 4108-3 vorgeschrieben. Hierbei sind auch die Hinweise aus der DIN 18550 zu beachten. Für mittlere und starke Schlagregenbeanspruchungen ist zudem der Einsatz einer hinterlüfteten Außenwandbekleidung zu erwägen. Die Außenwandbekleidungen können aus Metallblechen, Kunststoffplatten, mineralischen Plattenwerkstoffen, Natursteinplatten, Ziegeln sowie Holzlatten bestehen. Werkstoffkombinationen können in Form von Sandwichplatten ausgeführt sein.

### Hagel und Sturm

Für die Auswahl eines geeigneten Putzsystems zur Anpassung an Hagel (ggf. in Verbindung mit Sturm) ist auf einen für den Standort geeigneten Hagelwiderstand zu achten. Putzsysteme mit erhöhter Zugfestigkeit, erhöhter Putzdicke und zusätzlichen Gewebelagen verstärken den Widerstand gegenüber Hagel und Sturmeinwirkungen. Eine Vorsatzschale ist bei erwarteten Hagel- und Sturmereignissen mit hoher Intensität von Vorteil.

### Sanierung und Erweiterung

Das Wärmedämmverbundsystem eignet sich als nachträgliche Sanierungsvariante für monolithische und/oder massive Fassadenkonstruktionen. Im Zuge einer (energetischen) Sanierung dieser Konstruktionen bestehen grundsätzlich mehrere Möglichkeiten. Zur Verbesserung der energetischen Qualität ist die Anbringung einer außenseitigen Dämmputzschicht möglich. Anhand der leichten, wärmedämmenden Zuschläge weisen die Dämmputze geringe Festigkeiten auf, die wiederum den Hagel-, Sturm- und Schlagregenwiderstand beeinträchtigen. Zudem ist die Erweiterung einer vorhandenen Dämmschicht in Erwägung zu ziehen.

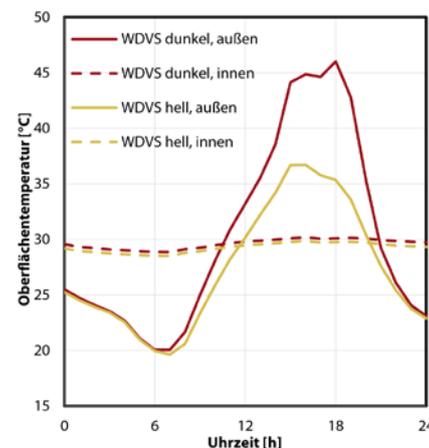


Abb. 40 Oberflächentemperaturverläufe außenseitig sowie innenseitig über einen Tag in Abhängigkeit der Putzfarbe.

## Technische Regelwerke

### Wärmeschutz

Gebäudeenergiegesetz GEG

DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2

DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden

### Feuchteschutz

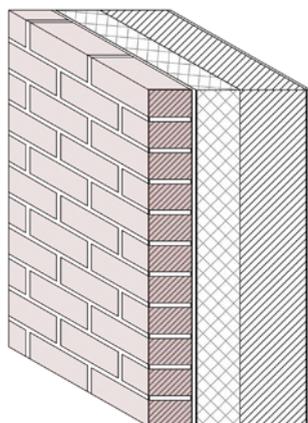
DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3

DIN 18550 Planung, Zubereitung und Ausführung von Außen- und Innenputzen

### Hagel und Sturm

ETAG 004 – Leitlinie für Europäische Technische Zulassungen für Außenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme mit Putzschicht

## 9.1.2 Zweischaliges Mauerwerk nichthinterlüftet



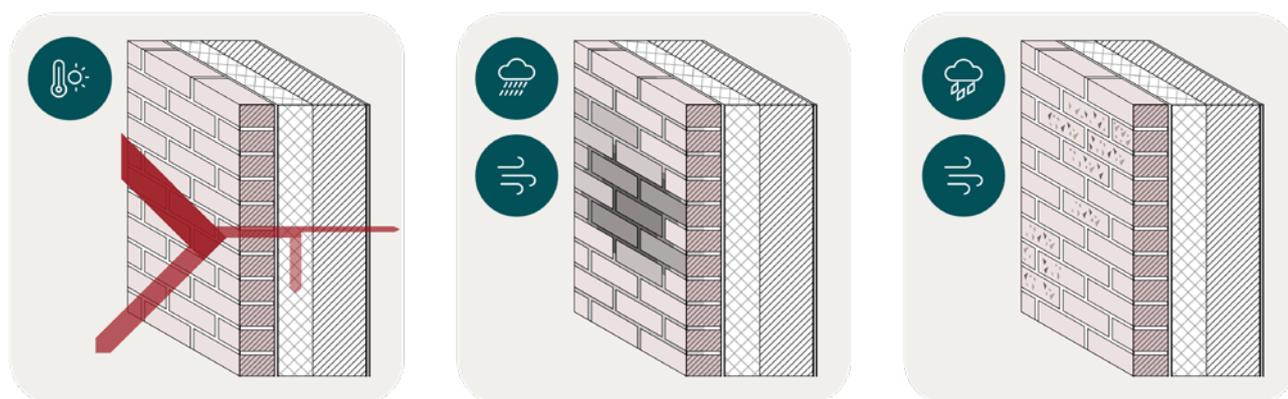
Schichtart	d [cm]
Vollklinker	11,5
Mineralfaser 035	13
Mauerwerk Kalksandstein	17,5
Gipsputz	1,5

U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,23
flächenbezogene Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	509
wirks. Speicherfähigkeit [Wh/(m <sup>2</sup> K)]	34

**Abb. 41** Schnittansicht – Zweischaliges Mauerwerk nichthinterlüftet.

### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Wetterelemente mit relevantem Schadenspotenzial für das vertikale Bauteil sind Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung sowie Schlagregen, Sturm und Hagel. Auswirkungen infolge hoher Lufttemperaturen und Sonneneinstrahlungen führen zu einem erhöhten Energieeintrag in das Bauteil und somit in das Gebäude. Es kann dadurch zu einer sommerlichen Überhitzung des Gebäudes kommen. Potenzielle Schadensbilder infolge von Schlagregen, Sturm und Hagel treten insbesondere an der Fassadenoberfläche am Mauerwerk auf. Durch Schlagregen kann Wasser in die äußere Bauteilschicht eindringen und zu konstruktiven sowie energetischen Mängeln führen. Vorhandene Hagelschäden verstärken die Auswirkungen infolge Schlagregen (► **Abb. 42**).



**Abb. 42** Auswirkungen der Wetterelemente auf die Mauerwerkskonstruktion. Links: Hitzeeintrag in das Bauteil. Mitte: Feuchteintrag infolge Schlagregen. Rechts: Schäden am Mauerwerk infolge Hagel und Sturm.

### Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung

Der Raum mit einer zweischaligen nichthinterlüfteten Mauerwerkskonstruktion weist 10 % mehr Übertemperaturgradstunden auf als der Referenzraum. Diese Erhöhung ist auf den Einfluss der Kerndämmung in Verbindung mit der massiven Klinkerschale zurückzuführen. Bei der Verwendung von dunklen Klinkern beträgt die Erhöhung 26 %. ► **Abb. 43** veranschaulicht die Oberflächentemperaturverläufe. Die helle Klinkerfassade weist tagsüber eine niedrigere und nachts eine höhere Außenoberflächentemperatur (~2 K) als das Referenzbauteil auf. Dies ist auf die hohe Speichermasse der Klinkerschale zurückzuführen. Die innenseitige Oberflächentemperatur ist gegenüber dem Referenzbauteil leicht erhöht. Die dunkle Klinkerfassade zeigt an der Außenoberfläche eine signifikante (~8 K) und an der Innenoberfläche eine moderate (~1 K) Erhöhung der maximalen Oberflächentemperatur am Tag. Helle Klinker sind dunklen Klinkern somit vorzuziehen.

### Starkregen und Schlagregen

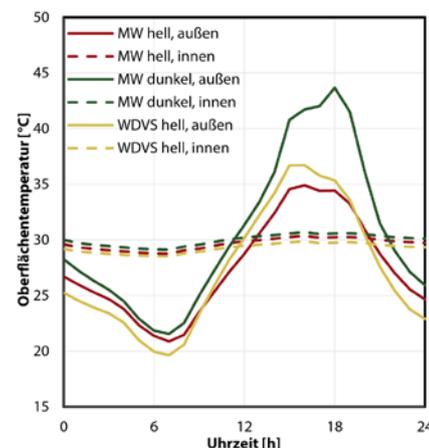
Nach der DIN 4108-3 sind zweischalige Verblendmauerwerke für die höchste Schlagregenbeanspruchungsgruppe III geeignet. Das Verblendmauerwerk ist allerdings nicht wasserundurchlässig. Sowohl durch das kapillarporöse Gefüge der Ziegel und des Mörtels als auch durch (Flanken-)Risse und Hohlräume kann Feuchtigkeit in die dahinterliegende Dämmschicht gelangen. Für exponierte Lagen können Sperrbahnen in oder hinter dem Verblendmauerwerk angebracht werden. Es ist zu beachten, dass hinter die Sperrbahn eingedrungene Feuchtigkeit nicht mehr aus der Dämmschicht entweichen und in der Folge ein Bauteilschaden entstehen kann. Zweischalige Verblendmauerwerkskonstruktionen können auch mit einer Hinterlüftung ausgeführt werden. Diese Luftschicht kann Feuchte gezielt abführen und somit das Eindringen von Wasser in die Dämmschicht wirkungsvoll verhindern. Es ist stets auf die korrekte Ausführung der Konstruktion zu achten. Mörtelbrücken, fehlende Tropfscheiben und Mörtelreste im Fußbereich sind zu vermeiden.

### Hagel und Sturm

Vorsatzschalen in Form von Verblendmauerwerk bieten einen sehr hohen Schutz gegenüber Hagel und durch Sturm auf die Fassade treffende Gegenstände. Auch bei Hagel- und Sturmereignissen von hoher Intensität sind sowohl an der Oberfläche der Mörtelfugen als auch der Klinker nur geringe Schäden zu erwarten. Gegenüber geeigneten Putzsystemen ist die erhöhte Druck- und Zugfestigkeit des Verblendmauerwerks ausschlaggebend für den sehr hohen Hagelwiderstand. Das Verblendmauerwerk ist den Putzsystemen und anderen Vorsatzschalen hinsichtlich des Hagelwiderstandes überlegen.

### Sanierung und Erweiterung

Die zweischalige nichthinterlüftete Mauerwerkskonstruktion eignet sich als nachträgliche Sanierungsvariante für einschalige Mauerwerkskonstruktionen mit oder ohne Außendämmung. Im Zuge einer energetischen Sanierung dieser mehrschichtigen Konstruktion besteht die Möglichkeit zur Anbringung einer Innendämmschicht. Hierbei müssen folgende Nachteile abgewogen werden: Entkopplung der thermischen Speichermasse, Gefahr von Tauwasserausfall im Zwischenraum von Innendämmung und Außenwand sowie die Entstehung von Wärmebrücken einbindender Bauteile.



**Abb. 43** Oberflächentemperaturverläufe außenseitig sowie innenseitig über einen Tag in Abhängigkeit der Holzvorsatzschalenfarbe.

## Technische Regelwerke

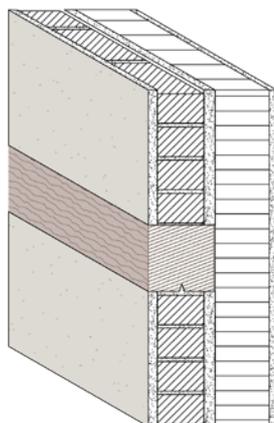
### Wärmeschutz

Gebäudeenergiegesetz GEG  
DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2  
DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden

### Feuchteschutz

DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3

### 9.1.3 Fachwerk mit Innendämmung



Schichtart	d [cm]
Kalkzementputz	2
Ziegel	11,5
Kalkzementputz	2,5
Mineralische Dämmplatte	14,5
Dampfbremse	0,01
Kalkputz	1,5
<hr/>	
U-Wert [W/(m²K)]	0,23
flächenbezogene Masse [kg/m²]	214
wirks. Speicherfähigkeit [Wh/(m²K)]	6

Abb. 44 Schnittansicht – Fachwerk Innendämmung.

#### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Wetterelemente mit relevantem Schadenspotenzial für das vertikale Bauteil sind Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung sowie Schlagregen, Sturm und Hagel. Auswirkungen durch hohe Lufttemperaturen und Sonneneinstrahlungen führen zu einem erhöhten Energieeintrag in das Bauteil und somit in das Gebäude. Es kann dadurch zu einer sommerlichen Überhitzung des Gebäudes kommen. Potenzielle Schadensbilder infolge Schlagregen, Sturm und Hagel treten insbesondere an der Fassadenoberfläche am Putzsystem sowie dem Sichtfachwerk auf. Durch Schlagregen kann Wasser in die äußere Bauteilschicht eindringen und zu konstruktiven sowie energetischen Mängeln führen. Vorhandene Hagelschäden verstärken die Auswirkungen infolge Schlagregen (► Abb. 45).

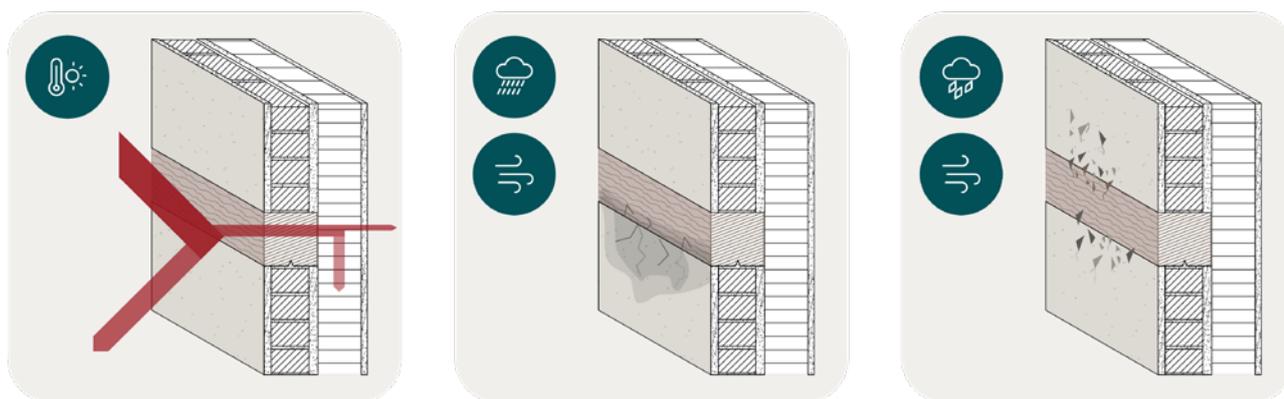


Abb. 45 Auswirkungen der Wetterelemente auf die Fachwerkkonstruktion. Links: Hitzeintrag in das Bauteil. Mitte: Feuchteintrag infolge Schlagregen. Rechts: Schäden am Putzsystem infolge Hagel und Sturm.

### Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung

Der Raum mit einer innengedämmten Fachwerkkonstruktion weist 10 % mehr Über-temperaturgradstunden auf als der Referenzraum. Diese Erhöhung ist auf den Einfluss der Innendämmung und der daraus resultierenden geringen raumseitigen Wärmespeicherfähigkeit zurückzuführen. Bei der Verwendung einer dunklen Putzoberfläche beträgt die Erhöhung 29 %. ► **Abb. 46** veranschaulicht die Oberflächentemperaturverläufe. Das helle Fachwerk weist tagsüber eine niedrigere und nachts eine höhere Außenoberflächentemperatur (~1K) als das Referenzbauteil auf. Die innenseitige Oberflächentemperatur ist tagsüber um ca. 1 K erhöht. Das dunkle Fachwerk zeigt an der Außenoberfläche eine signifikante (~10 K) und an der Innenoberfläche eine moderate (~1,5 K) Erhöhung der maximalen Oberflächentemperatur am Tag. Helle Fachwerke sind aus stadtklimatischer Sicht vorzuziehen.

### Starkregen und Schlagregen

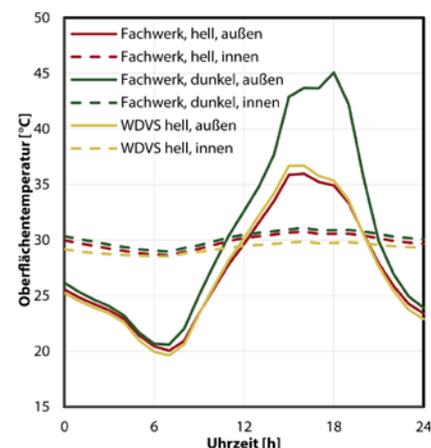
Fachwerkkonstruktionen unterliegen den Anforderungen der DIN 4108-3 und den daraus resultierenden Beanspruchungsgruppen für Schlagregen. Für die Beanspruchungsgruppe I ist die fachwerksichtige Ausführung möglich, vorausgesetzt, die Trocknung des Bauteils nach innen und außen kann sichergestellt werden. Zudem sind stark kapillarwirksame Baustoffe zu verwenden. Für die Einhaltung der Beanspruchungsgruppen II und III sind das Verputzen oder Verkleiden der Konstruktion erforderlich (Lißner, K. 2018). Ist dies aus Denkmalschutzgründen nicht möglich, ist der Putz der Gefache anhand der Hinweise Starkregen und Schlagregen (► **Kap. 10.2**) auszuführen. Die Dampfdiffusionswiderstände der Putzsysteme sind bei Fachwerkkonstruktionen möglichst niedrig zu halten. Das Hirnholz ist in besonderem Maße vor Schlagregenbeanspruchung zu schützen. Hierzu können beispielsweise Zinkbleche oder Holzschalen als Schutzabdeckung verwendet oder die Stöße auf Gehrung ausgeführt werden. Zum Schutz des Sichtfachwerks können weiter diffusionsoffene Holzschutzanstriche verwendet werden. Darüber hinaus ist eine schnelle Ableitung von Regenwasser über Abflussbohrungen in Zapflöchern zu gewährleisten. Es sind die Prinzipien des konstruktiven Holzschutzes umzusetzen. (Lißner, K. 2018)

### Hagel und Sturm

Putzsysteme mit erhöhter Zugfestigkeit, erhöhter Putzdicke und zusätzlichen Gewebelagen verstärken den Widerstand gegenüber Hagel und Sturmeinwirkungen (► **Kap. 10.3**, Hagel und Sturm). Vgl. Hagel und Sturm ► **Kap. 9.1.4** für die Anforderungen an die Holzständer oder eine Vorsatzschale aus Holz. Maßnahmen für Hagel und Sturm am Gefach und am Holzfachwerk sind eng mit den Feuchteschutzanforderungen durch Schlagregen abzustimmen.

### Sanierung und Erweiterung

Die Innendämmung eignet sich als nachträgliche Sanierungsvariante für andere Fassadenkonstruktionen, speziell für unter Denkmalschutz stehende Fassaden. Im Zuge einer energetischen Sanierung müssen dabei aber folgende Aspekte berücksichtigt werden: die Entkopplung der thermischen Speichermasse, die Gefahr von Tauwasserausfall im Zwischenraum von Innendämmung und Außenwand sowie die Entstehung von Wärmebrücken einbindender Bauteile.



**Abb. 46** Oberflächentemperaturverläufe außenseitig sowie innenseitig über einen Tag in Abhängigkeit der Putzfarbe.

## Technische Regelwerke

### Wärmeschutz

Gebäudeenergiegesetz GEG

DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2

### Feuchteschutz

DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3

DIN 18550 Planung, Zubereitung und Ausführung von Außen- und Innenputzen

DIN 68800 Holzschutz

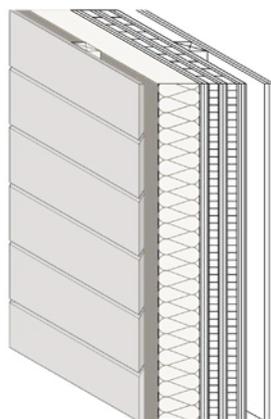
### Hagel und Sturm

ETAG 004 – Leitlinie für Europäische Technische Zulassungen für Außen-seitige Wärmedämm-Verbundsysteme mit Putzschicht

### Denkmalschutz

Landesdenkmalschutzgesetze

### 9.1.4 Hinterlüftete Holzmassivbaukonstruktion



Schichtart	d [cm]
Lattung	2,2
Hinterlüftung	3
Mineralfaser 040	11
Brettsperrholz	13
Installationsebene	5
Gipsfaserplatte	2 x 1,25
<hr/>	
U-Wert [W/(m²K)]	0,22
flächenbezogene Masse [kg/m²]	123
wirks. Speicherfähigkeit [Wh/(m²K)]	15

**Abb. 47** Schnittansicht – hinterlüftete Holzmassivbaukonstruktion.

#### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Wetterelemente mit relevantem Schadenspotenzial für das vertikale Bauteil sind Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung sowie Schlagregen, Sturm und Hagel. Auswirkungen durch hohe Lufttemperaturen und Sonneneinstrahlungen führen zu einem erhöhten Energieeintrag in das Bauteil und somit in das Gebäude. Es kann dadurch zu einer sommerlichen Überhitzung des Gebäudes kommen. Potenzielle Schadensbilder infolge Schlagregen, Sturm und Hagel treten insbesondere an der Fassadenoberfläche auf. Schäden durch Hagel an der Holzoberfläche verstärken negative Auswirkungen infolge Schlagregen (► **Abb. 48**).



**Abb. 48** Auswirkungen der Wetterelemente auf die hinterlüftete Holzmassivbaukonstruktion. Links: Hitzeeintrag in das Bauteil. Mitte: Feuchteintrag infolge Schlagregen. Rechts: Schäden an der Holzoberfläche infolge Hagel und Sturm.

#### Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung

Der Raum mit einer hinterlüfteten Holzmassivbaukonstruktion weist 15 % mehr Über-temperaturgradstunden auf als der Referenzraum. Diese Erhöhung ist auf den Einfluss

der deutlich geringeren wirksamen Speicherfähigkeit der Konstruktion zurückzuführen. Bei der Verwendung von dunklen Holzvorsatzschalen beträgt die Erhöhung 29 %. ► **Abb. 49** veranschaulicht die Oberflächentemperaturverläufe. Die helle Holzfassade hat außenseitig einen vergleichbaren Temperaturverlauf wie das Referenzbauteil. Aufgrund geringer Speichermasse ist die innenseitige Oberflächentemperatur für beide Varianten hingegen tagsüber um bis zu ~1 K höher als beim Referenzbauteil. In der Nacht sind die Innenoberflächentemperaturen vergleichbar. Die dunkle Holzfassade zeigt an der Außenoberfläche eine signifikante (~11 K) Erhöhung der maximalen Oberflächentemperaturen.

### Starkregen und Schlagregen

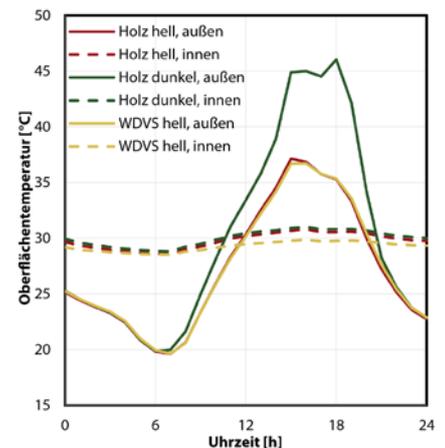
Bei hinterlüfteten Fassaden sind der Wärme- und der Witterungsschutz getrennt. Somit ist der Dämmstoff auch bei Schlagregenbelastung wirkungsvoll vor Feuchtigkeit geschützt. Ein konstruktiver Holzschutz ist besonders effektiv gegenüber Schlagregenbeanspruchung. Zum konstruktiven Holzschutz zählt u. a. die Materialwahl der äußeren Fassadenbretter. Die DIN EN 350-2 enthält Auswahlmöglichkeiten für heimische Holzarten mit geringer Saugfähigkeit sowie erhöhter Dauerhaftigkeit. Die Oberflächen der Bretter können unbehandelt oder behandelt verbaut werden. In Bezug auf Schlagregen ist bei der Wahl der Oberflächenbehandlung die Intensität der Schlagregenbeanspruchung und die daraus resultierende Beanspruchungsgruppe für Schlagregen einzubeziehen. Deckend behandelte Oberflächen können ein Wassereindringen verhindern und damit die Langlebigkeit der Fassade erhöhen. Gleichzeitig muss im Falle eines Wassereindringens ein schnelles Austrocknen ermöglicht werden. Diffusionsoffene sowie ggf. unbehandelte Oberflächen sind daher diffusionshemmenden Oberflächen vorzuziehen. Das Hirnholz ist in besonderem Maße vor Schlagregenbeanspruchung zu schützen. Hierzu können beispielsweise Zinkbleche als Schutzabdeckung verwendet oder die Stöße auf Gehrung ausgeführt werden.

### Hagel und Sturm

Zur Vorsorge gegenüber Hagelschlag und -schäden ist ein konstruktiver Holzschutz besonders wirkungsvoll. Holzarten mit hohen Dichten (zum Beispiel Robinie) sind Holzarten mit geringen Dichten (zum Beispiel Fichte) vorzuziehen. Eine Auflistung von Rohdichte und Festigkeit von Holzarten ist DIN 68364 zu entnehmen. Sägerohe Oberflächen sind gegenüber Hagelschlag weniger empfindlich als gehobelte oder Oberflächen mit Dickschichtlasuren. Nach Angaben der Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa der Schweiz sind unbehandelte, sägerohe Oberflächen damit besonders widerstandsfähig gegenüber Hagelschlag.

### Sanierung und Erweiterung

Die hinterlüftete Holzmassivbaukonstruktion eignet sich nicht als nachträgliche Sanierungsvariante für andere Fassadenkonstruktionen. Im Zuge einer (energetischen) Sanierung dieser Konstruktionen ist die Anbringung einer innenseitigen Dämmschicht möglich. Mit dieser Maßnahme wird jedoch nicht die geringe Wärmespeicherfähigkeit für den sommerlichen Hitzeeintrag erhöht. Nachteile aufgrund der fehlenden Wärmespeicherfähigkeit können damit nicht ausgeglichen werden. Nachträgliche Innendämmungsmaßnahmen im Bestandsbau bedürfen einer umsichtig abgewogenen Planung und Ausführung. Vgl. hierzu Fachwerk Innendämmung (► **Kap. 9.1.3**).



**Abb. 49** Oberflächentemperaturverläufe außenseitig sowie innenseitig über einen Tag in Abhängigkeit der Holzvorsatzschalenfarbe.

## Technische Regelwerke

### Wärmeschutz

Gebäudeenergiegesetz GEG

DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2

DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden

### Feuchteschutz

DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3

### Holzschutz

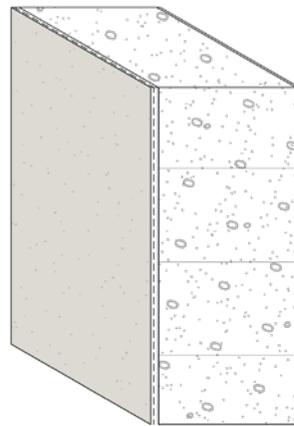
DIN 68800 Holzschutz

DIN EN 350-2 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Teil 2

### Hinterlüftete Fassade

DIN-Norm 18516-1 Außenwandbekleidungen, hinterlüftet – Teil 1

### 9.1.5 Porenbetonkonstruktion



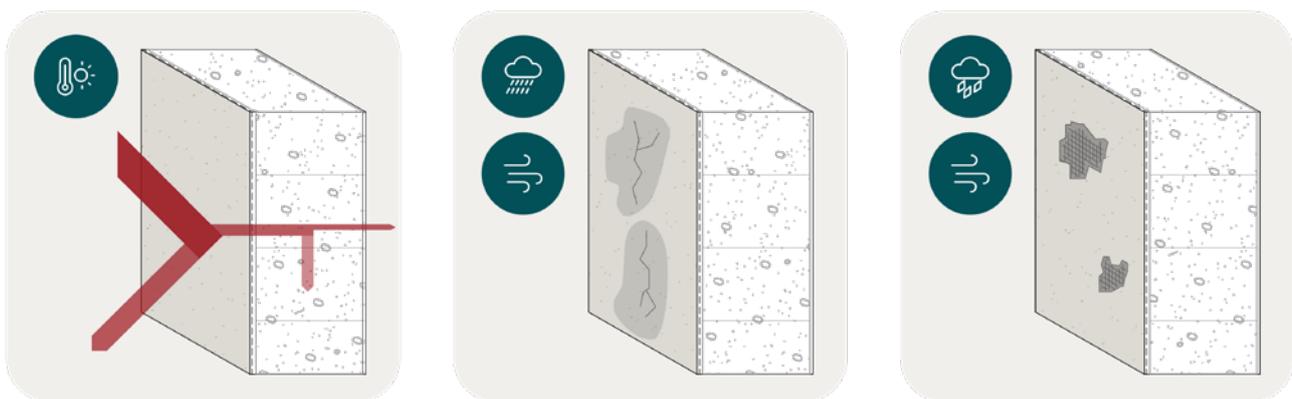
Schichtart	d [cm]
Kalkzementputz	2
Porenbeton	36,5
Gipsputz	1,5

U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,23
flächenbezogene Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	205
wirks. Speicherfähigkeit [Wh/(m <sup>2</sup> K)]	6

**Abb. 50** Schnittansicht – Porenbetonkonstruktion.

#### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Wetterelemente mit relevantem Schadenspotenzial für das vertikale Bauteil sind Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung sowie Schlagregen, Sturm und Hagel. Auswirkungen durch hohe Lufttemperaturen und Sonneneinstrahlungen führen zu einem erhöhten Energieeintrag in das Bauteil und somit in das Gebäude. Es kann dadurch zu einer sommerlichen Überhitzung des Gebäudes kommen. Potenzielle Schadensbilder infolge Schlagregen, Sturm und Hagel treten insbesondere an der Fassadenoberfläche am Putzsystem auf. Durch Schlagregen kann Wasser in die äußere Bauteilschicht eindringen und zu konstruktiven sowie energetischen Mängeln führen. Vorhandene Hagelschäden verstärken die Auswirkungen infolge Schlagregen (► **Abb. 51**).



**Abb. 51** Auswirkungen der Wetterelemente auf die Porenbetonkonstruktion. Links: Hitzeeintrag in das Bauteil. Mitte: Feuchteintrag infolge Schlagregen. Rechts: Schäden am Putzsystem infolge Hagel und Sturm.

### Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung

Der Raum mit einer Porenbetonkonstruktion weist 8 % mehr Übertemperaturgradstunden auf als der Referenzraum. Diese Erhöhung ist auf den Einfluss der geringeren wirksamen Speicherfähigkeit der Konstruktion zurückzuführen. Bei der Verwendung von dunklen Fassadenfarben beträgt die Erhöhung 27 %. ► **Abb. 52** veranschaulicht die Oberflächentemperaturverläufe. Die helle Porenbetonkonstruktion zeigt außen einen vergleichbaren Temperaturverlauf wie das Referenzbauteil. Aufgrund geringer Speichermasse ist die innenseitige Oberflächentemperatur hingegen um bis zu ~1 K höher als beim Referenzbauteil. Die dunkle Variante zeigt an der Außenoberfläche eine hohe (~10 K) und an der Innenoberfläche eine moderate (~1,5 K) Zunahme der maximalen Temperatur am Tag.

### Starkregen und Schlagregen

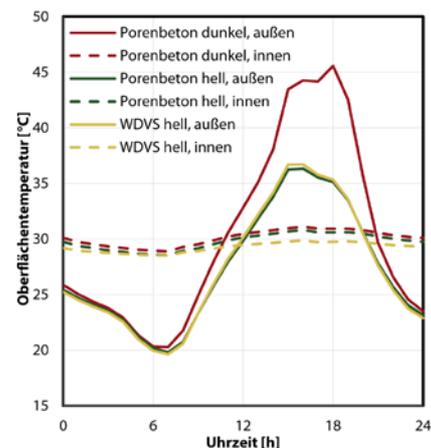
Für hochwärmedämmende Porenbetonkonstruktionen sind spezielle Leichtputze nötig. Die Wahl des geeigneten Putzsystems ist abhängig von der Rohdichte des Porenbetons sowie der Intensität der Schlagregenbeanspruchung und der daraus resultierenden Beanspruchungsgruppe für Schlagregen, s. DIN 4108-3. Neben dieser allgemeinen Einteilung ist die örtlich vorherrschende Hauptwindrichtung zu beachten. Für geringe Schlagregenbelastungen sind Außenputzsysteme ohne besondere Anforderungen ausreichend. Für mittlere oder starke Schlagregenbeanspruchungen sind wasserabweisende Putze nach der DIN 4108-3 vorgeschrieben. Hierbei sind auch die Hinweise aus der DIN 18550 zu beachten. Für mittlere und starke Schlagregenbeanspruchungen ist zudem der Einsatz von hinterlüfteten Außenwandbekleidungen zu erwägen. Die Außenwandbekleidungen können als Metallbleche, Kunststoffplatten, mineralische Plattenwerkstoffe, Natursteinplatten, Ziegel sowie Holzlatten ausgeführt werden. Werkstoffkombinationen können in Form von Sandwichplatten installiert werden. Für Außenwandbekleidungen aus Mauerwerk oder Holz vergleiche ► **Kap. 9.1.2** und ► **Kap. 9.1.4**.

### Hagel und Sturm

Für die Auswahl eines geeigneten Putzsystems zur Anpassung an Hagel (ggf. in Verbindung mit Sturm) ist auf einen für den Standort geeigneten Hagelwiderstand zu achten. Da bei Porenbetonkonstruktionen Leichtputze verwendet werden, sind diese anfällig gegenüber Hagel- und Sturmereignissen. Oberputze mit Gewebelagen und erhöhter Zugfestigkeit können als Ausgleich eingebracht werden. Eine Vorsatzschale ist bei erwarteten Hagel- und Sturmereignissen von hoher Intensität von Vorteil (► **Kap. 9.1.2**, ► **Kap. 9.1.4**).

### Sanierung und Erweiterung

Die monolithische Porenbetonkonstruktion eignet sich nicht als nachträgliche Sanierungsvariante für andere Fassadenkonstruktionen. Im Zuge einer (energetischen) Sanierung dieser monolithischen Konstruktionen bestehen grundsätzlich mehrere Möglichkeiten. Zur Verbesserung der energetischen Qualität und des Witterungsschutzes sind die Anbringung einer Vorsatzschale, die Erweiterung der Konstruktion um eine außenseitige Dämmschicht zu einem WDVS sowie die Erweiterung anhand einer zweischaligen Massivbaukonstruktion (kerngedämmt mit und ohne Hinterlüftung) möglich.



**Abb. 52** Oberflächentemperaturverläufe außenseitig sowie innenseitig über einen Tag in Abhängigkeit der Putzfarbe.

## Technische Regelwerke

### Wärmeschutz

Gebäudeenergiegesetz GEG

DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2

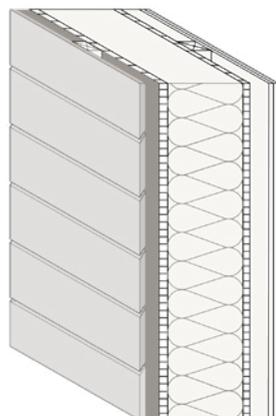
DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden

### Feuchteschutz und Hagel

DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3

DIN 18550 Planung, Zubereitung und Ausführung von Außen- und Innenputzen

### 9.1.6 Hinterlüftete Holzleichtbaukonstruktion



Schichtart	d [cm]
Lattung	2,2
Hinterlüftung	3
Holzfaserplatte	2,2
Mineralfaser 040	14
OSB-Platte	1,8
Installationsebene	5
Gipsfaserplatte	2 x 1,25
U-Wert [W/(m²K)]	0,21
flächenbezogene Masse [kg/m²]	69
wirks. Speicherfähigkeit [Wh/(m²K)]	14

Abb. 53 Schnittansicht – Hinterlüftete Holzleichtbaukonstruktion.

#### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Wetterelemente mit relevantem Schadenspotenzial für das vertikale Bauteil sind Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung sowie Schlagregen, Sturm und Hagel. Auswirkungen durch hohe Lufttemperaturen und Sonneneinstrahlungen führen zu einem erhöhten Energieeintrag in das Bauteil und somit in das Gebäude. Es kann dadurch zu einer sommerlichen Überhitzung des Gebäudes kommen. Potenzielle Schadensbilder infolge Schlagregen, Sturm und Hagel treten insbesondere an der Fassadenoberfläche auf. Vorhandene Schäden durch Hagel an der Holzoberfläche verstärken negative Auswirkungen infolge Schlagregen (► Abb. 54).



Abb. 54 Auswirkungen der Wetterelemente auf die hinterlüftete Holzleichtbaukonstruktion. Links: Hitzeintrag in das Bauteil. Mitte: Feuchteintrag infolge Schlagregen. Rechts: Schäden an der Holzoberfläche infolge Hagel und Sturm.

### Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung

Der Raum mit einer hinterlüfteten Holzleichtbaukonstruktion weist 17 % mehr Über-temperaturgradstunden auf als der Referenzraum. Diese Erhöhung ist auf den Einfluss der deutlich geringeren wirksamen Speicherfähigkeit der Konstruktion zurückzuführen. Bei der Verwendung von dunklen Holzvorsatzschalen beträgt die Erhöhung 31 %. ► **Abb. 55** veranschaulicht die Oberflächentemperaturverläufe. Die helle Holz-fassade hat außenseitig einen vergleichbaren Temperaturverlauf wie das Referenzbauteil. Aufgrund einer geringen Speichermasse ist die innenseitige Oberflächentemperatur hingegen tagsüber um bis zu ~1 K höher als beim Referenzbauteil. Die dunkle Holz-fassade weist an der Außenoberfläche eine signifikante (~10,5 K) und an der Innenoberfläche eine moderate (~1,5 K) Erhöhung der maximalen Oberflächentemperaturen auf.

### Starkregen und Schlagregen

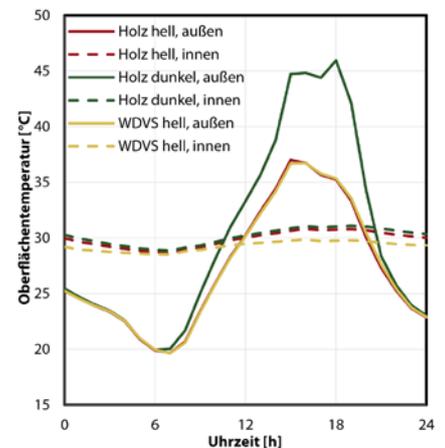
Bei hinterlüfteten Fassaden sind der Wärme- und der Witterungsschutz getrennt. Somit ist der Dämmstoff auch bei Schlagregenbelastung wirkungsvoll vor Feuchtigkeit geschützt. Der konstruktive Holzschutz ist besonders effektiv gegenüber Schlagregenbeanspruchung. Zum konstruktiven Holzschutz zählt u. a. die Materialwahl der äußeren Fassadenbretter. Die DIN EN 350-2 enthält Auswahlmöglichkeiten für heimische Holzarten mit geringer Saugfähigkeit sowie erhöhter Dauerhaftigkeit. Die Oberflächen der Bretter können unbehandelt oder behandelt verbaut werden. In Bezug zu Schlagregen ist bei der Wahl der Oberflächenbehandlung die Intensität der Schlagregenbeanspruchung und die daraus resultierende Beanspruchungsgruppe für Schlagregen einzubeziehen. Deckend behandelte Oberflächen können ein Wassereindringen verhindern und damit die Langlebigkeit der Fassade erhöhen. Gleichzeitig muss im Falle eines Wassereindringens ein schnelles Austrocknen ermöglicht werden. Diffusionsoffene sowie ggf. unbehandelte Oberflächen sind daher diffusionshemmenden Oberflächen vorzuziehen. Das Hirnholz ist in besonderem Maße vor Schlagregenbeanspruchung zu schützen. Hierzu können beispielsweise Zinkbleche als Schutzabdeckung verwendet oder die Stöße auf Gehrung ausgeführt werden.

### Hagel und Sturm

Zur Vorsorge gegenüber Hagelschlag und -schäden ist der konstruktive Holzschutz besonders wirkungsvoll. Holzarten mit hohen Dichten (zum Beispiel Robinie) sind Holzarten mit geringen Dichten (zum Beispiel Fichte) vorzuziehen. Eine Auflistung von Rohdichten und Festigkeit von Holzarten ist DIN 68364 zu entnehmen. Sägerohe Oberflächen sind gegenüber Hagelschlag weniger empfindlich als gehobelte oder Oberflächen mit Dickschichtlasuren. Nach Angaben der Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa der Schweiz sind unbehandelte, sägerohe Oberflächen damit besonders widerstandsfähig gegenüber Hagelschlag.

### Sanierung und Erweiterung

Die hinterlüftete Holzmassivbaukonstruktion eignet sich nicht als nachträgliche Sanierungsvariante für andere Fassadenkonstruktionen. Im Zuge einer (energetischen) Sanierung dieser Konstruktionen ist die Anbringung einer innenseitigen zusätzlichen Dämmschicht möglich. Hierbei sollten aber folgende Nachteile ebenfalls abgewogen werden: Entkopplung der thermischen Speichermasse, Gefahr von Tauwasserausfall im Zwischenraum von Innendämmung und Außenwand sowie die nicht mögliche Verhinderung von Wärmebrücken einbindender Bauteile.



**Abb. 55** Oberflächentemperaturverläufe außenseitig sowie innenseitig über einen Tag in Abhängigkeit der Holzvorsatzschalenfarbe.

## Technische Regelwerke

### Wärmeschutz

Gebäudeenergiegesetz GEG

DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2

DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden

### Feuchteschutz

DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3

### Holzschutz

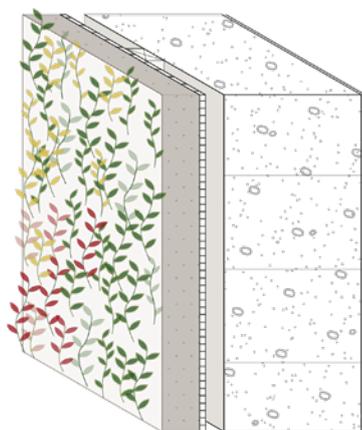
DIN 68800 Holzschutz

DIN EN 350-2 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Teil 2

### Hinterlüftete Fassade

DIN-Norm 18516-1 Außenwandbekleidungen, hinterlüftet – Teil 1

### 9.1.7 Porenbetonkonstruktion mit Grünfassade

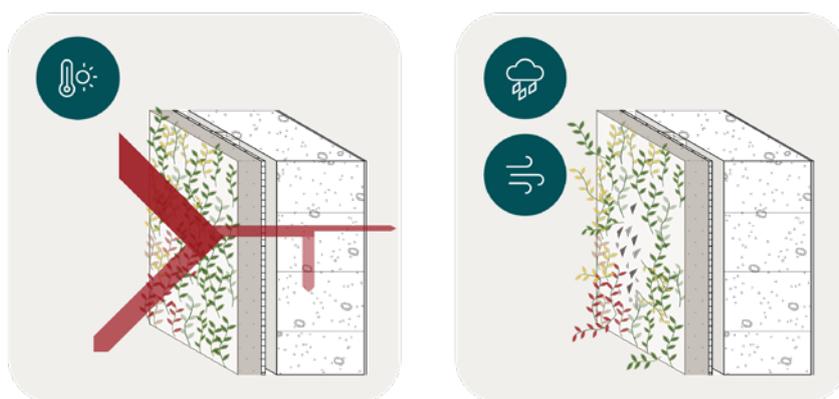


Schichtart	d [cm]
Begrünung	15
Pflanzensubstrat	10
OSB-Platte	2
Hinterlüftung	5
Kalkzementputz	2
Porenbeton	36,5
Gipsputz	1,5
<hr/>	
U-Wert [W/(m²K)]	0,23
flächenbezogene Masse [kg/m²]	250 - 350
wirks. Speicherfähigkeit [Wh/(m²K)]	6

**Abb. 56** Schnittansicht – Porenbetonkonstruktion mit Grünfassade.

#### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Wetterelemente mit relevantem Schadenspotenzial auf das vertikale Bauteil sind Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung sowie (Schlag-)Regen, Sturm und Hagel. Auswirkungen durch hohe Lufttemperaturen und Sonneneinstrahlungen führen zu einem erhöhten Energieeintrag in das Bauteil und somit in das Gebäude. Es kann dadurch zu einer sommerlichen Überhitzung des Gebäudes kommen. Zudem können hohe solare Einstrahlung und Hitze zu einer Schädigung der Pflanzenschicht führen. Potenzielle Schadensbilder infolge Sturm und Hagel betreffen insbesondere die äußere Pflanzenschicht (► **Abb. 57**).



**Abb. 57** Auswirkungen der Wetterelemente auf die Porenbetonkonstruktion mit Grünfassade. Links: Hitzeeintrag in das Bauteil. Rechts: Schäden am Grünsystem infolge Hagel und Sturm.

#### Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung

Vertikale Begrünungssysteme können boden- oder wandgebunden ausgeführt werden. Je nach Ausführungsart beeinflussen die Systeme die hygrothermischen Be-

dingungen im dahinterliegenden Bauteil, im Innen- sowie im Außenraum aufgrund der drei bauphysikalischen Prozesse Verschattung, Dämmung und Verdunstungskühlung unterschiedlich stark (► **Kap. 8.2.2**). Die Verschattung mindert im Sommer die durch solare Strahlung eingeführte Energie in das Bauteil und somit in das Gebäude. Sommergrüne Kletter- und Ranksysteme sind in Verbindung mit Verglasungsflächen besonders effektiv. Diese bieten einen Verschattungsgrad von 12 bis 45 % (Koch, K. et al. 2020). Im Sommer tragen die dichten Blätter zu einer hohen Verschattung der transparenten Flächen bei. Im Winter hingegen mindern die Kletter- und Ranksysteme ohne Blattwerk die solaren Gewinne kaum. Bei wandgebundenen Begrünungssystemen sind nach (Djedjig, R. et al. 2017) an sonnenreichen Sommertagen Reduzierungen der maximalen opaken Außenoberflächentemperatur von ca. 15 K möglich. Durch die Verwendung der gekühlten Luft im Zwischenraum wandgebundenen Systeme für die Gebäudetechnik ist eine signifikante Energieeinsparung möglich (Perini, K. et al. 2017). Die nächtliche Auskühlung wird bei der Verwendung von wandgebundenen Begrünungssystemen durch die Abschirmwirkung gedämpft. Zusätzlich zur Verschattung entziehen die Verdunstungsprozesse der umliegenden Luft sowie der Substratschicht Energie und führen wiederum zu einer weiteren sommerlichen Bauteilkühlung. Diese Punkte veranschaulichen das große Potenzial von Fassadenbegrünungssystemen als Beitrag für den sommerlichen Wärmeschutz.

#### **Starkregen und Schlagregen**

Das wandgebundene Begrünungssystem fungiert als Vorsatzschale, um den Witterungsschutz der Bausubstanz zu erhöhen. Im Gegensatz zu den anderen Vorsatzschalen bietet dieses System Retentionsflächen und somit positive Synergieeffekte. Das durch Schlagregen auftreffende Wasser wird durch die Substratschicht zwischengespeichert und zeitverzögert abgegeben. (IBP 2021)

#### **Hagel und Sturm**

Gegenüber Hagel und Sturmereignissen sind Pflanzen je nach Exponiertheit sehr anfällig (► **Kap. 8.2.1**). Die Pflanzen können durch auftreffende Gegenstände bei Hagel und/oder Sturm geschädigt oder vollständig zerstört werden. Für Regionen und Orientierungen mit sehr hohen erwarteten Hagel- und Sturmintensitäten sind geeignete Pflanzen und Systeme zu wählen. Alternativ bieten sich in diesen Fällen andere, nichtbegrünte Vorsatzschalen als wirksamer Witterungsschutz an (► **Kap. 9.1.4**, ► **Kap. 9.1.2**). Es ist auf eine modulare Bauweise der Grünssysteme zu achten, um im Bedarfsfall einzelne Pflanzen oder Module austauschen zu können.

#### **Sanierung und Erweiterung**

Die Verwendung von Fassadenbegrünungssystemen eignet sich als nachträgliche Sanierungsvariante für viele Fassadenkonstruktionen. Folgende Aspekte sind bei der Installation und Umsetzung zu beachten. Zum Ersten muss die Fassadenkonstruktion die Tragfähigkeit für die Anbringung eines Begrünungssystems nachweisen. Danach ist die Wahl der Befestigungstechnik abzustimmen. Im dritten Schritt steht die Pflanzen- und Substratauswahl, die abhängig vom gewählten Begrünungssystem ist. Daraufhin wird das Wasser- und Pflegemanagement abgestimmt. Neben den zuvor genannten Aspekten liefern die Begrünungssysteme einen wichtigen Beitrag zur Erhaltung und Steigerung der urbanen Biodiversität.

## **Technische Regelwerke**

### **Wärmeschutz**

Gebäudeenergiegesetz GEG

DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2

DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden

### **Feuchteschutz**

DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3

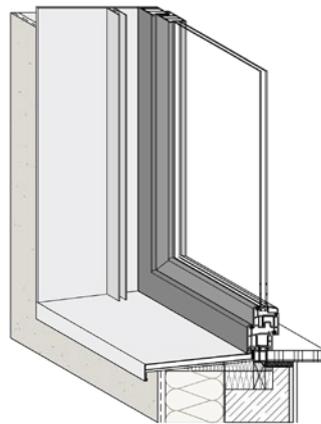
### **Sturm**

DIN 1055-4 Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4 Windlasten

### **Begrünungssystem**

FLL: Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltung von Wand- und Fassadenbegrünungen

## 9.1.8 Fenster



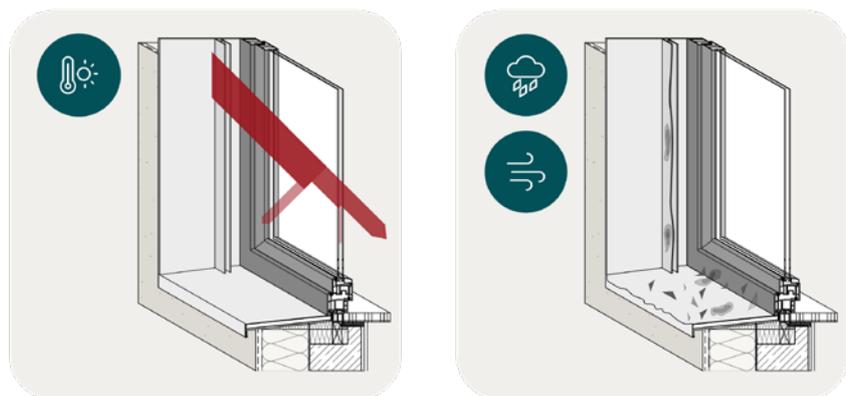
Schichtart	d [cm]
2-Scheiben-Isolierverglasung mit Kunststoffrahmen	3

U-Wert (montiert) [W/(m <sup>2</sup> K)]	1,3
F <sub>c</sub> -Wert (ab 300 W/m <sup>2</sup> ) [-]	0,25
g-Wert [-]	0,6

**Abb. 58** Schnittansicht – Fenster.

### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Wetterelemente mit relevantem Schadenspotenzial für das vertikale Bauteil sind Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung sowie Schlagregen, Hagel und Sturm. Transparente Flächen tragen in hohem Maße zum solaren Energieeintrag in das Gebäude bei. Daher führen die Auswirkungen durch hohe Lufttemperaturen und vor allem durch ungeminderte Sonneneinstrahlungen zu einer erhöhten sommerlichen Hitzebelastung. Potenzielle Schadensbilder infolge von Sturm und Hagel treten insbesondere an den Fensterrahmen auf (► **Abb. 59**).



**Abb. 59** Auswirkungen der Wetterelemente auf das Fenster. Links: Hitzeeintrag in das Bauteil. Rechts: Schäden an den Fensterrahmen infolge Hagel und Sturm.

### Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung

Der Referenzraum weist eine Verglasung mit einem g-Wert von 0,6 sowie eine Sonnenschutzvorrichtung (F<sub>c</sub> 0,25) auf, die ab einer Einstrahlung von 300 W/m<sup>2</sup> aktiviert wird.

► **Abb. 60** veranschaulicht die Strahlungsenergieverläufe. Der Raum mit einer Ver-

## Infobox

### Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert)

Beschreibt die Summe der Energie, die durch die direkte Strahlungstransmission und die sekundäre Wärmeabgabe der Glasscheibe (Konvektion und Strahlung) in den Innenraum eingetragen wird. Dieser gibt also den an den Innenraum durchgelassenen Anteil der außenseitig auftreffenden Solarstrahlung in Form von Strahlung und Wärme an. Ein g-Wert von 1 entspricht einem Energiedurchlass von 100 %.

glasung mit dem g-Wert 0,4 (ohne Sonnenschutzsystem) weist 14 % mehr Übertemperaturgradstunden auf als der Referenzraum. Diese Erhöhung ist auf den Einfluss der fehlenden Sonnenschutzmaßnahmen zu Spitzenzeiten zurückzuführen. Die Verwendung eines geringeren g-Werts als 0,25 (ohne Sonnenschutzsystem) reduziert die Übertemperaturgradstunden um 92 %. Bei geringen g-Werten sind allerdings der fehlende winterliche Solareintrag sowie der energetische Aufwand zur künstlichen Beleuchtung gegenüberzustellen, da auch der Tageslichteintrag deutlich reduziert wird. Verglasungen mit sehr geringen g-Werten weisen zudem andere optische Eigenschaften auf. Kombinationen aus moderaten bis geringen g-Werten der Verglasung und geeigneten Sonnenschutzmaßnahmen sind anzustreben. In der Planung sind die Fassadenorientierungen und die daraus auf die Sonnenschutzmaßnahmen einwirkenden Wetterelemente zu beachten (► Kap. 9.1.9).

### Starkregen und Schlagregen

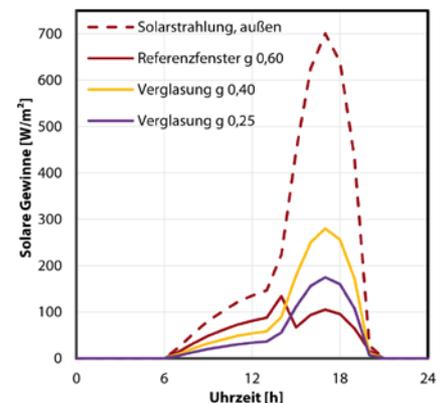
Bei Fenstern ist auf die fachgerechte Ausführung sowie den fachgerechten Einbau der Fensterelemente zu achten. Mängel an Anschlussdetails führen bei Schlagregenbeanspruchungen zu Feuchteintritt und -schäden.

### Hagel und Sturm

Schädigungen durch Hagel oder Sturm sind vor allem an den Fenstersrahmen zu erwarten. Holzrahmen sind gegenüber Kunststoff- und Aluminiumrahmen anfälliger. Bei modernen Fenstern mit einer Zwei- oder Dreifachverglasung tritt ein Bruch der Verglasung nur bei extremen Hagel- und Sturmereignissen auf.

### Sanierung und Erweiterung

Die transparenten Fassadenflächen bieten ein hohes energetisches Sanierungspotenzial, da der sommerliche Wärmeschutz in hohem Maße von den Eigenschaften dieser Flächen abhängig ist. Süd-, ost- und westorientierte Fassaden sollten ein ausgewogenes Management der solaren Gewinne besitzen. Zunächst sind die Auswirkungen auf die Sonnenschutzsysteme je Fassadenorientierung abzuwägen (► Kap. 9.1.9). Anschließend folgt die Gegenüberstellung der gegebenen Anforderungen an Raumtemperatur und Tageslichtversorgung mit den Verglasungskonzepten. Zuletzt sind geeignete und robuste Sonnenschutzsysteme inkl. einer angepassten Steuerung einzubeziehen. Für Gebäude oder Fassadenbereiche mit einer sehr hohen erwarteten Intensität an Hagel- und Sturmeinwirkungen sind verbesserte Verglasungssysteme (niedrigere g-Werte) mit automatisch gesteuerten Sonnenschutzsystemen zu empfehlen.



**Abb. 60** Solarstrahlung außen und solare Gewinne in Abhängigkeit der Zeit. Die Solarstrahlung außen stellt die auf die vertikale Außenoberfläche auftreffende Sonneneinstrahlung dar. Die anderen Verläufe zeigen den solaren Energieeintrag in den Innenraum durch ein westorientiertes Fenster.

## Technische Regelwerke

### Wärmeschutz

Gebäudeenergiegesetz GEG

DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2

DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden

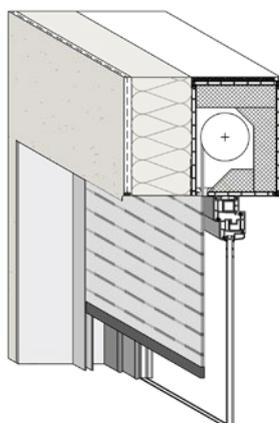
### Feuchteschutz

DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3

### Tageslicht

DIN 5034-1 Tageslicht in Innenräumen

## 9.1.9 Sonnenschutzsysteme



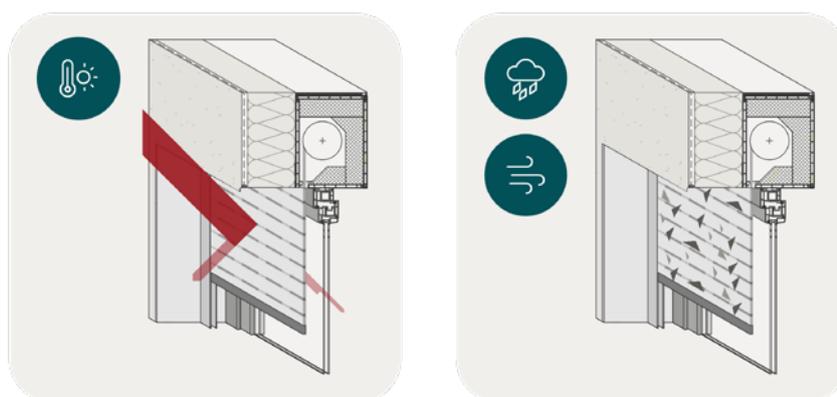
Schichtart	d [cm]
Rollladenpanzer	0,4

U-Wert (montiert) [W/(m <sup>2</sup> K)]	1,3
F <sub>c</sub> -Wert (ab 300 W/m <sup>2</sup> ) [-]	0,25
g-Wert [-]	0,6

**Abb. 61** Schnittansicht – Fenster inkl. aktivem Sonnenschutzsystem.

### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Wetterelemente mit relevantem Schadenspotenzial für das Bauteil sind Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung sowie Schlagregen, Hagel und Sturm. Transparente Flächen tragen in hohem Maße zum solaren Energieeintrag in das Gebäude bei. Daher führen die Auswirkungen durch hohe Lufttemperaturen und vor allem durch ungeminderte Sonneneinstrahlungen ohne (oder mit beschädigten) Sonnenschutzmaßnahmen zu einer erhöhten sommerlichen Hitzelast. Potenzielle Schadensbilder infolge von Sturm und Hagel treten insbesondere bei außen liegenden Sonnenschutzsystemen, beispielsweise Vorbaurollladen, Raffstore, Fensterläden, Faltstore oder Markisen, auf (► **Abb. 62**).



**Abb. 62** Auswirkungen der Wetterelemente auf die Sonnenschutzsysteme. Links: Hitzeeintrag in das Bauteil. Rechts: Schäden an den Lamellen infolge von Hagel und Sturm.

### Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung

Der Referenzraum weist ein Fenster mit einem g-Wert von 0,6 sowie eine Sonnenschutzvorrichtung (F<sub>c</sub> 0,25) auf, die ab einer Einstrahlung von 300 W/m<sup>2</sup> aktiviert wird.

► **Abb. 63** veranschaulicht dazu die Strahlungsenergieverläufe. Der Raum mit einem

## Infobox

### Abminderungsfaktor ( $F_c$ -Wert)

für Sonnenschutzvorrichtungen beschreibt die Effektivität des Sonnenschutzes gegenüber der Sonneneinstrahlung. Dieser gibt also an, wie groß die Abminderung der auftreffenden Solarstrahlung durch ein Sonnenschutzsystem ist. Ein  $F_c$ -Wert von 1 entspricht keinem Sonnenschutz. Eine Raffstore erreicht einen  $F_c$ -Wert von 0,25. Je niedriger dieser Wert, desto höher die Effektivität. Der  $F_c$ -Wert ist relativ und hängt auch vom Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung ab.  $F_c$ -Werte können somit nur miteinander verglichen werden, wenn die gleichen Gesamtenergiedurchlassgrade der Verglasungen vorhanden sind.

Sonnenschutzsystem mit  $F_c$  0,80 (entspricht innen liegendem Lamellenvorhang, hell) weist 261 % mehr Übertemperaturgradstunden auf als der Referenzraum. Der Raum mit einem Sonnenschutzsystem  $F_c$  0,50 (entspricht außen liegender Markise) weist 100 % mehr Übertemperaturgradstunden auf als der Referenzraum. Diese Erhöhungen sind bei gleicher Steuerung auf den Einfluss der geringeren Effektivität, vor allem bei innen liegenden Sonnenschutzsystemen, zurückzuführen. Für geschlossene Roll- oder Fensterläden ( $F_c$  0,10) resultiert eine Reduzierung der Übertemperaturgradstunden von 39 % gegenüber dem Referenzraum. Diese sehr geringen  $F_c$ -Werte sind allerdings nicht für die Nachweisführung des sommerlichen Wärmeschutzes gedacht, da der Tageslichteintrag fast vollständig reduziert wird.

### Starkregen und Schlagregen

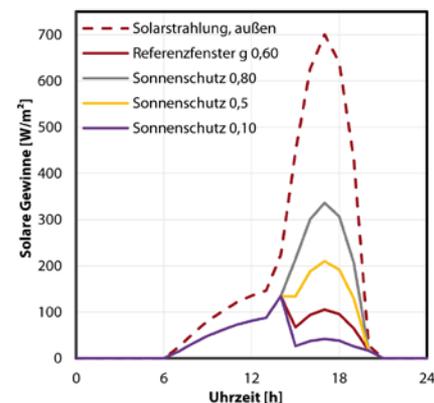
Bei Sonnenschutzsystemen ist auf die fachgerechte Wahl und Ausführung bezüglich der Feuchteverträglichkeit und der mechanischen Beanspruchung zu achten. Textile Verschattungssysteme sind meist feuchteempfindlicher als nichttextile Systeme und sollten vor Feuchteeinwirkung geschützt werden.

### Hagel und Sturm

Schäden durch Hagel oder Sturm sind je nach Intensität für fast alle außen liegenden Sonnenschutzsysteme zu erwarten. Fenster- und Rollläden bieten den höchsten Widerstand gegenüber Hagel- und Sturmeinwirkungen. Lamellen-Textilsysteme sind aufgrund ihrer leichten Formausführung im Besonderen vor Hagel- und Sturmeinwirkungen zu schützen. Jedoch sind auch windstabile Lamellensysteme zugelassen, die im Bedarfsfall bis 25 m/s (Beaufort 10, schwerer Sturm) aktiviert bleiben können. Bewegliche und über Wind-, Strahlungs- oder Regensensoren automatisch steuerbare Sonnenschutzsysteme sind starren vorzuziehen, um im Ereignisfall die Systeme einzufahren und den höchsten mechanischen Schutz zu bieten.

### Ausführung

Für hohe erwartete Intensitäten sind bewegliche Systeme mit einer intelligenten Steuerung zu wählen. Diese erfüllen die Aufgabe des sommerlichen Wärmeschutzes und bieten im Ereignisfall einen hohen mechanischen Schutz im nicht aktiven Zustand. Daneben sind die bauliche Verschattung und die Vegetationsverschattung durch Bäume einzubeziehen. Diese Hausbäume bieten gleichzeitig für Hagel- und Sturmereignisse einen zusätzlichen Witterungsschutz (► Kap. 8.1, ► Kap. 8.2).



**Abb. 63** Solarstrahlung außen und solare Gewinne in Abhängigkeit der Zeit. Die Solarstrahlung außen stellt die auf die vertikale Außenoberfläche auftreffende Sonneneinstrahlung dar. Die anderen Verläufe zeigen den solaren Energieeintrag in den Innenraum durch ein westorientiertes Fenster.

## Technische Regelwerke

### Wärmeschutz

Gebäudeenergiegesetz GEG

DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2

DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden

### Feuchteschutz

DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3

### Tageslicht

DIN 5034-1 Tageslicht in Innenräumen

### Sonnenschutzsysteme

DIN 18073 Rollläden, Markisen und sonstige Abschlüsse im Bauwesen – Begriffe und Kriterien zur Anwendung



## 9.2 Dachkonstruktion

Dach horizontal, opak

Dach horizontal, transparent

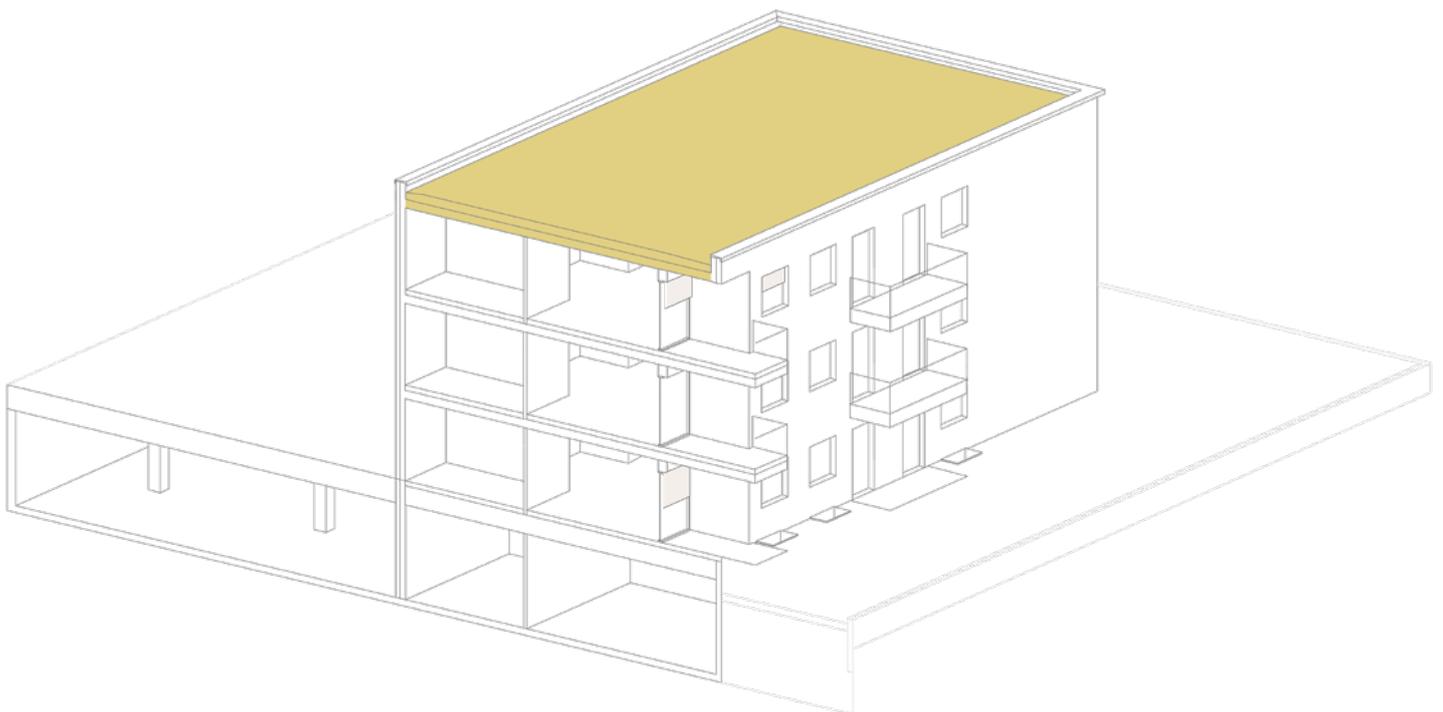
Dach geneigt, opak und transparent

**Warmdach (Beton und Holz)**

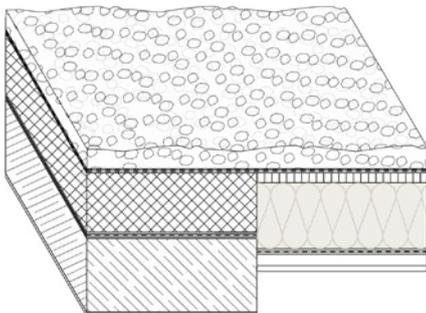
**Kaltdach (Beton und Holz)**

**Oberlichter und Lichtkuppeln**

**Satteldach inkl. Dachfenster**



## 9.2.1 Warmdach



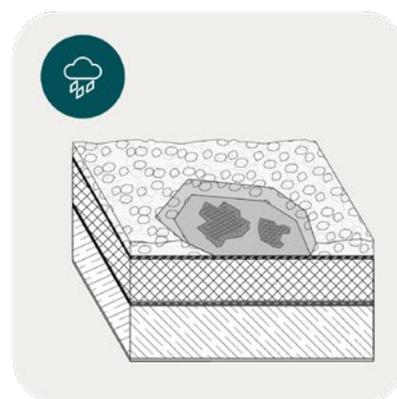
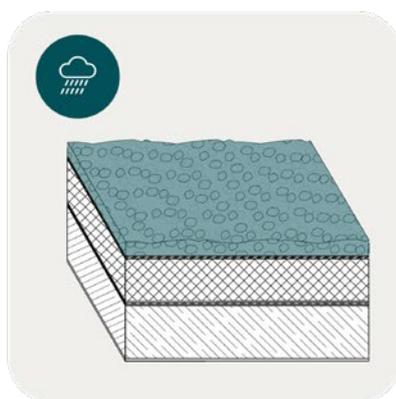
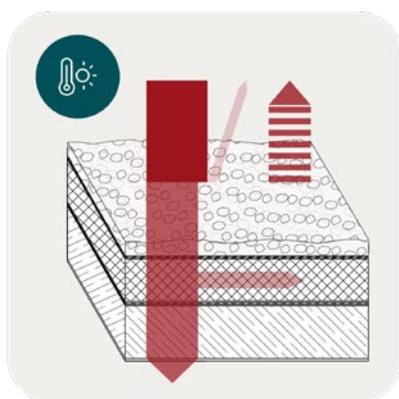
Schichtart (Stahlbeton)	d [cm]
Kies	5
Abdichtung & Schutzvlies	0,4
XPS-Dämmung 035	16
Dampfsperre	0,1
Stahlbeton C35/45	20
Gipsputz	1,5
U-Wert [W/(m²K)]	0,19
flächenbezogene Masse [kg/m²]	543
wirks. Speicherkapazität [Wh/(m²K)]	51

Schichtart (Holz)	d [cm]
Kies	5
Abdichtung & Schutzvlies	0,4
Sperrholzträger	4,4
Mineralfaser 040	16
OSB-Platten	2 x 1,5
Gipsputz	1,5
U-Wert [W/(m²K)]	0,20
flächenbezogene Masse [kg/m²]	148
wirks. Speicherkapazität [Wh/(m²K)]	13

**Abb. 64** Schnittansicht – Warmdach in Stahlbeton (links) und Holz (rechts).

### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Wetterelemente mit relevantem Schadenspotenzial für das horizontale Bauteil sind Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung sowie Starkregen und Hagel. Auswirkungen infolge hoher Lufttemperaturen und Sonneneinstrahlungen führen zu einem erhöhten Energieeintrag in das Bauteil und somit in das Gebäude. Es kann dadurch zu einer sommerlichen Überhitzung des Gebäudes kommen. Potenzielle Schadensbilder infolge Starkregen treten auf der Dachfläche sowie dem Grundstück und der Umgebung auf. Durch Starkregen und fehlende Retentionsmöglichkeiten gelangt das Wasser ohne zeitliche Verzögerung auf die Grundstücksfläche und kann zu Überflutungsereignissen beitragen (► **Abb. 65**).



**Abb. 65** Auswirkungen der Wetterelemente auf das Warmdach. Links: Hitzeeintrag in das Bauteil. Mitte: Überflutungen der Dachfläche infolge Starkregen. Rechts: Beschädigungen der Dachbahn infolge Hagel.

### Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung

Das Warmdach (WD) mit Betondecke dient als Dachkonstruktion des Referenzraumes (► Kap. 7.2). Dieser weist im Referenzzustand ca. 2.050 Übertemperaturgradstunden auf. ► Abb. 66 veranschaulicht vergleichend die Oberflächentemperaturverläufe der WD-Betonkonstruktion gegenüber einer WD-Holzkonstruktion. Bei der Holzkonstruktion ist die Tragebene nicht als Stahlbeton ausgeführt, sondern besteht aus Holzträgern mit einer Zwischendämmung, die U-Werte sind vergleichbar. Die Außenoberflächen beider Konstruktionen unterliegen über den Tag starken Temperaturschwankungen von ca. 25 K. Diese sind auf die solaren Einstrahlungen am Tag in Verbindung mit einer horizontalen Flächenausrichtung zurückzuführen. Die WD-Betonkonstruktion zeigt tagsüber einen um 1,5 K höheren Maximaltemperaturwert an der Außenoberfläche. Die Innenoberflächentemperaturänderungen fallen demgegenüber beim Beton mit ca. 2 K deutlich geringer aus. Das WD-Holz zeigt sowohl eine höhere Differenz der Innenoberflächentemperaturen (~3 K) als auch ein generell höheres Temperaturniveau. Dies ist auf die höhere wirksame Speicherefähigkeit der Betonkonstruktion zurückzuführen. Daraus folgen auch um 21 % höhere Übertemperaturgradstunden beim WD-Holz.

### Starkregen

Die Niederschlagabführung, vor allem bei Starkregen, ist zur Vorbeugung von Feuchteschäden und im Extremfall von statischen Schäden von entscheidender Bedeutung. Um Pfützen und Schlammablagerungen zu verhindern, sind Flachdächer grundsätzlich mit einem Gefälle (Gefälleestrich oder Keildämmung) von mindestens 2 % auszuführen. Der Wasserablauf erfolgt innen liegend. Die Dimensionierung der Abflüsse ist auf die Dimensionierung des Notüberlaufs (für Starkregenereignisse) abzustimmen. Die Notüberläufe sind so auszuführen, dass nach außen abgeführtes Wasser keine Schäden sowohl an der Fassade als auch an der Grundfläche erzeugt. Die Abflüsse und Notüberläufe sind regelmäßig zu reinigen, um Verstopfungen im Ereignisfall zu vermeiden. Weiterführend ist die Speicherung von Niederschlagswasser in das Gesamtgebäudekonzept einzubeziehen und mit weiteren Maßnahmen am Gebäude oder der Liegenschaft abzustimmen (► Kap. 8 und ► Kap. 10). Flachdächer mit konventioneller Kiesschüttung tragen mit einem mittleren Abflussbeiwert (► Infobox und Kap. 9.2.2) von 0,8 nur geringfügig zur Wasserrückhaltung im Starkregenfall bei.

### Hagel und Sturm

Zur Vorsorge gegenüber Hagelschlag und -schäden ist die aufgetragene Kiesschüttung von entscheidender Bedeutung. Freiliegende Dachbahnen sind durch starke Hagelereignisse gefährdet und können in der Folge durch eine beschädigte Dachbahn zu massiven Feuchteschäden in der gesamten Konstruktion führen. Innen liegende Wasserabläufe weisen gegenüber außen liegenden einen hohen Hagelschutz auf, da diese nicht mehr exponiert den Einwirkungen ausgesetzt sind. Weiterführend ist bei Sturm das Flachdach gegen Abheben durch Windsog zu sichern. Dabei stehen die drei Möglichkeiten Auflast (Kiesschüttung), mechanische Befestigung und Verklebung zur Verfügung. Generell sind die Rand- und Eckbereiche zusätzlich zu untersuchen und ggf. erweitert zu sichern.

### Sanierung und Erweiterung

Erweiterungen zu einem Gründach (oder weiterführend Retentionsdach) sind unter Einhaltung der statischen Anforderungen möglich, vgl. hierzu ► Kap. 9.2.3. Erweiterungen zu einem Kaltdach sind ebenfalls möglich, vgl. hierzu ► Kap. 9.2.2.

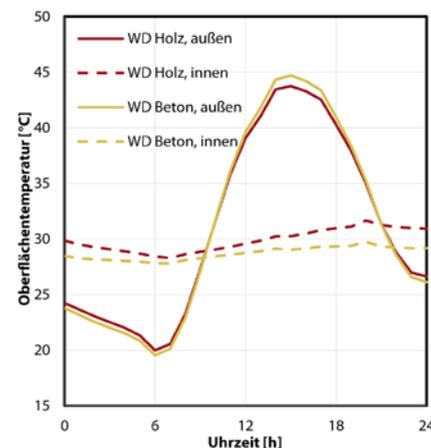


Abb. 66 Oberflächentemperaturverläufe außenseitig sowie innenseitig der Referenz- und Leichtbauwarmdachfläche.

## Technische Regelwerke

### Wärmeschutz

Gebäudeenergiegesetz GEG

DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2

DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden

### Feuchteschutz

DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3

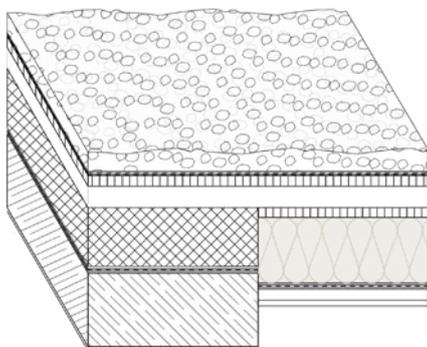
### Starkregen und Sturm

DIN EN 12056-3 Schwerkraftentwässerungsanlagen innerhalb von Gebäuden – Teil 3

Fachregel für Abdichtungen – Flachdachrichtlinie

Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten

## 9.2.2 Kaltdach



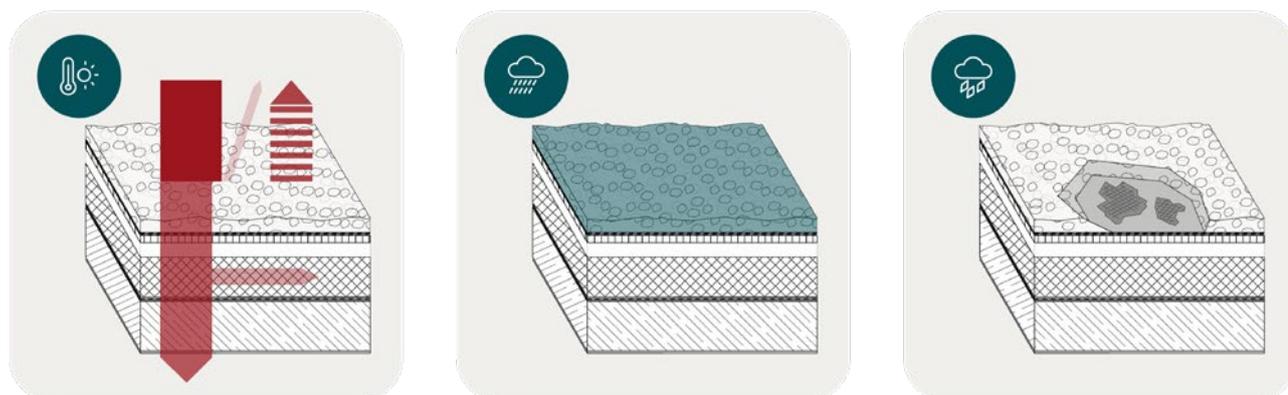
Schichtart (Stahlbeton)	d [cm]
Kies	5
Abdichtung & Schutzvlies	0,4
Holzschalung	4,4
Hinterlüftung	6
XPS-Dämmung 035	16
Dampfsperre	0,1
Stahlbeton C35/45	20
Gipsputz	1,5
U-Wert [W/(m²K)]	0,18
flächenbezogene Masse [kg/m²]	568
wirks. Speicherkapazität [Wh/(m²K)]	51

Schichtart (Holz)	d [cm]
Kies	5
Abdichtung & Schutzvlies	0,4
Sperrholzplatte	4,4
Hinterlüftung	6
Glaswolle 035	16
OSB-Platten	2 x 1,5
Gipsputz	1,5
U-Wert [W/(m²K)]	0,18
flächenbezogene Masse [kg/m²]	144
wirks. Speicherkapazität [Wh/(m²K)]	13

**Abb. 67** Schnittansicht – Kaltdach in Stahlbeton (links) und Holz (rechts).

### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Wetterelemente mit relevantem Schadenspotenzial für das horizontale Bauteil sind Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung sowie Starkregen. Auswirkungen infolge hoher Lufttemperaturen und Sonneneinstrahlungen führen zu einem erhöhten Energieeintrag in das Bauteil und somit in das Gebäude. Es kann dadurch zu einer sommerlichen Überhitzung des Gebäudes kommen. Potenzielle Schadensbilder infolge Starkregen treten auf der Dachfläche sowie dem Grundstück und der Umgebung auf. Durch Starkregen und fehlende Retentionsmöglichkeiten gelangt das Wasser ohne zeitliche Verzögerung auf die Grundstücksfläche und kann zu Überflutungsereignissen beitragen (► **Abb. 68**).



**Abb. 68** Auswirkungen der Wetterelemente auf das Kaltdach. Links: Hitzeeintrag in das Bauteil. Mitte: Überflutung der Dachfläche infolge Starkregen. Rechts: Beschädigungen infolge Hagel.

## Infobox

### Abflussbeiwert C

Es werden generell drei Abflussbeiwerte unterschieden. Der mittlere Abflussbeiwert gibt das über den gesamten Niederschlagszeitraum gemittelte Verhältnis von Abfluss- und Regenmenge an. Ein mittlerer Abflussbeiwert von 0,8 entspricht also einer Abflussmenge von 80 % der gesamten Niederschlagsmenge. Der Spitzenabflussbeiwert resultiert aus dem Verhältnis der maximalen Abflussmenge zu der jeweiligen Regenmenge. Der Endabflussbeiwert beinhaltet weiterführend die zeitliche Veränderung der Abflusseigenschaften. Beispielsweise steigen die Sättigung und die Muldenfüllung über die Regendauer an und führen zu einer Steigerung der Abflussmenge bis zu einem Endwert (dem Endabflussbeiwert) an.

### Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung

Das Kaltdach (KD) mit Betondecke weist aufgrund des geringfügig niedrigeren U-Werts sowie der Hinterlüftungsebene gegenüber dem Referenzzustand ca. 19 % weniger Übertemperaturgradstunden auf. ► **Abb. 69** veranschaulicht vergleichend die Oberflächentemperaturverläufe der KD-Konstruktionen Beton und Holz gegenüber der Referenzkonstruktion. Bei der Holzkonstruktion ist die Tragebene nicht aus Stahlbeton ausgeführt, sondern besteht aus Holzträgern mit einer Zwischendämmung, die U-Werte sind vergleichbar. Die Außenoberflächen beider Konstruktionen unterliegen über den Tag starken Temperaturschwankungen von ca. 23 K. Diese sind auf die solaren Einstrahlungen am Tag in Verbindung mit einer horizontalen Flächenausrichtung zurückzuführen. Die KD-Betonkonstruktion zeigt tagsüber innenseitig eine um 0,5 K niedrigere Maximaltemperatur als die Referenzkonstruktion. Die Innenoberflächentemperaturen der KD-Holzkonstruktion sind dagegen tagsüber um ca. 2 K erhöht. Dies ist auf die höhere wirksame Speicherfähigkeit der Betonkonstruktionen WD und KD zurückzuführen. Daraus folgen auch Erhöhungen um 8 % der Übertemperaturgradstunden beim KD-Holz. Somit fällt die Erhöhung geringer aus als bei der WD-Holzkonstruktion.

### Starkregen und Schlagregen

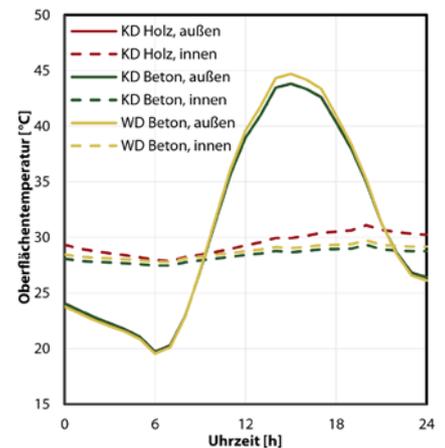
Für Maßnahmen an Flachdächern mit konventioneller Kiesschüttung vgl. Starkregen und Schlagregen ► **Kap. 9.2.1.** Flachdächer mit konventioneller Kiesschüttung tragen mit einem mittleren Abflussbeiwert (► **Infobox**) von 0,8 nur geringfügig zur Wasserrückhaltung im Starkregenfall bei.

### Hagel und Sturm

Für Maßnahmen an Flachdächern mit konventioneller Kiesschüttung vgl. Hagel und Sturm ► **Kap. 9.2.1.** Generell sind zweischalige belüftete Dachkonstruktionen gegenüber Hagelschäden unempfindlicher, aber gegenüber Sturmeinwirkungen zusätzlich zu sichern.

### Sanierung und Erweiterung

Das Kaltdach eignet sich als (energetische) Sanierungsvariante oder Alternative für Warmdächer (Voraussetzung: gleiche Dämmqualität). Generell ist bei Kaltdächern ein ausreichendes Strömungsgefälle der Hinterlüftungsebene zu beachten. Dabei sind geeignete Zu- und Abluftöffnungen, auch in Bezug auf die Windlasten, zu bemessen. Bei gleicher Dämmqualität bietet das Kaltdach beim sommerlichen Wärmeschutz durch die Hinterlüftungsebene einen Vorteil.



**Abb. 69** Oberflächentemperaturverläufe außenseitig sowie innenseitig der Referenz- und Kaltdachflächen.

## Technische Regelwerke

### Wärmeschutz

Gebäudeenergiegesetz GEG

DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2

DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden

### Feuchteschutz

DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3

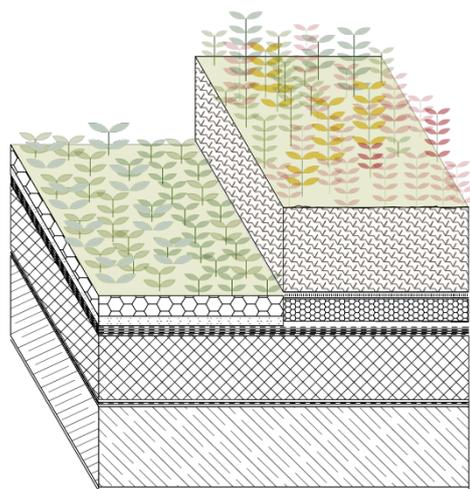
### Starkregen und Sturm

DIN EN 12056-3 Schwerkraftentwässerungsanlagen innerhalb von Gebäuden – Teil 3

Fachregel für Abdichtungen – Flachdachrichtlinie

Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten

### 9.2.3 Gründach extensiv und intensiv



Schichtart	d [cm]
Begrünung	variabel
Pflanzensubstrat	variabel
Abdichtung & Schutzvlies	0,4
XPS-Dämmung 035	16
Dampfsperre	0,1
Stahlbeton C35/45	20
Gipsputz	1,5
U-Wert [W/(m²K)]	0,19
flächenbezogene Masse [kg/m²]	608
wirks. Speicherkapazität [Wh/(m²K)]	51

Abb. 70 Schnittansicht – Gründach extensiv und intensiv.

#### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Wetterelemente mit relevantem Schadenspotenzial für das horizontale Bauteil sind Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung sowie Starkregen, Hagel und Sturm. Auswirkungen infolge hoher Lufttemperaturen und Sonneneinstrahlungen führen zu einem erhöhten Energieeintrag in das Bauteil und somit in das Gebäude. Es kann dadurch zu einer sommerlichen Überhitzung des Gebäudes kommen. Potenzielle Schadensbilder infolge Starkregen, Hagel und Sturm treten bei den Pflanzen auf. Durch Starkregen (ohne Retentionsraum) gelangt das Wasser ohne zeitliche Verzögerung auf die Grundstücksfläche und kann zu Überflutungsereignissen beitragen (► Abb. 71).

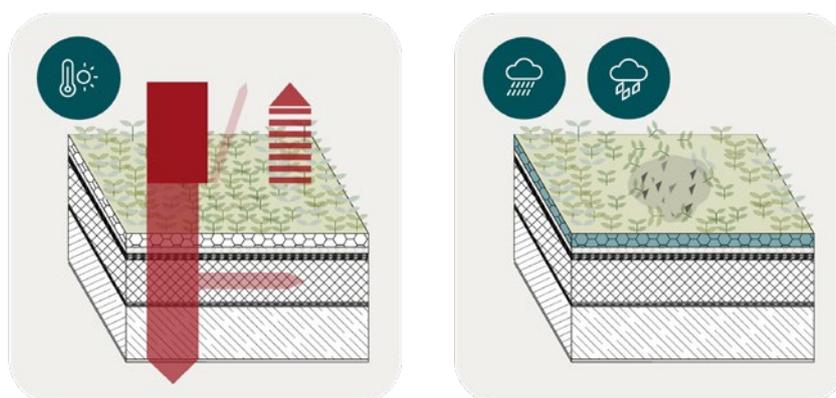


Abb. 71 Auswirkungen der Wetterelemente auf das extensive Gründach. Links: Hitzeeintrag in das Bauteil. Rechts: Überflutung der Dachfläche infolge Starkregen. Beschädigungen der Bepflanzung infolge Hagel.

### Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung

Das extensive Gründach (GD ext) in Warmdachausführung weist aufgrund der Verschattung und des Verdunstungspotenzials der Begrünung gegenüber dem Referenzzustand ca. 8 % weniger Übertemperaturgradstunden auf. ► **Abb. 72** veranschaulicht vergleichend die Oberflächentemperaturverläufe der Dachkonstruktionen. Die Außenoberflächen beider Konstruktionen unterliegen über den Tag starken Temperaturschwankungen, wobei die des Gründachs mit ca. 18 K deutlich geringer ausfällt. Die Gründachkonstruktion zeigt tagsüber einen um 6 K niedrigeren Maximaltemperaturwert an der Außenoberfläche. Die Innenoberflächentemperaturen fallen dagegen ähnlich aus. Dies ist auf die gleiche wirksame Speicherfähigkeit der Betonkonstruktion zurückzuführen. Intensive Dachbegrünungen erhöhen durch eine dichtere und höhere Bepflanzung sowohl die Verschattung als auch die Verdunstungsleistung und verringern dadurch weiter den Hitzeeintrag in die Umgebung des Gebäudes und in das Gebäude selbst.

### Starkregen und Schlagregen

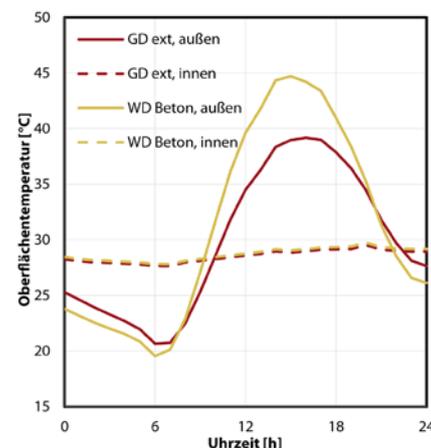
Die Niederschlagabführung beruht bei Gründächern auf den Grundsätzen der Flachdächer. Die Dimensionierung der innen liegenden Abflüsse in Form von Drän- und Wasserspeichersystemen sowie des Notüberlaufs sind auf die Art der Dachbegrünung und ihr Retentionspotenzial durch das Substrat abzustimmen. Das maximale Retentionsvolumen ist an die Statik anzupassen. Extensive Gründächer tragen mit einem mittleren Abflussbeiwert (► **Infobox Kap. 9.2.2**) von 0,3 erheblich zur Wasserrückhaltung im Starkregenfall bei. Intensive Gründächer erreichen Werte von 0,1. Zusätzlich sind Gründächer zu Retentionsdächern erweiterbar. Diese beinhalten neben der Wasserspeicherung im Substrat die Möglichkeit, Wasser in technischen Systemen, wie im Dachaufbau integrierten Retentionsboxen, zu sammeln und für die Bewässerung (und somit Verdunstungskühlung) zu verwenden. Weiterführend ist die Speicherung von Niederschlagswasser in das Gesamtgebäudekonzept einzubeziehen und mit weiteren Maßnahmen am Gebäude oder der Liegenschaft abzustimmen (► **Kap. 8** und **Kap. 10**).

### Hagel und Sturm

Gegenüber Hagel und Sturmereignissen sind Pflanzen je nach Exponiertheit sehr anfällig, vgl. Hinweise ► **Kap. 8.2.1** und ► **Kap. 9.1.7**.

### Sanierung und Erweiterung

Die verschiedenen Gründachvarianten (extensiv, intensiv, Retentionsdach) eignen sich unter bestimmten Voraussetzungen auch nachträglich als Sanierungsvariante. Ab 10° Dachneigung sind Sicherungsmaßnahmen gegen das Abrutschen des Gründachaufbaus zu ergreifen. Zunächst sind die statischen Handlungsbereiche sowie die gewünschten Anforderungen zu vergleichen und aufeinander abzustimmen. Im zweiten Schritt sind die Anforderungen zu priorisieren. Für eine Erhöhung der ökologischen Wertigkeit sind intensive Dachbegrünungssysteme oder Landschafts- bzw. Gartendächer zu wählen. Für ein verbessertes Retentionsverhalten sind Retentionsdächer in verschiedenen Varianten möglich. Zusätzlich bietet sich bei extensiv begrünten Dächern die Möglichkeit einer Solardachnutzung an. Dabei wird das Gründach mit Photovoltaikmodulen kombiniert. Die kühlere Dachoberfläche im Vergleich zu konventionellen Dächern steigert die Effizienz der PV-Anlage. Gleichzeitig können das Wassermanagement und die ökologische Wertigkeit von Gründächern verbessert werden. Hierbei sind in der Planung allerdings die hygrothermischen Wechselwirkungen zu beachten.



**Abb. 72** Oberflächentemperaturverläufe außenseitig sowie innenseitig der Referenz- und Gründachfläche.

## Technische Regelwerke

### Wärmeschutz

Gebäudeenergiegesetz GEG

DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2

DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden

### Feuchteschutz

DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3

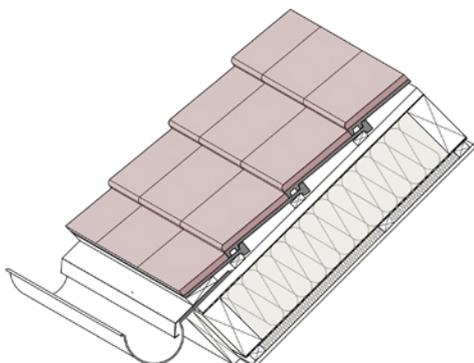
### Starkregen und Sturm

Dachbegrünungsrichtlinien – Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltungen von Dachbegrünungen

Fachregel für Abdichtungen – Flachdachrichtlinie

Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4; Allgemeine Einwirkungen - Windlasten

## 9.2.4 Satteldach

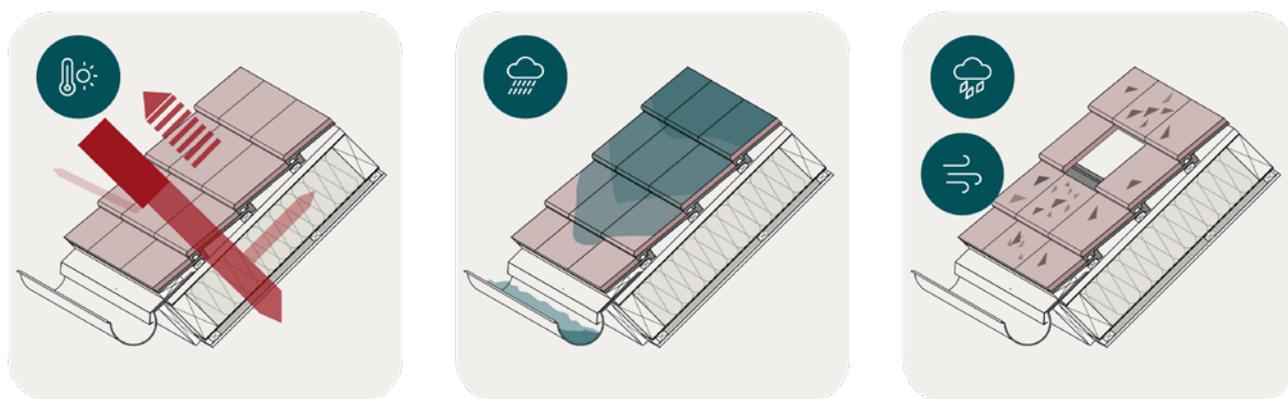


Schichtart	d [cm]
Belgischer Ziegel	1
Lattung	2
Hinterlüftung	3
Dachbahn	0,2
Lattung	2
Mineralfaser 040	18
PE-Folie	0,1
Sperrholzplatte	1,2
Gipsputz	1,5
U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,19
flächenbezogene Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	92
wirks. Speicherkapazität [Wh/(m <sup>2</sup> K)]	8

**Abb. 73** Schnittansicht – Satteldach.

### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Wetterelemente mit relevantem Schadenspotenzial für die schrägen Bauteile sind Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung sowie Starkregen, Schlagregen, Hagel und Sturm. Auswirkungen infolge hoher Lufttemperaturen und Sonneneinstrahlungen führen zu einem erhöhten Energieeintrag in das Bauteil und somit in das Gebäude. Es kann dadurch zu einer sommerlichen Überhitzung des Gebäudes kommen. Potenzielle Schadensbilder infolge von Sturm und Hagel treten auf der Dachfläche auf. Durch Starkregen und fehlende Retentionsmöglichkeiten gelangt das Wasser ohne zeitliche Verzögerung auf die Grundstücksfläche und kann zu Überflutungsereignissen beitragen (► **Abb. 74**).



**Abb. 74** Auswirkungen der Wetterelemente auf das Satteldach. Links: Hitzeeintrag in das Bauteil. Mitte: Überflutung der Dachrinne infolge Starkregen. Rechts: Beschädigungen der Ziegel infolge Hagel.

### Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung

Das Satteldach (SD) mit roten Dachziegeln weist gegenüber dem Referenzzustand ca. 71 % mehr Übertemperaturgradstunden auf. Dunkle Ziegel führen zu 84 % Erhöhung, wohingegen bei der Verwendung von hellen Dachziegeln nur ca. 57 % mehr Übertemperaturgradstunden anfallen. Diese deutlichen Erhöhungen entstehen aufgrund der fehlenden Speichermasse und der westlichen Ausrichtung mit 29° Neigung sowie der Verwendung von Dachfenstern in der schrägen Dachebene. Die schrägen Dachfenster bieten einen deutlich höheren Solareintrag in den Innenraum, zudem erreicht die Westseite mit 29° Neigung eine höhere Einstrahlung über den Tagesverlauf als das Flachdach. ► **Abb. 75** veranschaulicht vergleichend die Oberflächentemperaturverläufe der Satteldachvarianten mit unterschiedlichen Ziegelfarben gegenüber der Referenzkonstruktion. Bei der Verwendung von dunklen Dachziegeln unterliegen die Außenoberflächen der Satteldachkonstruktionen über den Tag starken Temperaturschwankungen von maximal ca. 40 K. Innenseitig zeigen sich tagsüber deutliche Unterschiede im Vergleich zur Referenz. Eine um 3 K erhöhte Maximaltemperatur am frühen Abend ist auf die zuvor genannten Gründe zurückzuführen. In der Nacht kühlen alle 4 Konstruktionen innen- sowie außenseitig ähnlich stark aus. Siehe ► **Kap. 9.1.9** und ► **Kap. 9.1.8** zu Solareintrag transparenter Flächen.

### Starkregen und Schlagregen

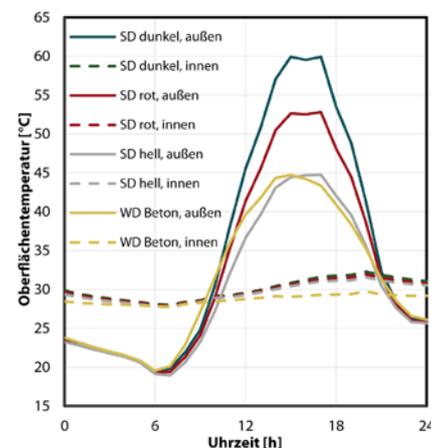
Die (Stark-)Niederschlagabführung bei Schrägdächern wird über die Dachdeckung sowie Dachrinnen und Fallrohre realisiert. Schrägdächer mit konventioneller Ziegeldeckung tragen mit einem mittleren Abflussbeiwert (► **Infobox**) von 0,8 nur geringfügig zur Wasserrückhaltung im Starkregenfall bei. Dabei ist auf die sachgemäße Ausführung und Reinigung der Dachrinnen und Fallrohre zu achten. Verstopfte Rinnen und Fallrohre führen zu einem Überlauf. Somit kann strömendes Wasser über die Hauswand in feuchtesensible Bereiche der Fassade gelangen.

### Hagel und Sturm

Zur Vorbeugung gegen Hagelschäden sind Dachdeckungen mit einem hohen Hagelwiderstand zu wählen. Zudem sind die Rinnensysteme etc. mit Metallblechen auszustatten, um bei starkem Hagel einen Durchschlag zu verhindern. Gegenüber Sturmereignissen sind die Dachdeckungen je nach erwarteter Intensität und Exposition mit Sturmklammern zu befestigen. Zusätzlich sollte die Dachfläche regelmäßig auf Fehlstellen überprüft werden. Einzelne fehlende Ziegel können den Widerstand der Gesamteindeckung erheblich schwächen. Schutzmaßnahmen gegenüber der Verglasung und den Sonnenschutzsystemen von Dachfenstern vgl. Hagel und Sturm (► **Kap. 9.1.9**, ► **Kap. 9.1.8**).

### Sanierung und Erweiterung

Im Zuge einer (energetischen) Sanierung sind die zuvor genannten Maßnahmen und Prinzipien zu beachten. Für den Einbau einer zusätzlichen Zwischensparren- oder Untersparrendämmung muss das Dach nicht neu gedeckt werden. Falls die Dachdeckung ausgewechselt werden soll, ist die Anbringung einer Aufsparrendämmung sinnvoll. Die zusätzliche Anbringung von Photovoltaik-Modulen (PV) ist je nach Dachflächenausrichtung abzuwägen. Hierbei ist eine sturmsichere Befestigung auszuführen.



**Abb. 75** Oberflächentemperaturverläufe außenseitig sowie innenseitig der Referenz- und Satteldachflächen in Abhängigkeit der Ziegelfarbe.

## Technische Regelwerke

### Wärmeschutz

Gebäudeenergiegesetz GEG

DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2

DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden

### Feuchteschutz

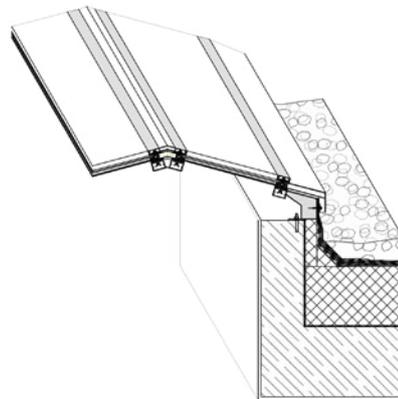
DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3

### Starkregen und Sturm

Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten

Merksblatt zur Bemessung von Entwässerungen (ZVDH)

## 9.2.5 Oberlichter und Lichtkuppeln



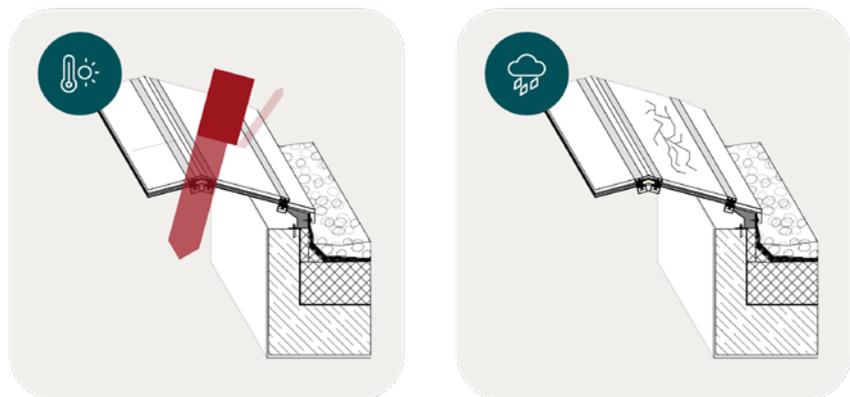
Schichtart	d [cm]
2-Scheiben-Isolierverglasung mit Aluminiumprofilrahmen	3

U-Wert (montiert) [W/(m <sup>2</sup> K)]	1,3
F <sub>c</sub> -Wert (ab 300 W/m <sup>2</sup> ) [-]	0,25
g-Wert [-]	0,6

**Abb. 76** Schnittansicht – Dachoberlicht.

### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Wetterelemente mit relevantem Schadenspotenzial für das Bauteil sind Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung sowie Hagel. Transparente Flächen tragen in hohem Maße zum solaren Energieeintrag in das Gebäude bei. Daher führen die Auswirkungen durch hohe Lufttemperaturen und vor allem durch ungeminderte Sonneneinstrahlungen ohne (oder mit beschädigten) Sonnenschutzmaßnahmen zu einer erhöhten sommerlichen Hitzelast. Potenzielle Schadensbilder infolge von Sturm und Hagel ziehen bei Dachoberlichtern und Lichtkuppeln meist große Folgeschäden nach sich (► **Abb. 77**).



**Abb. 77** Auswirkungen der Wetterelemente auf die Oberlichter und Lichtkuppeln. Links: Hitzeeintrag in das Bauteil. Rechts: Schäden an den Dachaufbauten infolge Hagel.

## Infobox

### Flachdachöffnungen

Flachdachöffnungen vereinen drei Funktionen: zum Ersten eine effektive Tageslichtversorgung, zum Zweiten eine effiziente Belüftungsmöglichkeit und zuletzt sind je nach Systemausführung der Rauch- und der Wärmeabzug möglich. Durch Flachdachöffnungen kann im Vergleich zu Fassadenöffnungen die dreifache Tageslichtversorgung realisiert werden. Mögliche Ausführungsvarianten sind Flachdachfenster, Glasdächer, Glaspyramiden, Lichtkuppeln sowie Tageslichtspots.

### Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung

Die auf Dachoberlichtern anfallende Solarstrahlung sowie die solaren Gewinne sind höher als bei vertikalen Flächen. Beim Einsatz von Oberlichtern und Glasdächern sind die Auswirkungen auf den sommerlichen Wärmeschutz zu beachten. ► **Abb. 78** veranschaulicht die Strahlungsenergieverläufe und solaren Gewinne der westorientierten Referenzverglasung sowie eines Oberlichts mit einem g-Wert von 0,6 und einer Sonnenschutzvorrichtung ( $F_c$  0,25), die ab einer Einstrahlung von  $300 \text{ W/m}^2$  aktiviert wird. Aus der höheren eintreffenden Solarstrahlung resultieren höhere solare Gewinne im Innenraum. Beim Dachoberlicht ist die Aktivierung morgens und Deaktivierung abends des Sonnenschutzes klar zu erkennen. Trotzdem weist der Raum mit integriertem Oberlicht gegenüber dem Referenzraum 28 % mehr Übertemperaturgradstunden auf. Bei Dachoberlichtern ist generell die Verwendung von Verglasungen mit sehr niedrigen g-Werten sowie eines geeigneten Sonnenschutzes zu empfehlen, vgl. ► **Kap. 9.1.8** und ► **Kap. 9.1.9**.

### Starkregen und Schlagregen

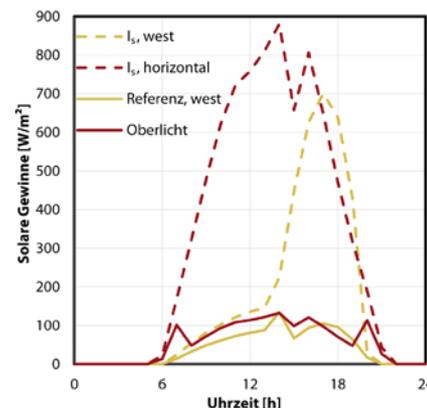
Für alle Öffnungen im Flachdach sind die Richtlinien und Hinweise in ► **Kap. 9.2.1** zu beachten. Insbesondere für die Anschlussdetails ist eine fachgerechte Ausführung unabdingbar. Stehendes Wasser an den Anschlussstellen ist zu vermeiden sowie gezielt abzuführen.

### Hagel und Sturm

Dachoberlichter und Lichtkuppeln sind aufgrund ihrer exponierten Lage die gegenüber Hagel gefährdetsten Bauteile. Hierbei ist sowohl für die transparenten Flächen als auch für die Verkleidung auf die Verwendung von Materialien mit einem hohen Hagelwiderstand zu achten. In besonders gefährdeten Regionen ist die Verwendung von Hagelnetzen oberhalb der Oberlichter und Lichtkuppeln in Erwägung zu ziehen. Dabei ist die Erhaltung der Funktionsfähigkeit für den Öffnungsfall (Lüftung, Wartung, Rauch- und Wärmeabzug) zu gewährleisten. Eventuell außen liegend angebrachte Sonnenschutzsysteme sind anhand der Ausführungen in ► **Kap. 9.1.9** umzusetzen.

### Ausführung

Für die Erweiterung von Bestandsdächern zu Gründächern (Intensivbegrünung, Retentionsdach, Gartendach) oder Solardächern sind die genannten Funktionen der Flachdachöffnungen in vollem Umfang zu erhalten. Auswirkungen durch Verschattungen infolge von Dachaufbauten sind vorab energetisch und lichttechnisch zu validieren. Für die Verwendung von Flachdachfenstern oder Glasdächern sind die Hinweise aus ► **Kap. 9.1.8** und ► **Kap. 9.1.9** zu beachten.



**Abb. 78** Solarstrahlung ( $I_s$ ) außen und solare Gewinne in Abhängigkeit der Zeit. Die Solarstrahlung außen west und die Solarstrahlung horizontal stellen die auf die vertikale bzw. horizontale Außenoberfläche auftreffende Sonneinstrahlung dar. Die anderen Verläufe zeigen den solaren Energieeintrag in den Innenraum durch ein west- bzw. horizontal orientiertes Fenster.

## Technische Regelwerke

### Wärmeschutz

Gebäudeenergiegesetz GEG

DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2

DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden

### Feuchteschutz

DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3

### Tageslicht

DIN 5034-1 Tageslicht in Innenräumen

### Dachaufbauten

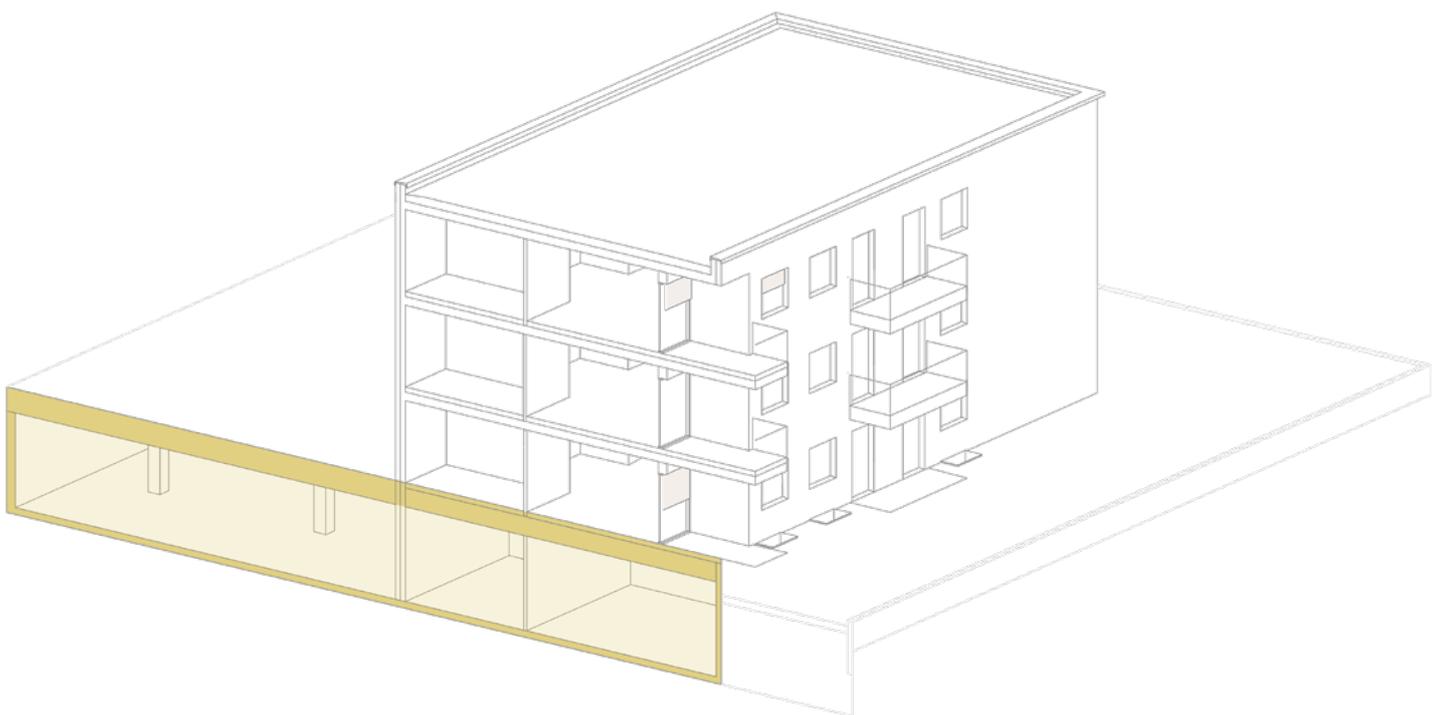
DIN EN 1873-1 Vorgefertigte Zubehörteile für Dacheindeckungen – Teil 1

Fachregel für Abdichtungen – Flachdachrichtlinie

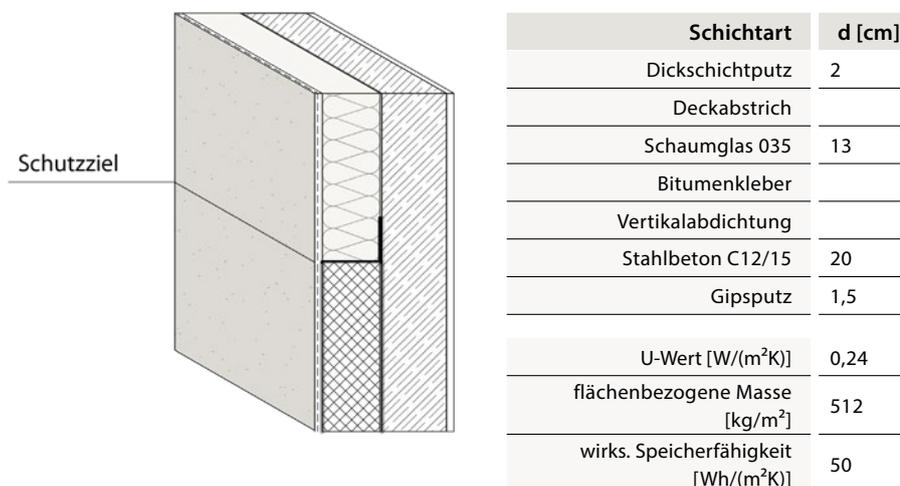


## 9.3 Flutgefährdeter Bereich und erdberührte Bauteile

Außenwände flutgefährdeter Bereich  
Gründung, weiße Wanne  
Gebäudeöffnungen erdberührter Bauteile



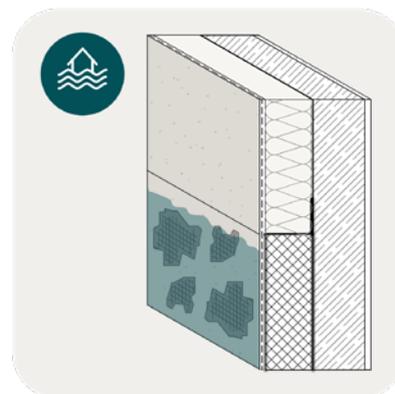
### 9.3.1 Außenwände flutgefährdeter Bereich



**Abb. 79** Schnittansicht – Wärmedämmverbundsystem (WDVS).

#### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Vertikale Bauteile im flutgefährdeten Bereich sind den Auswirkungen von Überflutungen ohne weiteres Schutzelement ausgesetzt. Durch hydrostatischen Druck können Schäden an der Tragstruktur entstehen. Die sehr hohe hygrische Belastung führt zu Baustoff- und/oder Bauteilschäden (► **Abb. 80**).



**Abb. 80** Auswirkungen der Überflutung auf das Wärmedämmverbundsystem. Bauteilschäden infolge hoher hygrischer Belastung.

### Konstruktive Maßnahmen

Zunächst ist das Schutzziel (► **Infobox**) anhand der zu erwartenden Überflutungsrisiken zu definieren. Oberhalb des Schutzziels können Wandkonstruktionen ohne gesonderte Anforderungen an Überflutung ausgebildet werden. Die Konstruktionen (oberhalb sowie unterhalb des Schutzziels) sind mittels Putzprofilen, Bauteilfugen, Gleitlagerprofilen und/oder Tropfblechen zu trennen. Generell sind in gefährdeten Gebieten Baustoffe und -konstruktionen zu wählen, die eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber hygri-schen Einwirkungen besitzen. Die Überflutungsdauer bzw. die schnelle Wasserabführung im Ereignisfall ist zu beachten. Die hygri-sche Belastung ist infolge einer höheren Luftfeuchte und der hygroskopischen Wasseraufnahme im Innenraum auch für Bauteile oberhalb des Wasserstands erhöht. Im Allgemeinen sind homogene oder monolithische Wandkonstruktionen aus Baustoffen mit geringen Porenvolumen zu verwenden. Stahlbeton- oder Mauerwerkskonstruktionen erfüllen meist diese Anforderungen. Allerdings sind ihre zusätzlichen Schichten wie Wärmedämmung, Hinterlüftungen und Putzsysteme schadensanfälliger. Bei der Wahl des Dämmstoffes sind die Formstabilität im durchfeuchteten Zustand sowie das Auftriebspotenzial bei hohen Überflutungshöhen zu beachten. Unterhalb des Schutzziels sind Vertikalabdichtungen innerhalb der Putzschicht einzubinden. Somit wird das Eindringen des Wassers in die dahinterliegenden Schichten (Dämmstoff, Tragstruktur) verhindert. Bei hinterlüfteten oder kerngedämmten zweischaligen Baukonstruktionen sind im flutgefährdeten Bereich feuchteunempfindliche Dämmstoffe wie Schaumglas zu wählen. Die vertikale Abdichtung erfolgt in diesen Fällen hinter der Dämmschicht (HTW-Dresden 2020).

### Sanierung

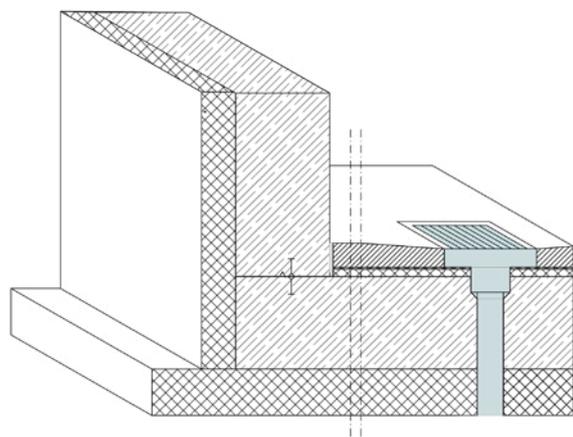
In die Planung der Baukonstruktionen sind die Sanierungsmöglichkeiten nach einem Überflutungsereignis einzubeziehen. So ist die Anordnung der Dämmebene bei ein- oder zweischaligen Konstruktionen entscheidend für den Aufwand und die Dauer der Austrocknung. Kerngedämmte zweischalige Konstruktionen können aufgrund der Zugänglichkeit nur unter großem Aufwand technisch getrocknet werden. Zudem ist die natürliche Trocknung eingeschränkt. Hinterlüftungen und Hohlräume füllen sich im Überflutungsfall schnell mit Wasser und führen zu längeren Austrocknungszeiten aufgrund des höheren Feuchteintrags in das Gesamtbauteil. Auch im Hinblick auf die Trocknung der Tragstruktur (Mauerwerk, Stahlbeton, Porenbeton etc.) sind mehrschalige Konstruktionen rückzubauen. Putzschichten sowie diffusionshemmende Schichten hindern oder mindern den Trocknungsprozess erheblich. Außen oder innen liegende Dämmschichten sind sowohl für die Trocknung als auch ihren Ersatz im Bedarfsfall besser sowie schneller zu erreichen. Für sehr gefährdete Gebiete sind generell Konstruktionen zu empfehlen, die entweder einen sehr hohen Widerstand gegenüber der hygri-schen Einwirkung besitzen oder schnell und kostengünstig saniert werden können. Holzbauweisen sind gegenüber Feuchte besonders sensibel. Die Gefährdung durch Schimmelpilze, Holzschädlinge und Quellverformung kann durch eine geeignete Trocknung gemindert werden. Dabei ist zu bedenken, dass Holzbaustoffe im feuchten Zustand meist nicht formstabil sind und ersetzt werden müssen. Demgegenüber behalten massive Holzträger bei geeigneter Trocknung ihre Form und somit Funktion. Der Trocknungsaufwand ist im Vergleich zu Nichtholzbauteilen deutlich höher. Weiterführend sind die Schäden und Beeinträchtigungen durch die Kontamination des Wassers bei Überflutungsereignissen einzubeziehen (HTW-Dresden 2020).

## Infobox

### Schutzziel

Das Schutzziel beschreibt eine definierte Höhe oberhalb der Geländeoberkante, unterhalb derer das Vorsorgekonzept wirksam ist. Darüber liegen Baukonstruktionen ohne spezielle Vorsorgemaßnahmen gegenüber Überflutungser-eignissen (HTW-Dresden 2020).

### 9.3.2 Weiße Wanne



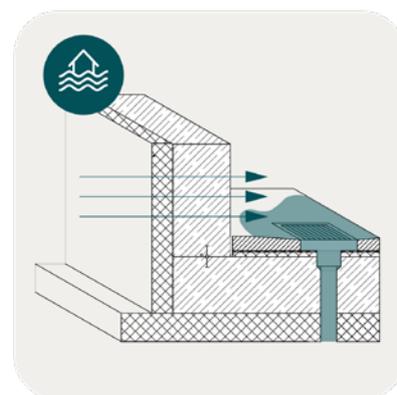
Schichtart	d [cm]
Schaumglasplatten	22
Stahlbeton C30/37	30

U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,17
flächenbezogene Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	665
wirks. Speicherfähigkeit [Wh/(m <sup>2</sup> K)]	52

**Abb. 81** Schnittansicht – Weiße Wanne.

#### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Wetterelemente mit relevantem Schadenspotenzial für das vertikale Bauteil sind Starkregen, in deren Folge durch Kanalisationsrückstau sowie hohen Grundwasserstand Hochwasser auftreten kann. Potenzielle Schadensbilder infolge von Hochwasser treten insbesondere in den Keller- und Innenräumen auf. Eindringenes Wasser kann zu konstruktiven Mängeln sowie Nutzungseinschränkungen führen (► **Abb. 82**).



**Abb. 82** Auswirkungen der Wetterelemente auf die Weiße Wanne. Feuchteintrag infolge Hochwasser.

#### Hoher Grundwasserstand und Kanalisationsrückstau

Erdberührende Bauteile sind gegen einen hohen Grundwasserstand und drückendes Wasser zu schützen. Die Weiße Wanne integriert die Abdichtungsebene innerhalb der Tragschicht und stellt die Dichtigkeit des Bauteils über die Konstruktionsweise sicher. Diese Konstruktion besteht aus Stahlbeton mit einem hohen bis sehr hohen Wasser-eindringwiderstand und benötigt keine zusätzlichen Abdichtungsmaßnahmen.

## Infobox

### Überflutungsereignisse

Nach DIN EN 752 bezeichnet eine Überflutung das ungewollte Austreten von Wasser auf eine Oberfläche oder das Eindringen in ein Gebäude. Überflutungsereignisse werden in drei Erscheinungsformen unterteilt: erstens, die fluvialen Überflutungen mit Gewässerbezug, also Flusshochwasser, zweitens, die pluvialen Überflutungen ohne Gewässerbezug, also starkregenbedingte Überflutungen und Kanalisationsrückstau, und drittens, ein hoher Grundwasserstand. Je nach Überflutungsart sind verschiedene Vorsorgen und Maßnahmen zu ergreifen (HTW-Dresden 2020).

### Überflutungsvorsorge

Die Überflutungsvorsorge beschreibt alle gebäudebezogenen Anpassungsmaßnahmen und kann in zwei Bereiche unterteilt werden: zum einen die Verhinderung des Wassereintritts unterhalb des definierten Schutzziels (Außen- und Kellerwandkonstruktionen sowie Kelleröffnungen sind davon im Besonderen betroffen), zum anderen die Minderung der Wassereintrittsfolgen. Dieser Aspekt ist für die Ausführung von Fußbodenkonstruktionen und Kellerplatten von Bedeutung. Die haustechnischen Anlagen sind gesondert zu berücksichtigen, werden aber in dieser Broschüre nicht adressiert (HTW-Dresden 2020).

Die Funktionsfähigkeit der Abdichtung wird mit der Beschränkung der Rissbreite auf unter 0,2 mm sowie dem Einsatz von geeigneten Fugenabdichtungen gewährleistet. Zudem sind die Mindestwandstärken einzuhalten, damit der erd- bzw. wasserzugewandte Kapillarbereich und der luftzugewandte Austrocknungsbereich nicht einander überschneiden. Dadurch ist die Unterbindung des Flüssigkeitsaustausches zwischen außen und innen gegeben. Nach „DAfStb-Richtlinie - Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“ beträgt die Mindestdicke in der Beanspruchungsklasse 1 für Außenwände 0,24 m und für Bodenplatten 0,25 m. Die zulässige Obergrenze des öffentlichen Kanalnetzes wird als Rückstauenebene bezeichnet. Um Hausanschlüsse unterhalb dieser Rückstauenebene zu schützen, sind Rückstausicherungen zu installieren. Rückstauverschlüsse verhindern das Eindringen von Wasser aus dem Kanalnetz durch ein Klappensystem. Abwasserhebeanlagen bieten einen vergleichsweise höheren Schutz. Das Abwasser wird über ein Pumpensystem über die Rückstauenebene gepumpt, somit ist das Abführen jederzeit möglich und das Eindringen von Wasser aus dem Kanalnetz ausgeschlossen (BBSR 2018b).

### Ausführungsvarianten

Neben Weißen Wannen können als weitere Möglichkeiten der Konstruktionsausführung von erdberührenden Bauteilen Schwarze und Braune Wannen genutzt werden. Schwarze Wannen sind vollumfänglich mit einer Dichtungshaut aus Bitumen oder Kunststoff außenseitig umgeben. Braune Wannen werden erdseitig mit einer Dichtungsbahn aus Bentonit vollflächig umschlossen. Gegenüber der Weißen Wanne ist die Sicherheit gegen das Eindringen von Wasser erhöht. Die Rissbreitenbeschränkung muss nicht eingehalten werden.

## Technische Regelwerke

### Bauwerksabdichtungen

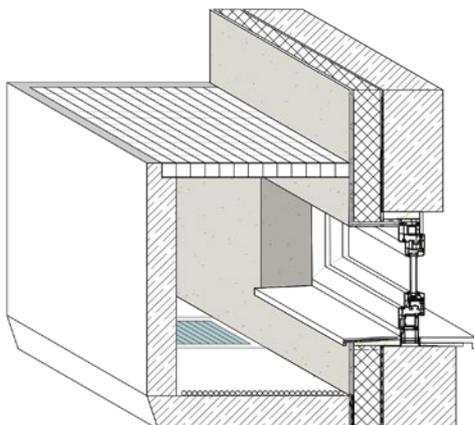
DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2

DIN 18195 Abdichtung von Bauwerken

DIN 18533 – Abdichtung von erdberührenden Bauteilen, Teil 1 bis 3

DAfStb-Richtlinie - Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton

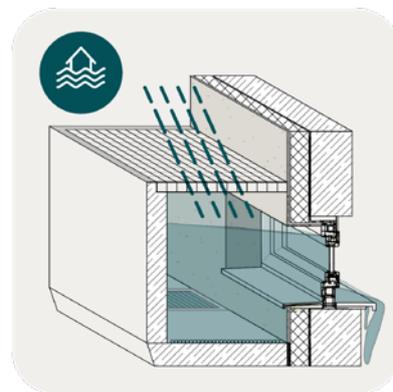
### 9.3.3 Gebäudeöffnungen erdberührter Bauteile



**Abb. 83** Schnittansicht – Lichtschacht inkl. Kellerfenster.

#### Einwirkende Wetterelemente und potenzielle Schadensbilder

Wetterelemente mit relevantem Schadenspotenzial für Gebäudeöffnungen bei erdberührenden Bauteilen, beispielsweise Lichtschächte, sind Starkregen, in deren Folge durch Kanalisationsrückstau und hohem Grundwasserstand Hochwasser sowie Flusshochwasser auftreten können. Potenzielle Schadensbilder infolge Hochwasser treten insbesondere in den dahinterliegenden Kellerräumen auf. Eindringendes Wasser kann zu konstruktiven Mängeln sowie Nutzungseinschränkungen führen (► **Abb. 84**).



**Abb. 84** Auswirkungen der Wetterelemente auf die Gebäudeöffnungen im Keller. Feuchteintrag infolge Hochwasser.

#### Flusshochwasser und starkregenbedingte Überflutungen

Grundsätzlich gilt das Prinzip, Wasser vom Gebäude fernzuhalten. Dies sollte bei der Planung der gebäudenahen Außenbereiche berücksichtigt werden. Bodengleiche, ebene Eingänge sind in überflutungsgefährdeten Regionen (Flusshochwasser und starkregenbedingte Überflutungen) zu vermeiden. Die nötige Barrierefreiheit muss durch Ersatzmaßnahmen gewährleistet werden. Kellertreppen, Lichtschächte und Kellerfenster sind mit Aufkantungen von ca. 15 bis 30 cm zu versehen. Diese Keller-

## Infobox

### Eindringwege des Wassers in Gebäude

Anhand (BBSR 2018b) können sieben Eindringwege von Wasser ins Gebäude identifiziert werden: Eindringen von Grundwasser durch Kellerwände oder Kellerboden, in Kellerwand aufsteigendes Kapillarwasser, Eindringen von Rückstauwasser durch die Kanalisation, Eindringen von Grundwasser durch undichte Fugen oder durch Umläufigkeiten bei Hausanschlüssen (Rohrwege, Kabel, die i. d. R. nicht druckwasserdicht in das Mauerwerk eingebettet sind), Wassereintritt über undichte Rohrdurchführungen (Strom, Gas, Öl, Abwasser), Eindringen von Oberflächenwasser durch Tür-/Fensteröffnungen (Erdgeschoss und Keller) und Lichtschächte sowie in Dachrinnen und Fallrohren überlaufendes Wasser, das entlang der Fassade in feuchtesensible Bereiche und Gebäudeöffnungen gelangt.

### Ausweichen, Widerstehen, Anpassen

Die Vorsorge- und Anpassungsmaßnahmen orientieren sich an drei Leitprinzipien. Ausweichen beschreibt alle Maßnahmen, um das Wasser vom Gebäude fernzuhalten. Hierzu gehören beispielsweise die erhöhte Anordnung von Gebäudeteilen und mobile sowie permanente Barriersysteme. Widerstehen umfasst alle Maßnahmen, die den Wassereintritt bis zum Schutzziel verhindern. Hierzu zählt die wasserdichte Ausführung von Gebäudehüllen. Anpassen legt den planmäßigen Wassereintritt in das Gebäude und die dazu nötigen Maßnahmen dar. Dazu zählen die Verwendung wenig schadensanfälliger Schichtenfolgen bei Bauteilkonstruktionen sowie die Anpassung von Bau- und Haustechnik (HTW-Dresden 2020).

öffnungen sind mit Abläufen inkl. Anschluss an das außen liegende Drainage- oder Entwässerungssystem auszustatten. Kellerfenster und -türen sind wasser- und druckdicht auszuführen. Automatische Systeme sind aufgrund der Reaktionszeit manuellen Systemen vorzuziehen. Ist der konstruktive Schutz nicht ausreichend umsetzbar, sind auf dem Grundstück oder an der Gebäudehülle verschiedene mobile Schutzmaßnahmen möglich. Dammbalkensysteme können Tiefgarageneinfahrt, Kellertüren, Kellerfenster und Hauseingänge bis zu einem definierten Schutzziel sichern. Sandsäcke eignen sich nur für geringe Wasserstände bis ca. 20 cm. Durch dezentrales Vorhalten von Sandsäcken können im Starkregenfall infolge der kurzen Reaktionszeit größere Schäden verhindert werden. Generell sind die Überflutungsereignisse Flusshochwasser und starkregenbedingte Überflutungen anhand ihrer Reaktionszeit zu unterteilen und die nötigen Maßnahmen übergeordnet anhand des Schadenspotenzials zu wählen (BBSR 2018b).

### Minimierung des Schadenspotenzials

In flutgefährdeten Gebieten kann das Eindringen von Wasser oftmals nicht vollumfänglich ausgeschlossen werden. In den gefährdeten Keller- bzw. Innenräumen ist die Anlagentechnik (Elektroverteiler, Heizungen, Tanks etc.) überflutungssicher anzubringen oder in höher gelegene Räume zu verlegen. Zudem sind die Bauteile in diesen Räumen mit wasser-/feuchteunempfindlichen Konstruktionen und Baustoffen zu planen. Auch das Inventar sollte dem Schadenspotenzial angepasst werden. Kellerräume sind mit geeigneten Abflusssystemen auszustatten, um das Wasser im Bedarfsfall schnellstmöglich abführen zu können (BBSR 2018b; HTW-Dresden 2020).

## Technische Regelwerke

### Entwässerung

DIN 1986-100 Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke – Teil 100

DIN EN 12056 Schwerkraftentwässerungsanlagen innerhalb von Gebäuden

DIN EN 752 Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden

DIN 4095 Baugrund – Dränung zum Schutz baulicher Anlagen – Planung, Bemessung und Ausführung

# 10 Handlungsempfehlungen

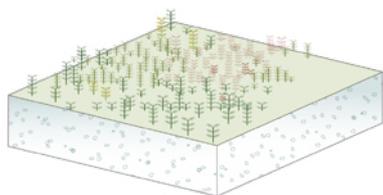
Die zusammenfassenden Handlungsempfehlungen greifen die zuvor erläuterten Maßnahmen zur Anpassung einer Liegenschaft und eines Gebäudes an die Folgen des anthropogenen Klimawandels auf. Das ► Poster im Anhang stellt diese Maßnahmen visuell dar. Die Vulnerabilität hinsichtlich eines Risikos ist regional stark unterschiedlich, entsprechend vielfältig sind die Möglichkeiten zum Schutz vor Hitze, Schlagregen und Starkregen, Flusshochwasser sowie Hagel und Sturm. Jedes Gebäude und jede Situation ist einzigartig. Daher ist eine darauf abgestimmte Planung der Klimaanpassungsmaßnahmen essenziell, auch hinsichtlich ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten sowie weiterer Aspekte wie einer nachhaltigen und energieeffizienten Bauweise.

## 10.1 Anpassung an Hitze und Strahlung

Die Vulnerabilität für sommerliche Überhitzung ist deutschlandweit nicht nur sehr unterschiedlich ausgeprägt, sondern zusätzlich von der Höhenlage abhängig. Auch das bauliche Umfeld spielt eine Rolle. Von einer allgemeinen signifikanten Steigerung dieses Risikos ist flächendeckend auszugehen (► Kap. 5.4). Nachfolgend werden die Handlungsempfehlungen zur Klimaanpassung an Sommerhitze, ausgehend vom Außenraum eines Gebäudes bis hin zu seiner Bauteilebene, zusammenfassend dargestellt. Eine mangelnde Berücksichtigung baulicher Maßnahmen wird oft durch energieintensive Anlagentechnik (beispielsweise Klimaanlagen) kompensiert. Dies ist, wo möglich, zu vermeiden und steht somit dem Klimaschutz im Sinne der Energieeinsparung entgegen.

### Standort und Außenraum

Das Umfeld einer Immobilie hat über ihre geografische Lage hinaus einen großen Einfluss auf das Hitzerrisiko. Eng besiedelte städtische Räume zeigen tagsüber signifikant höhere Temperaturen als ländliche Regionen, nachts ist die Auskühlung geringer (► Kap. 5.2). Ein Standort außerhalb dichter urbaner Strukturen, eventuell sogar in der Nähe von fließenden Gewässern, verringert die Anfälligkeit der sommerlichen Überhitzung. Bei der Standortwahl sind zusätzlich weitere Risiken zu analysieren (► Kap. 10.2, ► Kap. 10.3).



Die Möglichkeiten der Einflussnahme im Außenraum setzen in der Regel an der eigenen Grundstücksgrenze an. Die weitgehende Entsiegelung der Oberflächen mit gleichzeitiger Schaffung grüner (beispielsweise Wiesen oder Beete) sowie blauer (beispielsweise Teiche) Infrastrukturen schafft nicht nur eine höhere Aufenthaltsqualität im Freien, sie trägt durch latente Kühlungseffekte auch zur Temperaturreduzierung und Erhöhung der Lebensraumqualität bei. Wo eine Versiegelung von Flächen nicht vermeidbar ist, sind helle Oberflächen zu wählen. Diese erwärmen sich durch eine höhere Albedo an strahlungsreichen Sommertagen tagsüber weniger, somit ist auch das nächtliche Kühlpotenzial positiver zu bewerten (► Kap. 6.2). Anpassungsmaßnahmen an Stark- und Schlagregen (► Kap. 10.2) sind bei Bedarf zu berücksichtigen.

Hochwachsende grüne Strukturen (Sträucher, Hecken, Bäume) tragen über drei Wirkmechanismen zur Anpassung an die sommerliche Hitze bei. Neben den oben erwähnten latenten Kühlungseffekten durch Verdunstung speichern sie weniger Wärme als versiegelte Flächen oder Gebäude und beeinflussen hauptsächlich durch Verschattung den Strahlungshaushalt positiv. Verschattete Gebäudeteile sind weniger anfällig für Überhitzung, die Temperaturen der dahinterliegenden Innenräume im Sommer sind geringer. Gleichzeitig werden bei einheimischen Laubbäumen durch das Abwerfen des Blattwerks erwünschte solare Gewinne im Winter ermöglicht sowie ein Beitrag zur Erhöhung der Artenvielfalt in bebauten Räumen erreicht. Die Vulnerabilität der Bäume für Hagel und Sturm (► Kap. 8.2.1) ist zu beachten.



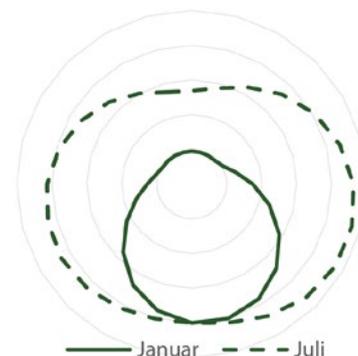
### Gebäude und Innenraum

Durch gezielte Entwurfsentscheidungen der Raumgeometrie und der Orientierung können Innenräume an Klimawandelauswirkungen bezüglich der sommerlichen Überhitzung angepasst werden. Hier beschriebene Maßnahmen lassen sich meist bei Neubauvorhaben, in geringem Umfang bzw. mit höherem Aufwand bei Erweiterungen, Sanierungen und Umnutzungen umsetzen.

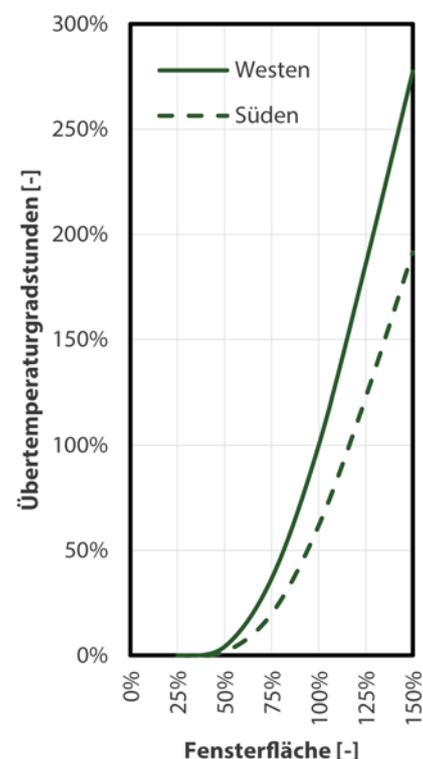
Das Verhältnis der thermischen **Hüllfläche** zum **Raumvolumen** ist ein relevanter Faktor für das thermische Verhalten eines Raumes. Ein geringes Verhältnis von Hüllfläche zum Innenraum minimiert seine Auskühlung im Winter und Aufheizung im Sommer gleichermaßen, vor allem in Verbindung mit Wärmedämmung und Wärmespeicherung (► Kap. 6.2). Kompakte Gebäude tragen daher sowohl zum Klimaschutz durch Energieeinsparung als auch zur Klimaanpassung an sommerliche Hitze bei.

Einen erheblichen Einfluss auf den Temperatureintrag in einen Raum haben die Fensterflächen. Die einfallende solare Strahlung ist über den Tag verteilt stark richtungsabhängig (► Kap. 5.1.2), die **Fensterorientierung** beeinflusst daher die thermischen Bedingungen im Raum. ► Abb. 85 zeigt die summierte Solarstrahlung des Referenzraums in Abhängigkeit der Orientierung in Prozent für die Monate Januar und Juni, ausgehend vom Wert der nach Süden orientierten Fassade des jeweiligen Monats. Es zeigt sich, dass an hiesigen Standorten nach Westen und Osten orientierte Räume die höchste Strahlungsexposition im Sommermonat Juni aufweisen. Durch die in den frühen Morgen- und späten Abendstunden tief stehende Sonne sind sie anhand der sehr hohen solaren Energieeinträge besonders vulnerabel für sommerliche Überhitzung. Dagegen sind die meist erwünschten Wärmegewinne im Winter, hier exemplarisch für den Monat Januar dargestellt, gering. Südfassaden weisen im Winter die höchsten Gewinne auf und sind im Sommer geringer belastet als Ost- und Westausrichtungen.

Neben der Orientierung sind die **Fenstergrößen** ein maßgeblicher Faktor für den solaren Energieeintrag. ► Abb. 86 zeigt die Übertemperaturgradstunden des Referenzraums bei Änderung der Fenstergrößen. Bereits eine Verringerung der Fensterflächen des Raumes um ein Viertel sorgt für eine Reduktion der Übertemperaturgradstunden des nach Westen orientierten Raums um mehr als die Hälfte auf 37 %. Bei einer Vergrößerung um dieselbe Größenordnung werden die Übertemperaturgradstunden um 87 % erhöht. Die Werte für die nach Osten ausgerichtete Fassade sind in Relation zur Westorientierung vergleichbar. Deutlich weniger Überhitzung zeigt die südorientierte Fassade. Obwohl sich große Fensterflächen hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes als nachteilig erweisen, können sie aus energetischen Gründen durch Reduk-



**Abb. 85** Monatlich summierte Solarstrahlung des Referenzraums in Abhängigkeit der Orientierung in Prozent, bezogen auf die nach Süden orientierte Variante für die Monate Januar und Juni.



**Abb. 86** Übertemperaturgradstunden des Referenzraums in Abhängigkeit der Fensterfläche in Prozent, bezogen auf den nach Westen orientierten Referenzraum in Potsdam.

tion des Heizenergiebedarfs im Winter oder aus funktionalen Gründen notwendig sein. In diesem Fall kann die Art der Verglasung (► Kap. 9.1.8) angepasst und Sonnenschutzvorrichtungen (► Kap. 9.1.9) können vorgesehen werden.

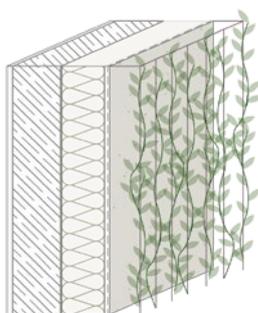
Ein angepasstes **Lüftungsverhalten** kann die Temperaturen im Innenraum auch über einen längeren Zeitraum heißer Tage relativ niedrig halten. Fenster und weitere Lüftungsmöglichkeiten sollten während hoher Temperaturen am Tag geschlossen bleiben, um den Innenraum nicht unnötig zu erhitzen. Während der kühlen Nacht- und frühen Morgenstunden ist eine maximale Durchlüftung der Räume anzustreben. Diese sogenannte Nachtlüftung ist vor allem in Kombination mit einem klimaangepassten Außenraum und einer hohen thermischen Speichermasse im Innenraum (► Kap. 6.2) wirkungsvoll.

### Bauteile

Die zentralen bauphysikalischen Maßnahmen zur Anpassung der opaken Bauteile der thermischen Hüllflächen wie Fassade und Dach an sommerliche Hitze sind ihre **Wärmespeicherung** und ihre **Wärmedämmung** (► Kap. 6.2). Beide tragen durch unterschiedliche Mechanismen und idealerweise in Kombination zu einer Reduzierung hoher Temperaturen im Gebäudeinneren bei Hitzestress bei.

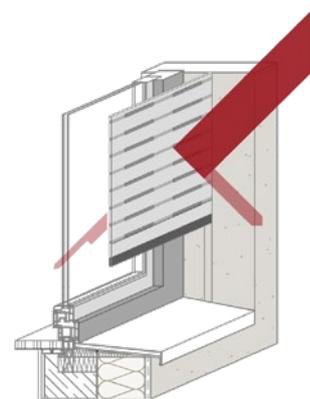
Massive Bauteile wie Ziegel oder Beton besitzen eine hohe **Wärmespeicherfähigkeit**, Dämmungen und weitere leichte Bauteile wie Porenbeton eine niedrige. Eine hohe thermische Speichermasse kann Temperaturspitzen am Tag abmildern, indem sie Wärme speichert und zeitversetzt an den Raum abgibt. Die Wärmeabgabe des Bauteils, also die Abkühlung, geht idealerweise mit der Nachtlüftung einher, um die an die Luft abgegebene Wärme aus dem Innenraum zu führen. Um ihre Wirkung auszunutzen, dürfen die Speichermassen nicht durch Dämmschichten thermisch vom Innenraum entkoppelt sein. Beispielsweise verändern Innenputze die wirksame Speicherkapazität kaum.

Die **Wärmedämmung** im Hüllbauteil minimiert durch ihre geringe Wärmeleitfähigkeit thermische Verluste im Winter und verringert die Erwärmung des Innenraums im Sommer. In Kombination mit einer hohen thermischen Speichermasse sollte die Dämmung außen liegend angeordnet sein. Auch bei einer Leichtbauweise schützt die Dämmung vor einer erhöhten Erwärmung des Innenraums durch das Bauteil.



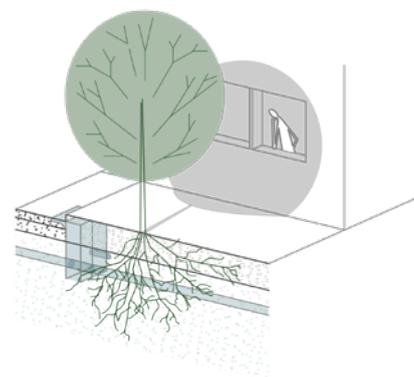
Um die Erhitzung der Bauteile an der Außenoberfläche zu verringern, sind helle Farben zu bevorzugen. Durch den niedrigen Absorptionsgrad der hellen Beschichtung wird das Bauteil deutlich weniger erwärmt. Dies führt wiederum zu einem geringen Energieeintrag in das Gebäudeinnere. Der solare Energieeintrag in opake Bauteile ist, mit Ausnahme des Flachdachs, abhängig von der Ausrichtung (► Kap. 5.1.2). Auch wenn die Auswirkungen des solaren Energieeintrags bei Dächern und Fassaden geringer sind als bei Fenstern, kann eine klimaangepasste Farbgestaltung einen Beitrag zum Schutz vor sommerlicher Hitze leisten. Begrünungen von Fassaden und Dächern können den Hitzeeintrag durch Verschattung, Dämmung und Verdunstungskühlung noch weiter reduzieren (► Kap. 9.1.7, ► Kap. 9.2.3). Gleichzeitig weisen sie eine erhöhte Biodiversität auf. Positive Wechselwirkungen bezüglich Starkregen und Schlagregen (► Kap. 10.2) sowie eventuelle Risiken bei Hagel und Sturm (► Kap. 10.3) sind zu beachten.

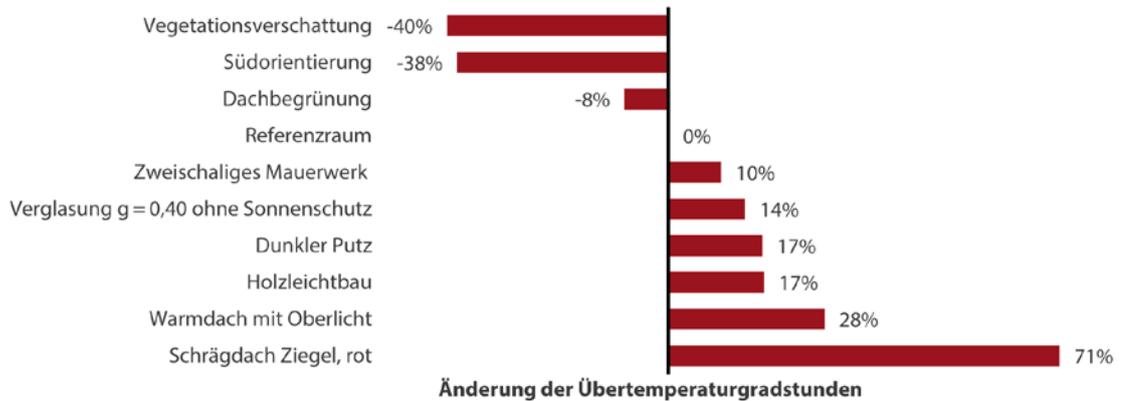
Die geeignete Wahl der Verglasung bietet gute Anpassungsmöglichkeiten an das Risiko der sommerlichen Überhitzung, auch bei baulich vorgegebenen Orientierungen und Größen. Ein niedriger U-Wert reduziert, vergleichbar zu den opaken Bauteilen, den Wärmeeintrag ins Gebäude. Wichtiger für den Hitzeschutz ist jedoch der Gesamtenergiedurchlassgrad (► Kap. 9.1.8). Ein niedriger Wert bedeutet einen geringen Eintrag solarer Energie in den Raum. In der Regel lassen Gläser mit einem geringen Energiedurchlass auch weniger Tageslicht in den Raum. Eine ausreichende Versorgung ist zu prüfen. Gleichzeitig verringert sich der in den Wintermonaten erwünschte Wärmegewinn. Dennoch können Verglasungen mit einem niedrigen g-Wert eine Lösung darstellen, wenn beispielsweise Sonnenschutzsysteme (► Kap. 6.2) aufgrund von Hagel und Sturm (► Kap. 10.3) nicht möglich sind.



**Sonnenschutzsysteme** bieten ebenfalls ein hohes Potenzial, den solaren Energieeintrag ins Gebäude zu reduzieren. Je nach den Anforderungen an den Abminderungsfaktor  $F_c$  (► Kap. 6.2) können unterschiedliche Systeme gewählt werden. Vollständig geschlossene, außen liegende Roll- und Fensterläden führen zu einer starken Abminderung der Sonnenstrahlung. Da somit gleichzeitig kein Tageslicht verfügbar ist, stellen diese Systeme ggf. eine Lösung während der Abwesenheit der Nutzenden dar. Bewegliche außen liegende Systeme haben eine hohe Effektivität. Sie erfüllen neben der Aufgabe des sommerlichen Wärmeschutzes im Ereignisfall von Hagel und Sturm, ggf. durch eine Automatisierung, einen hohen mechanischen Schutz im nicht aktiven Zustand. Innen liegende Sonnenschutzsysteme sind nicht anfällig für Sturm- oder Hageleinwirkungen, bieten aber durch hohe  $F_c$ -Werte nur einen geringen Schutz vor Hitze. Bauliche Verschattungen und Vegetationsverschattung sollten bei der Planung einbezogen werden. Die Risiken Sturm und Hagel (► Kap. 10.3) sind zu beachten.

Die erläuterten Maßnahmen sind stets in Wechselwirkung zueinander zu sehen. ► Abb. 87 stellt vergleichend die Auswirkungen einiger der betrachteten Ausführungen des Bauteilkatalogs auf die Übertemperaturgradstunden dar. Die Änderungen beziehen sich auf den Referenzraum in der Standardausführung. Die Wahl einer alternativen opaken Außenwandkonstruktion führt im Vergleich zum Wärmedämmverbundsystem des Referenzraums zu einer Erhöhung der Übergradtemperaturstunden. Mit 10 % mehr Übertemperaturgradstunden schneidet das kerngedämmte zweischalige Mauerwerk besser als die Holzleichtbaukonstruktion mit 17 % ab, was hauptsächlich auf ihre fehlende thermische Speichermasse zurückzuführen ist. Diesem Wert entspricht auch der Referenzraum mit dunklem außenseitigen Putz. Die Wahl einer geeigneten Ziegeldachkonstruktion bedingt gleichzeitig schräge Dachflächenfenster anstatt der vertikalen Fassadenverglasung. Bei gleichbleibender Fensterfläche führt dies zu einer Erhöhung um 71 %. Dagegen weist der Raum mit einem Flachdach und Oberlichtern eine geringere Erhöhung von 28 % und mit einem begrünten Flachdach eine Verbesserung um 8 % auf. Ein angepasster g-Wert der Verglasung (0,40 anstatt 0,60) kann einen fehlenden Sonnenschutz nicht völlig kompensieren, die Übertemperaturgradstunden erhöhen sich um 14 %. Bei Referenzverglasung und Sonnenschutz, jedoch mit einer Südorientierung, verringern sie sich um 38 % gegenüber der Referenz. Einen ähnlich hohen Effekt, mit einer Verringerung von 40 %, weist die Vegetationsverschattung ( $F_s = 0,80$ ) mit Hausbäumen auf dem Grundstück auf und führt somit zu einer hohen Anpassung an Hitze und Strahlung.





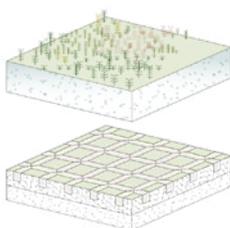
**Abb. 87** Änderung der Übertemperaturgradstunden durch verschiedene Maßnahmen, bezogen auf den Referenzraum in Potsdam.

## 10.2 Anpassung an Stark- und Schlagregen sowie Hochwasser

Stark- und Schlagregen sowie das Überflutungsrisiko unterliegen hohen regionalen Unterschieden. Bei diesen Ereignissen können auf Liegenschaften und an Immobilien erhebliche Schäden entstehen. Gewitter und Starkregen treten über bebauten Gebieten während der warmen Jahreszeit häufiger auf. Starkregenereignisse sind aufgrund der zeitlich kurzen und lokalen Veränderungen schwer vorherzusagen. Dabei auftretende Wassermassen können oftmals von der Kanalisation nicht vollständig abgeführt werden. Aufgrund des hohen städtischen Versiegelungsgrads resultieren erhöhte Abflussgeschwindigkeiten und somit Gefährdungen durch Überflutungen.

### Standort und Außenraum

Neben einem regional unterschiedlich ausgeprägten Risiko für Starkregen beeinflussen vor allem lokale Gegebenheiten das Überflutungsrisiko. Gebäude, die sich örtlich in Flussnähe befinden, sind vulnerabler. Gebäude in Hanglage bzw. Hangnähe können von Begleitprozessen wie Erosion betroffen sein. Urbane, versiegelte Gebäudeumgebungen besitzen ein ungünstigeres Versickerungsverhalten als offene Grünflächen. Die urbane Erwärmung (► Kap. 10.1) beeinflusst zusätzlich die Intensität des Niederschlags, da wärmere Luft mehr Wasser aufnehmen kann. Bei der Standortwahl sind diese Risiken zu analysieren. Die Hinweise zum Standort bei der Anpassung an Sturm gelten entsprechend (► Kap. 10.3).



Die Möglichkeiten der **Einflussnahme im Außenraum** setzen i. d. R. an der eigenen Grundstücksgrenze an. Für Anpassungen an Starkregen sowie zur Vorsorge gegen Hochwasser spielt das integrale Regenwassermanagement durch eine multimodale Flächennutzung eine bedeutende Rolle. Das sofortige Abfließen in die Kanalisation kann bei Starkregenereignissen zu ihrer Überflutung führen und Schäden auf der Liegenschaft sowie am Gebäude hervorrufen (► Kap. 8.1.1).

Die **Oberflächengestaltung** der Liegenschaft kann auf drei Arten als vorbeugende Maßnahme dienen: erstens Abflussvermeidung und -verzögerung, zweitens Regenwasserspeicherung sowie drittens Wegleiten des Wassers vom Gebäude.

Diese Maßnahmen können in eine weitgehende Entsiegelung der **Oberflächen** mit gleichzeitiger Schaffung grün-blauer Infrastruktur münden und somit synergetische Effekte gegen Hitzebelastung (► Kap. 10.1) und zur Biodiversitätsförderung schaffen. Die dezentrale Rückhaltung durch Gründächer (► Kap. 9.2.3), unter- und oberirdische Speicherbecken sowie Retentionsmulden und Sickerschächte stellt eine weitere Anpassungsmöglichkeit gegen Starkregen dar. Neigung der Geländetopografie in Richtung Gebäude sollte generell vermieden werden. Ist dies nicht möglich, sind Senken, Bodenschwellen und Schutzmauern in Betracht zu ziehen.

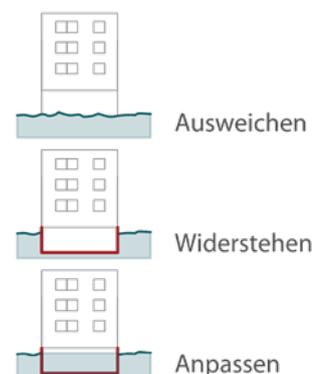
Neben geeigneten Oberflächen sowie Regenwasserrückhaltungsmöglichkeiten (► Kap. 8.1.3) verbessern **vegetative Strukturen** das natürliche Wassermanagement in Städten, sie sind damit Bestandteil der urbanen Überflutungsvorsorge (► Kap. 8.2.3). Insbesondere Gehölze mit einem großen Kronenvolumen weisen mehrere abflussmindernde Wirkungen auf. Gleichzeitig ist eine angemessene Pflege zu gewährleisten. Das Abbrechen von Ast- sowie Blattwerk infolge schwerer Stürme (ab 89 km/h, ► Kap. 10.3) und Starkregenereignisse können zum einen den **Baum**, zum anderen Mensch und Tier sowie angrenzende Objekte und Infrastruktur gefährden. Durch Kontrollgänge sowie Baum-, Gehölz- und Unterhaltungspflegearbeiten kann Sturm- schäden vorgebeugt werden. Insbesondere alte Bäume sowie Bäume mit Krankheits- symptomen sind regelmäßig durch Baumgutachten zu kontrollieren.

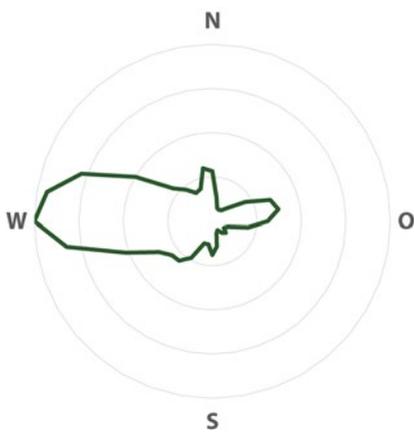


### Gebäude und Innenraum

Vorsorge- und Anpassungsmaßnahmen an Starkregen und Hochwasser können den Grundprinzipien „Ausweichen“, „Widerstehen“ und „Anpassen“ zugeordnet werden. Ausweichen kann hierbei als Schutz vor **Überflutung** durch eine erhöhte Bauweise (Aufständering, Anschüttungen, Sockelbauweise über Hochwassermark) realisiert werden.

Um das Gebäude und den Innenraum im Ereignisfall vor Starkregen zu schützen, sollte schnell gehandelt und mobile Wasserbarrieren (Sandsäcke) sollten bereitgehalten werden. Einfahrten in die Tiefgaragen oder ebene Eingänge können in gefährdeten Gebieten präventiv mit Dammbalkensystemen ausgestattet werden. Generell sollten bodengleiche, ebene Gebäudeöffnungen vermieden werden. Dabei ist eine barrierefreie Erschließung des Gebäudes möglichst sicherzustellen. Kellertreppen, Lichtschächte und Kellerfenster sind mit Aufkantungen zu versehen. Die Anlagentechnik (Elektroverteiler, Heizungen, Tanks etc.) ist überflutungssicher zu installieren oder in höheren Bereichen unterzubringen. Mit geeigneten Abflusssystemen kann das Wasser im Bedarfsfall schnellstmöglich abgeführt werden, ein Gefälle zu Bodenabläufen ist einzuplanen. Hausanschlüsse ans öffentliche Kanalnetz unterhalb der Rückstauenebene sind durch Rückstausicherungen oder durch Abwasserhebeanlagen zu schützen. Eine regelmäßige Wartung der entsprechenden Anlagen ist zu gewährleisten. Im Ereignisfall Überflutung sollte das Aufsuchen von Kellergeschossen und Tiefgaragen vermieden werden.





**Abb. 88** Verteilung der jährlichen Schlagregenmenge in Abhängigkeit der Orientierung für den Wetterdatensatz Potsdam (Meteonorm2020).

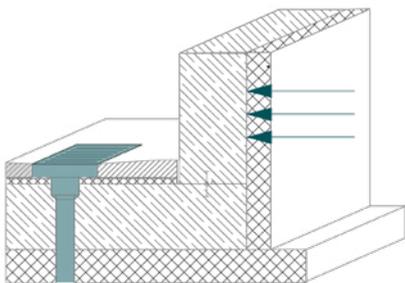
### Bauteile

Die Beanspruchung einer Fassade durch Schlagregen hängt entsprechend der örtlichen Hauptwindrichtung(en) maßgeblich von ihrer Ausrichtung ab. ► **Abb. 88** zeigt die Verteilung der jährlichen Schlagregenmenge für den Referenzraum am Standort Potsdam. Das größte Risiko für Schlagregen ergibt sich für die nach Westen orientierte Fassade.

Fassaden mit einer witterungsschützenden Putzschicht wie Wärmedämmverbundsysteme oder monolithische Konstruktionen sind vulnerabel bei Stark- und Schlagregen. Ein geeignetes Putzsystem ist daher in Abhängigkeit der Schlagregenbeanspruchung zu wählen. Mechanische Beschädigungen der Putzschicht, beispielsweise durch Hagel- oder Sturmschäden (► **Kap. 10.3**), können zum Eindringen von Wasser in die Konstruktion und zu schweren Folgeschäden führen. Bei hohen Schlagregenbeanspruchungen ist der Einsatz einer (zusätzlichen) Außenwandbekleidung zu erwägen. **Hinterlüftete Fassaden** (► **Kap. 9.1.4** und ► **Kap. 9.1.6**) bieten durch eine Trennung des Witterungsschutzes von der Konstruktion einen hohen Schutz, da der Dämmstoff auch bei Schlagregenbelastung wirkungsvoll vor Feuchtigkeit geschützt ist. Bei Außenwandbekleidungen aus Holz sind diffusionsoffene Oberflächen zu bevorzugen, da eindringendes Wasser schneller wieder austrocknen kann.

Bei Verglasungssystemen führen Mängel an Anschlussdetails im Fall einer Schlagregenbeanspruchung zu Feuchteintritt und -schäden. Es ist auf die fachgerechte Ausführung zu achten. Bei Sonnenschutzsystemen ist eine sorgfältige Wahl und Ausführung bezüglich der Feuchteverträglichkeit und der mechanischen Beanspruchung erforderlich. Textile Verschattungssysteme sind meist feuchteempfindlicher als nicht-textile Systeme und sollten bei Bedarf vor Feuchteeinwirkung geschützt werden.

Beim Dach ist die Niederschlagsabführung zur Vorbeugung von Feuchteschäden und im Extremfall von statischen Schäden, hauptsächlich bei flachen oder gering geneigten Dächern, von entscheidender Bedeutung. Geneigte Dächer sind weniger vulnerabel bei Starkregen als Flachdächer. Letztere sind grundsätzlich mit einem Gefälle (min. 2 %) auszuführen. Eine ausreichende Dimensionierung des Entwässerungssystems (Abflüsse und Notüberlauf) ist zur Schadenvermeidung relevant. Diese ist regelmäßig zu kontrollieren und zu warten. Grün- und Retentionsdächer können bei (Stark-)Regen in hohem Maße zur Wasserrückhaltung beitragen (► **Kap. 9.2.3**), was jedoch bei der Planung statisch zu berücksichtigen ist. Gleichzeitig leisten sie einen Beitrag zur Anpassung an Hitze und Strahlung (► **Kap. 10.1**) und sie fördern die Biodiversität.



Erdberührende Bauteile wie Keller sind gegen Grundwasser und drückendes Wasser zu schützen. Die Ausführung als Weiße Wanne stellt die Dichtheit über die Konstruktionsweise sicher. Alternativen sind die Schwarze oder die Braune Wanne (► **Kap. 9.3.1**). Fenster und Türen unterhalb des Schutzziels sind wasser- und druckdicht auszuführen. Bei Hochwasserereignissen kann eindringendes Wasser meist nicht völlig vermieden werden, daher ist das Schadenspotenzial zu minimieren. Nicht erdberührende Bauteile unterhalb des definierten Schutzziels sind von der darüberliegenden Konstruktion mittels Putzprofilen, Bauteilfugen, Gleitlagerprofilen und/oder Tropfblechen zu trennen. Es sind Baustoffe mit einer hohen Widerstandsfähigkeit gegenüber hygrischen Einwirkungen zu wählen. Unterhalb des Schutzziels sind Vertikalabdichtungen innerhalb der Putzschicht einzubinden. Somit wird das Eindringen des Wassers in die dahinterliegenden Schichten (Dämmstoff, Tragstruktur) verhindert.

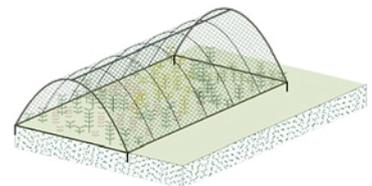
## 10.3 Anpassung an Hagel und Sturm

Auch für das Hagel- und Sturmrisiko gelten starke regionale Unterschiede. Beide Ereignisse können auf Liegenschaften und an Immobilien erhebliche Schäden verursachen, oft treten sie zudem unwetterartig kombiniert auf. Gerade in Gebieten mit einer hohen Betroffenheit sind Schutzmaßnahmen essenziell und insgesamt aufgrund des Klimawandels empfehlenswert.

### Standort und Außenraum

Neben einem regional unterschiedlich ausgeprägten Risiko beeinflussen auch lokale Gegebenheiten vor allem das Sturmrisiko. Exponierte oder frei stehende Lagen führen in der Regel zu einer erhöhten Anfälligkeit. Bei der Standortwahl sind zusätzlich weitere Faktoren zu beachten (► Kap. 10.1, ► Kap. 10.2).

Versiegelte Oberflächen aus Kunst- oder Naturstein sind in der Regel wenig vulnerabel gegenüber Hagelschlag. Holzoberflächen können durch Hagelschlag zerstört bzw. beschädigt werden. Selbst leichte Beschädigungen können bei behandelten Oberflächen zu Folgeschäden führen. Für Terrassenüberdachungen sind geeignete Materialien zu verwenden wie Verbundsicherheitsgläser oder auch speziell gewebte Sonnenschutzsegel. Obstbäume sowie Pflanzen- und Hochbeete können durch spezielle Hagelschutzgewebe oder Vliese geschützt werden. Zum Schutz gegen Sturmschäden ist stets auf eine sturmsichere Befestigung und Verankerung zu achten. Es sind ggf. Aussteifungen und geeignete Fundamente einzuplanen. Lose Gegenstände sollten bei Sturmwarnung entfernt oder fest verankert werden.



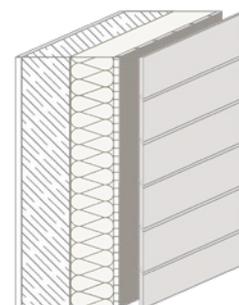
Bäume, Hecken und Sträucher können den Windangriff auf die Liegenschaft und die Immobilie verringern. Gleichzeitig stellen sie selbst bei Sturm eine Gefahr dar. Daher ist eine regelmäßige Kontrolle hinsichtlich Schäden empfehlenswert, um herabbrechende sowie umknickende Äste und Stämme zu vermeiden. Bei der Wahl der Bepflanzung sollten Arten mit hoher Bruchanfälligkeit vermieden werden.

### Gebäude und Raum

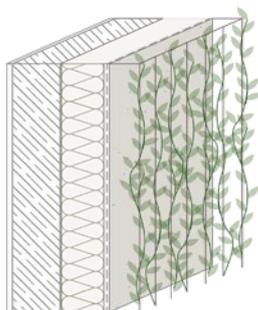
An Gebäuden können prinzipiell alle außen liegenden, der Witterung ausgesetzten Bauteile durch Hagel und Sturm beschädigt werden. Dünnwandige metallische Bauteile wie Regenrohre und -rinnen erleiden bei Hagelschlag oder durch umherfliegende Teile meist nur optische Beeinträchtigungen. Zinkbeschichtete Bauteile können infolge der Beschädigung rosten. Zusätzlich sollten Regenrohre und -rinnen nach Hagel- und Sturmereignissen auf Verschmutzungen und Verstopfungen kontrolliert werden, um Folgeschäden, beispielsweise bei Starkregenereignissen, zu vermeiden (► Kap. 10.2). Weitere Aufbauten wie Photovoltaikanlagen sind entsprechend dem örtlichen Risiko hagel- und sturmfest angepasst auszuführen. Um Innenräume im Ereignisfall vor Hagel- und Sturmschäden zu schützen, müssen Fenster und Türen geschlossen werden.

### Bauteile

Fassaden mit einer witterungsschützenden Putzschicht wie Wärmedämmverbundsysteme oder monolithische Porenbetonkonstruktionen sind besonders vulnerabel für Hagel- oder Sturmschäden, da durch **mechanische Einwirkungen** die Putzschicht beschädigt werden kann. Neben rein ästhetischen Mängeln kann dies zu Folgeschäden durch eindringendes Wasser in die Konstruktion führen, vor allem in Verbindung mit Stark- und



Schlagregen (► Kap. 10.2). Geeignete Oberputze mit Gewebelagen und erhöhter Zugfestigkeit entsprechend dem standortbezogenen Risiko können das Risiko minimieren.



Alternativ können **Vorsatzschalen** bei erwarteten Hagel- und Sturmereignissen mit hoher Intensität in Betracht gezogen werden. Sie bieten durch eine Trennung des Witterungsschutzes von der Konstruktion eine höhere Resilienz. Selbst bei meist nur optischen Beschädigungen werden in der Regel die dahinterliegenden Konstruktionschichten vor Witterungseinflüssen geschützt und bleiben funktionsfähig. Zweischalige Mauerwerke zeichnen sich ebenfalls durch ein geringeres Schadenrisiko aus. Die massive Vorsatzschale bietet einen sehr hohen Schutz gegen Hagel und sturmbedingte umherfliegende Gegenstände. Auch wandgebundene Begrünungssysteme fungieren als Vorsatzschale und bieten einen zusätzlichen Schutz der dahinterliegenden Konstruktion. Gleichzeitig ist die Pflanzenebene vulnerabel gegenüber Hagelereignissen. Sie bietet eine positive Wirkung hinsichtlich der Anpassung an Hitze und Strahlung (► Kap. 10.1), an Starkregen und Schlagregen (► Kap. 10.2) und fördert die Biodiversität.

**Dächer** sind Hagelereignissen direkt ausgesetzt und bieten bei Sturm eine große Angriffsfläche. Sie müssen entsprechend gesichert werden. Als Schutz vor Hagelschäden bietet eine vollständige Kiesdeckung bei Flachdächern erhöhten Schutz. Darunterliegende Dachbahnen werden nicht beeinträchtigt. Dachbegrünungen erhöhen den Schutz der darunterliegenden Flachdachkonstruktion. Gleichzeitig ist die Pflanzenebene vulnerabel gegenüber Hagelereignissen. Positive Effekte sind bei der Anpassung an Hitze und Strahlung (► Kap. 10.1) sowie der Anpassung an Starkregen und Schlagregen (► Kap. 10.2) zu erwarten. Gegen die Sogwirkung bei Sturm sind Flachdächer allgemein und besonders an den Eckbereichen vor Abheben zu sichern (► Kap. 9.2.1, ► Kap. 9.2.2). Bei geneigten Ziegeldächern ist eine Dachdeckung mit hohem Hagelwiderstand zu wählen. In Abhängigkeit der erwarteten Sturmereignisse sind Dachziegel durch Sturmklammern gegen Ablösung zu sichern. Bereits einzelne fehlende oder beschädigte Ziegel beeinträchtigen die Funktion des Daches erheblich. Regelmäßige Kontrollen der Dachflächen sind empfehlenswert.

Schädigungen an vertikalen **Verglasungen** treten durch Hagel oder Sturm nur bei sehr extremen Ereignissen auf. Größere Schäden sind am Fensterrahmen zu erwarten. Kunststoff- und Aluminiumrahmen sind weniger anfällig als Holzrahmen und diesen vorzuziehen. Roll- und Fensterläden weisen einen hohen Schutz der dahinterliegenden Konstruktion gegenüber Hagel und Sturm auf. Sie sind jedoch selbst vulnerabel. Dünnwandige Bauteile aus Kunststoffen bei außen liegenden Sonnenschutzsystemen können durch Hagel und Sturm einwirkung starke Beschädigungen erfahren und sollten besonders geschützt werden, wobei auf windstabile Ausführungen zurückgegriffen werden kann. Bewegliche Sonnenschutzsysteme sollten im Ereignisfall (automatisch oder manuell) eingefahren und somit geschützt werden.

Flachdachöffnungen sind dem Risiko Hagel aufgrund der exponierten Lage maximal ausgesetzt. Auf die Verwendung von Materialien mit einem hohen Hagelwiderstand ist zu achten. In besonders gefährdeten Regionen kann die Verwendung von Hagelnetzen oberhalb der Oberlichter und Lichtkuppeln angebracht sein. Die Beibehaltung ihrer weiteren Funktionen wie Lüftung, Wartung, Rauch- und Wärmeabzug ist dabei sicherzustellen.

# 11 Zusammenfassung

Der Klimawandel wirkt sich in den nächsten Dekaden auf alle Gesellschaftsschichten, unsere Infrastruktur und Lebensräume sowie auf unterschiedlichste Wirtschaftszweige aus. Wie in dieser Broschüre aufgezeigt, ist das Bauwesen als einer der ressourcenintensivsten Wirtschaftssektoren auf der einen Seite Mitverursacher für die klimatischen Veränderungen. Auf der anderen Seite ist der Bausektor in besonderem Maße von den Extremwetterereignissen betroffen. Deshalb ist das enorme und bisher nicht ausgeschöpfte Potenzial des Bauwesens zur Anpassung an den Klimawandel von größter Bedeutung.

Für die erfolgreiche Umsetzung einer ganzheitlichen Transformation von Städten, Quartieren und Gebäuden hin zu einer klimaresilienten und zukunftsfähigen (gebauten) Umwelt sind Anpassungsmaßnahmen bereits auf jeder Ebene zu integrieren und umzusetzen. Das beginnt bei individuellen Maßnahmen auf der Liegenschaft und am Gebäude, um Schadensbildern durch Extremwetterereignisse vorzubeugen. Daneben unterstützen integrale und inklusive Planungsansätze im Außenraum, wie vielzählige Beispiele in der Broschüre darlegen, eine lebenswerte und zukunftsfähige Gestaltung der (gebauten) Umwelt für Mensch, Flora und Fauna.

Weiter kann durch planerische und konstruktive Maßnahmen auf der Liegenschaft und am Gebäude Einfluss auf die Klimaresilienz genommen werden. Die Nutzung und Orientierung der Räume, die Konstruktion, die Ausrichtung der Fensterflächen sowie die Art der Sonnenschutzsysteme bis hin zur Wahl der Fassadenfarbe können die Schadensanfälligkeit des Gebäudes gegenüber Extremwetterereignissen maßgebend beeinflussen. Die Kombination eines angepassten Lüftungsverhalten mit zusätzlichen, hierauf abgestimmten baulichen Maßnahmen minimiert Überhitzung. Im Idealfall kann auf eine kosten- und energieintensive Anlagentechnik zur Klimatisierung verzichtet werden.

Es zeigt sich aber auch, dass Schadensereignisse nicht vollständig vermeidbar sind, beispielweise bei Hagel oder Hochwasser. Durch eine sanierungsfreundliche Gestaltung der Konstruktionen können diese im Schadensfall möglichst einfach wieder ertüchtigt werden. Hier gilt es, durch vorausschauende Planung das Risiko sowie das Schadenspotenzial für die Liegenschaft und das Gebäude, aber allem voran für Mensch und Lebewesen weitestgehend zu minimieren.

In Summe bieten die in der Broschüre dargelegten Maßnahmen ein hohes Anpassungspotenzial an die Folgen des Klimawandels, idealerweise in durchdachten, nachhaltigen Kombinationen. Sie sind selbstverständlich stets auf den Einzelfall bezogen, zu prüfen und zu adaptieren. Letztendlich sollte bei der Umsetzung der Maßnahmen immer auch der Klimaschutz mitgedacht werden. Nur wenn Klimaanpassung und Klimaschutz Hand in Hand gehen, können der Klimawandel und damit seine Folgen gebremst werden. Heutige Klimaanpassungsmaßnahmen bleiben langfristig wirksam und tragen zu einer positiven (Klima-)Zukunft bei.

# 12 Literaturverzeichnis

**Abt. Stadtklimatologie Landeshauptstadt Stuttgart - Amt für Umweltschutz**

**2020:** Wetterdaten Stuttgart Stadtmitte. Online verfügbar unter [https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?luft\\_messdaten\\_download](https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?luft_messdaten_download), zuletzt geprüft am 08.12.2021.

**Bartsch, N. et al. 2016:** Waldökologie. Einführung für Mitteleuropa. 1. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer eBook Collection).

**BBSR Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2016:** Anpassung an den Klimawandel in Stadt und Region. Forschungserkenntnisse und Werkzeuge zur Unterstützung von Kommunen und Regionen. Online verfügbar unter [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2016/anpassung-klimawandel-dl.pdf;jsessionid=C08403C935C37FB399983D1371530AD0.live11291?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2016/anpassung-klimawandel-dl.pdf;jsessionid=C08403C935C37FB399983D1371530AD0.live11291?__blob=publicationFile&v=1), zuletzt geprüft am 29.12.2021.

**BBSR Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2017:** Materialströme im Hochbau. Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. Unter Mitarbeit von Asam, Claus. Online verfügbar unter [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/zukunft-bauen-fp/2017/band-06-dl.pdf;jsessionid=D68D452D4ADFF-2250943B1439403EC71.live11314?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/zukunft-bauen-fp/2017/band-06-dl.pdf;jsessionid=D68D452D4ADFF-2250943B1439403EC71.live11314?__blob=publicationFile&v=1), zuletzt geprüft am 29.12.2021.

**BBSR Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2018a:** GIS-ImmoRisk Naturgefahren. Geoinformationssystem zur bundesweiten Risikoabschätzung von zukünftigen Klimafolgen für Immobilien.

**BBSR Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2018b:** Leitfaden Starkregen – Objektschutz und bauliche Vorsorge. Online verfügbar unter <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2018/leitfaden-starkregen.html>, zuletzt geprüft am 08.12.2021.

**BBSR Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2019:** Nachhaltig geplante Außenanlagen. Empfehlungen zu Planung, Bau und Bewirtschaftung von Bundesliegenschaften. Band 16. Online verfügbar unter <https://www.zukunftbau.de/neue-meldung/nachhaltig-geplante-aussenanlagen-empfehlungen-zu-planung-bau-und-bewirtschaftung-von-bundesliegenschaften>, zuletzt geprüft am 08.12.2021.

**BBSR Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2020:** KLIBAU – Weiterentwicklung und Konkretisierung des Klimaangepassten Bauens. Handlungsempfehlungen für Planer und Architekten. Online verfügbar unter [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2018/klibau/handlungsempfehlungen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2018/klibau/handlungsempfehlungen.pdf?__blob=publicationFile&v=4), zuletzt geprüft am 02.11.2021.

**BBSR Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2021:** Klimaangepasstes Bauen systemisch entwickeln: Beispiel Hitze und Starkregen. Online verfügbar unter <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/fachbeitraege/energie-umwelt-klima/extremwetter/klibau-hitze-starkregen/01-start.html>, zuletzt geprüft am 02.12.2021.

- BMK Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie 2020:** Der 100-jährige Baum. Online verfügbar unter [https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/naturschutz/vielfaltleben/aktiv/baum.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/naturschutz/vielfaltleben/aktiv/baum.html), zuletzt geprüft am 01.12.2021.
- BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2021:** Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik Ausgabe 2021. 1. Aufl. Unter Mitarbeit von Jörg Rüger und Andrea Buchheim. Online verfügbar unter [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz\\_zahlen\\_2021\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2021_bf.pdf), zuletzt geprüft am 29.12.2021.
- BMUB Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2015:** Grün in der Stadt – Für eine lebenswerte Zukunft. Grünbuch Stadtgrün. Online verfügbar unter [https://bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bauen/wohnen/gruenbuch-stadtgruen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bauen/wohnen/gruenbuch-stadtgruen.pdf?__blob=publicationFile&v=3), zuletzt geprüft am 08.12.2021.
- BMUB Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2017:** Grün in der Stadt – Für eine lebenswerte Zukunft. Weißbuch Stadtgrün. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/publikationen/weissbuch-stadtgruen-1145400>, zuletzt geprüft am 08.12.2021.
- Brazel, A. et al. 2005:** Urban Climatology. In: Oliver J.E. (eds) Encyclopedia of World Climatology. Encyclopedia of Earth Sciences Series.: Springer, Dordrecht.
- Bundesregierung 2008:** Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Online verfügbar unter [https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf), zuletzt geprüft am 29.12.2021.
- DeepRoot 2017:** DeepRoot Green Infrastructure. Integrated Tree and Rainwater System.
- dena Bundesministerium für Wirtschaft, Deutsche Energie-Agentur 2021:** dena-Gebäudereport - Fokusthemen zum Klimaschutz im Gebäudebereich. Unter Mitarbeit von T. et al. Bründlinger. Online verfügbar unter <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-gebaeudereport-2021-fokusthemen-fuer-den-klimaschutz/>, zuletzt geprüft am 12.10.2021.
- Deutsches Klima-Konsortium 2021:** Was wir heute übers Klima wissen. Basisfakten zum Klimawandel, die in der Wissenschaft unumstritten sind. Online verfügbar unter [https://www.deutsches-klima-konsortium.de/fileadmin/user\\_upload/pdfs/Publikationen\\_DKK/basisfakten-klimawandel.pdf](https://www.deutsches-klima-konsortium.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Publikationen_DKK/basisfakten-klimawandel.pdf), zuletzt geprüft am 12.10.2021.
- Djedjig, R. et al. 2017:** Experimental study of green walls impacts on buildings in summer and winter under an oceanic climate. In: Energy and Buildings 150, S. 403–411 Energy and Buildings.
- Dütz, A. et al. 1982:** Windeinfluss auf Energiebedarf und Konzeption eines Gebäudes. Leitfaden für Architekten, Planer und Kommunalpolitiker. Berlin: Erich Schmidt (Energie und Stadtplanung).
- DWD Deutscher Wetterdienst 2020:** Warnkriterien. Online verfügbar unter [https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen\\_aktuell/kriterien/warnkriterien.html](https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html), zuletzt geprüft am 29.12.2021.
- DWD Deutscher Wetterdienst 2021a:** Dürre. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=100578&lv3=603288>, zuletzt geprüft am 14.10.2021.

- DWD Deutscher Wetterdienst 2021b:** Klimawandel - ein Überblick. Das Klima - ein empfindliches Gleichgewicht. Online verfügbar unter [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/ueberblick/ueberblick\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/ueberblick/ueberblick_node.html), zuletzt geprüft am 12.10.2021.
- DWD Deutscher Wetterdienst 2021c:** Sturm. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=102248&lv3=102646>, zuletzt geprüft am 14.10.2021.
- DWD Deutscher Wetterdienst 2021d:** Szenarien für die nächste Generation Klimaprojektionen (CMIP6). Online verfügbar unter [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/naechste-generation\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/naechste-generation_node.html), zuletzt geprüft am 12.10.2021.
- DWD Deutscher Wetterdienst 2021e:** Wetter- und Klimalexikon. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101094&lv3=101162>, zuletzt geprüft am 05.10.2021.
- DWD Deutscher Wetterdienst 2020:** Temperaturentwicklung in Deutschland im globalen Kontext. Online verfügbar unter [https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20200128\\_vergleich\\_de\\_global.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20200128_vergleich_de_global.pdf?__blob=publicationFile&v=2), zuletzt geprüft am 12.10.2021.
- Eger, M. H. P. 2019:** Untersuchung von nachträglich erzeugten Endbereichen an Betonfahrbahnen unter Berücksichtigung der Reibungsverhältnisse auf unterschiedlichen Tragschichten. Dissertation. München.
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP 2019:** WUFI® Plus. Version 6.5.3. Stuttgart. Online verfügbar unter <https://wufi.de/de/>.
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP 2020:** GENERIS®. Websoftware zum Erstellen von individuellen und konsistenten Gebäudeökobilanzen. Online verfügbar unter <https://www.generis-solution.eu/>, zuletzt geprüft am 29.12.2021.
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP 2021:** RETENTIONSVERHALTEN VON BAUWERKSBEGRÜNUNG VERGLEICH EXTENSIVER SYSTEME. Online verfügbar unter <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/ibpmitteilungen/551-600/572.pdf>, zuletzt geprüft am 02.12.2021.
- FLL Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. Aus der Arbeit des RWA „Baumkontrollen“ 2020:** Baumkontrollrichtlinien – Richtlinien für Baumkontrollen zur Überprüfung der Verkehrssicherheit.
- GALK Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz 2021:** Zukunftsbäume für die Stadt. Auswahl der GALK-Straßenbaumliste.
- GDV Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. 2019:** Naturgefahrenreport 2019. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer. Unter Mitarbeit von Burghoff O. et al. Online verfügbar unter <https://www.gdv.de/resource/blob/51710/e5eaa53a9ec21fb9241120c1d1850483/naturgefahren-report-2019---schaden-chronik-data.pdf>.
- GDV Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. 2021:** Naturgefahrenreport 2021. Berlin. Online verfügbar unter [www.gdv.de/naturgefahren-report](http://www.gdv.de/naturgefahren-report), zuletzt geprüft am 02.11.2021.
- Helmholtz-Zentrum Hereon 2013:** Vergleichendes Lexikon No-regret-Maßnahmen - Climate Service Center Germany. Online verfügbar unter [https://www.gerics.de/products\\_and\\_publications/publications/detail/063104/index.php.de](https://www.gerics.de/products_and_publications/publications/detail/063104/index.php.de), zuletzt geprüft am 29.12.2021.

- Helmholtz-Zentrum Umweltforschung GmbH UFZ 2021:** Dürremonitor. Online verfügbar unter <https://www.ufz.de/index.php?de=37937>, zuletzt geprüft am 02.11.2021.
- HTW Dresden - Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden 2020:** Bau-technische Überflutungsvorsorge für Wohngebäude und kleingewerblich genutzte Gebäude. Unter Mitarbeit von Stefanie Kunze und Clemens Koller. Online verfügbar unter <https://www.gdv.de/resource/blob/62678/6eeb563dbd4d3031053135921eab3ec0/forschungsbericht-zu-bau-konstruktiver-ueberflutungsvorsorge-data.pdf>, zuletzt geprüft am 02.12.2021.
- IEA Internationale Energieagentur 2018:** The Future of Cooling Opportunities for energy-efficient air conditioning. Air conditioning use emerges as one of the key drivers of global electricity-demand growth. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>, zuletzt geprüft am 14.10.2021.
- IPCC 2014:** Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC Cambridge University Press, Intergovernmental Panel on Climate Change 2021:** Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Online verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>, zuletzt geprüft am 05.10.2021.
- IWS Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung - Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie 2020:** Wetterdaten der Universität Stuttgart, Campus. Wetterstation Lauchäcker.
- Klima-Wiki Deutscher Bildungsserver, Climate Service Center, Hamburger Bildungsserver 2021:** SSP-Szenarien. Online verfügbar unter <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/SSP-Szenarien>, zuletzt geprüft am 12.10.2021.
- Koch, K. et al. 2020:** Urban heat stress mitigation potential of green walls: A review. In: Urban Forestry & Urban Greening 55 (4), S. 126843 Urban Forestry & Urban Greening.
- Konarska, J. et al. 2016:** Transpiration of urban trees and its cooling effect in a high latitude city. In: International journal of biometeorology 60 (1), S. 159–172 International journal of biometeorology.
- Leistner, P. et al. 2018:** Bauphysik urbaner Oberflächen. In: Bauphysik 40 (5), S. 358–368 Bauphysik.
- Lißner, K. 2018:** Holzbausanierung beim Bauen im Bestand. Unter Mitarbeit von Wolfgang Rug. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin/Heidelberg (VDI-Buch Ser).
- LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg 2016:** Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Online verfügbar unter <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/wasser/starkregen>, zuletzt geprüft am 29.12.2021.
- LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg 2019:** Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Risikoanalyse.
- Mayer, E. et al. 2018:** Messung des konvektiven Wärmeübergangs - Entwicklung eines neuen Sensors und bauphysikalische Anwendungen. In: Bauphysik 40 (5), S. 336–343 Bauphysik.
- Mehra, S.-R. 2021:** Stadtbauphysik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

- Meteotest AG 2020:** Meteonorm. Version 8. Bern.
- NABU Naturschutzbund Deutschland e. V. 2020:** Hecken aus heimischen Sträuchern - NABU. Online verfügbar unter <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/oekologisch-leben/balkon-und-garten/pflanzen/zierpflanzen/01955.html>, zuletzt geprüft am 01.12.2021.
- NABU Naturschutzbund Deutschland e. V. 2021:** Stadtbäume unter Stress - NABU. Online verfügbar unter <https://www.nabu.de/tiere-und-pflanzen/pflanzen/pflanzenwissen/04009.html>, zuletzt geprüft am 01.12.2021.
- Oke, T. R. 1997:** Urban climates and global environment change. In: In Thompson, R. D., and Perry, A. H., eds. Applied Climatology: Principles and Practice. Rutledge, pp. 273–287 In Thompson, R. D., and Perry, A. H., eds. Applied Climatology: Principles and Practice. Rutledge.
- Perini, K. et al. 2017:** The use of vertical greening systems to reduce the energy demand for air conditioning. Field monitoring in Mediterranean climate. In: Energy and Buildings 143 (January (1)), S. 35–42 Energy and Buildings.
- Schopfer, P. et al. 1999:** Pflanzenphysiologie. 5., grundlegend überarb. und aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch).
- StartClim2008 Universität für Bodenkultur, Department für Raum, Landschaft und Infrastruktur 2009:** Entwicklung und ökonomische Abschätzung unterschiedlicher Landschaftsstrukturen auf Ackerflächen zur Verringerung der Evapotranspiration vor dem Hintergrund eines Klimawandels unter besonderer Berücksichtigung einer Biomasseproduktion.
- Statista 2021:** Anzahl der Wohngebäude in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2020. Unter Mitarbeit von A. Breitkopf. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/70094/umfrage/wohngebäudebestand-in-deutschland-seit-1994/>, zuletzt geprüft am 29.12.2021.
- Statistisches Bundesamt 2020a:** Bauvolumen im Baugewerbe in Deutschland nach Haupt- und Ausbaugewerbe in den Jahren 2009 bis 2019 (in Milliarden Euro). Unter Mitarbeit von A. Breitkopf. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/252500/umfrage/bauvolumen-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 14.10.2021.
- Statistisches Bundesamt 2020b:** Jährliche Menge an Bau- und Abbruchabfällen in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2018. Unter Mitarbeit von A. Breitkopf. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/927102/umfrage/bauabfaelle-jaehrliche-menge-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 14.10.2021.
- Statistisches Bundesamt 2021a:** Abfallaufkommen in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2019 nach Herkunft. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2864/umfrage/abfallaufkommen-in-deutschland-seit-2000/>, zuletzt geprüft am 14.10.2021.
- Statistisches Bundesamt 2021b:** Abfallbilanz 2019. Abfallaufkommen 2019 nach Abfallströmen (Abfallbilanz 2019, Artikelnummer: 5321001197004). Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 14.10.2021.
- Statistisches Bundesamt 2021c:** Anzahl der Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2020. Unter Mitarbeit von A. Breitkopf. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/70370/umfrage/baufertigstellungen---wohngebäude-und-nichtwohngebäude-seit-1998/>, zuletzt geprüft am 14.10.2021.

- Statistisches Bundesamt 2021d:** Siedlungs- und Verkehrsfläche wächst jeden Tag um 52 Hektar. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/04/PD21\\_209\\_412.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/04/PD21_209_412.html), zuletzt geprüft am 12.10.2021.
- Statistisches Bundesamt 2021e:** Wohnfläche je Einwohner in Wohnungen in Deutschland von 1991 bis 2020. Unter Mitarbeit von J. Rudnicka. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36495/umfrage/wohnflaeche-je-einwohner-in-deutschland-von-1989-bis-2004/>, zuletzt geprüft am 12.10.2021.
- Suda, J. et al. 2012:** Bauen und Naturgefahren. Handbuch für konstruktiven Gebäudeschutz. Wien, New York: Springer Vienna (SpringerLink Bücher).
- UBA Umweltbundesamt 2019a:** Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltbundesamt-2019-monitoringbericht-2019-zur>, zuletzt geprüft am 07.10.2021.
- UBA Umweltbundesamt 2019b:** Vorsorge gegen Starkregenereignisse und Maßnahmen zur wassersensiblen Stadtentwicklung – Analyse des Standes der Starkregenvorsorge in Deutschland und Ableitung zukünftigen Handlungsbedarfs (TEXTE 55/2019). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vorsorge-gegen-starkregenereignisse-massnahmen-zur>, zuletzt geprüft am 08.12.2021.
- UBA Umweltbundesamt 2020:** Folgen des globalen Klimawandels für Deutschland. Abschlussbericht: Analysen und Politikempfehlungen. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>, zuletzt geprüft am 29.12.2021.
- UBA Umweltbundesamt 2021a:** Bewertung klimawandelgebundener Risiken: Schadenspotenziale und ökonomische Wirkung von Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen. Abschlussbericht zum Vorhaben „Behördenkooperation Klimawandel und -anpassung“, Teil 1. Dessau-Roßlau (CLIMATE CHANGE 29/2020). Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc\\_29-2020\\_bewertung\\_klimawandelgebundener\\_risiken\\_teilbericht\\_1.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_29-2020_bewertung_klimawandelgebundener_risiken_teilbericht_1.pdf), zuletzt geprüft am 02.11.2021.
- UBA Umweltbundesamt 2021b:** Gesundheitsrisiken durch Hitze. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze>, zuletzt geprüft am 30.11.2021.
- UBA Umweltbundesamt 2021c:** Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Kurzfassung. Dessau-Roßlau (Climate Change, 26/2021). Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-10\\_cc\\_26-2021\\_kwra2021\\_kurzfassung.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-10_cc_26-2021_kwra2021_kurzfassung.pdf), zuletzt geprüft am 21.10.2021.
- UBA Umweltbundesamt 2021d:** Trockenheit - aktuelle Situation. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/trockenheit-in-deutschland-fragen-antworten>, zuletzt geprüft am 14.10.2021.
- UNEP United Nations Environment Programme 2020:** 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Online verfügbar unter [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34572/GSR\\_ES.pdf](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34572/GSR_ES.pdf), zuletzt geprüft am 14.10.2021.

# ZUKUNFTBAU

Veröffentlichungen aus dem BBSR



---

## SOZIALE MISCHUNG UND GUTE NACHBARSCHAFT IN NEUBAUQUARTIEREN

Planung, Bau und Bewirtschaftung von inklusiven Wohnanlagen

---

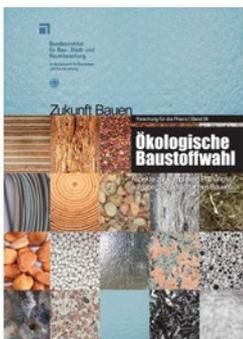


---

## BIM-LEITFADEN FÜR DEN MITTELSTAND

Wie viel BIM (Building Information Modeling) verträgt aktuell ein mittelgroßes Bauprojekt?

---



---

## ÖKOLOGISCHE BAUSTOFFWAHL

Aspekte zur komplexen Planungsaufgabe „Schadstoffarmes Bauen“

---



---

## CLUSTERWOHNUNGEN

Eine neue Wohnungstypologie für eine anpassungsfähige Stadtentwicklung

---



---

## READY KOMPAKT

Planungsgrundlagen zur Vorbereitung von altgerechten Wohnungen

---



---

## BEST PRACTICE

Soziale Faktoren nachhaltiger Architektur. 17 Wohnungsbauprojekte im Betrieb

---

Die Broschüren sind kostenfrei erhältlich. Bestellhinweise und Downloads unter:

[www.zukunftbau.de/mediathek/publikationen](http://www.zukunftbau.de/mediathek/publikationen)



---

## REDEFINE THE IN-BETWEEN

Die Bedeutung des Zwischenraums als Komplementärraum der Wohnung

---



---

## EINFACH BAUEN 2 – PLANEN, BAUEN, MESSEN

Anwendung integraler Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen mit Holz, Leichtbeton und hochwärmedämmendem Mauerwerk in Pilotprojekten

---



---

## FAMILIEN IN GEMEINSCHAFTLICHEN WOHNFORMEN

Lebensformen- und lebenslaufgerechtes Wohnen für Familien am Beispiel gemeinschaftlicher mehrgenerationaler Wohnformen

---

Die Forschungsberichte sind als Online-Publikationen abrufbar unter:  
[www.zukunftbau.de/mediathek/forschungsberichte](http://www.zukunftbau.de/mediathek/forschungsberichte)



# Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen  
und Raumordnung



**ZUKUNFT BAU**  
FÖRDERN FORSCHEN ENTWICKELN

[www.zukunftbau.de](http://www.zukunftbau.de)

ISBN 978-3-87994-095-0  
ISSN 2199-3521

Das Klima ändert sich. Auch in Deutschland sind die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels bereits heute mess- und spürbar. Infolge der Klimaveränderungen erhöht sich die Zahl der Extremwetterereignisse wie Hitze, Starkregen und Hochwasser sowie Sturm und Hagel. Das Bauwesen ist als einer der ressourcenintensivsten Wirtschaftssektoren nicht nur Mitverursacher für die klimatischen Veränderungen, sondern auch in besonderen Maßen von den Extremwetterereignissen betroffen. Gleichzeitig tragen gezielte (bauliche) Anpassungsmaßnahmen maßgebend zum Objektschutz bis hin zur Förderung der Gesundheit und körperlichen Unversehrtheit von Mensch und Tier bei. An diese Herausforderungen, Handlungsfelder und Gestaltungsspielräume knüpfen die Inhalte dieser Broschüre an.

Die Publikation soll Planenden, Architektinnen und Architekten sowie Eigentümerinnen und Eigentümern Entscheidungshilfen und konkrete Lösungsvorschläge an die Hand geben, die bei der Erstellung einer klimaangepassten Architektur unterstützen.

Zukunft Bau setzt seit über fünfzehn Jahren wichtige Impulse für Architektur und Bauwesen, schlägt Brücken zwischen Bauforschung und Baupraxis. Im Mittelpunkt steht der baurelevante Erkenntnisgewinn zu aktuellen Forschungsthemen wie Klimaschutz, Material- und Ressourceneffizienz, Digitalisierung, kostengünstigem Bauen und demografischem Wandel.

Hierfür bietet Zukunft Bau eine Plattform, um entsprechende innovative Ansätze zu erforschen, zu konzipieren, zu erproben und zu vermitteln. Dabei sollen neue Rahmenbedingungen des Bauwesens ausgelotet wie auch die Forschung als Methode beim Planen und Bauen in größerer Breite etabliert werden. Getragen wird das Innovationsprogramm Zukunft Bau vom Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) gemeinsam mit dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).