

# Gebäudebegrünung und Klimawandel

Anpassung an die Folgen des Klimawandels  
durch klimawandeltaugliche Begrünung



**Titelbild:** *oben links, unten links und unten rechts:* © OPTIGRÜN, *oben rechts:* © iStock / Entienou

**Zitierhinweis:** Brune, M., Bender, S. und Groth, M. (2017): Gebäudebegrünung und Klimawandel. Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung. Report 30. Climate Service Center Germany, Hamburg.

**Erscheinungsdatum:** April 2017

Dieser Report ist auch online unter [www.climate-service-center.de](http://www.climate-service-center.de) erhältlich.

## **Gebäudebegrünung und Klimawandel**

# **Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung**

Autoren: Miriam Brune, Steffen Bender, Markus Groth

Abteilung „Klimafolgen und Ökonomie“  
am Climate Service Center Germany (GERICS)

**April 2017**



## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Varianten der Gebäudebegrünung</b> .....	<b>6</b>
2.1 Dachbegrünung .....	6
2.2 Fassadenbegrünung.....	9
<b>3. Wirkung der Gebäudebegrünung</b> .....	<b>11</b>
3.1 Stadtklima und städtische Umwelt.....	11
3.1.1 Mikroklima.....	11
3.1.2 Umwelt, Luft- und Lebensqualität .....	16
3.2 Urbanes (Regen)Wassermanagement .....	17
3.2.1 Regenwasserrückhaltung und Abflussverzögerung .....	17
3.2.2 Kombination von Gebäudebegrünung mit blauer Infrastruktur .....	20
3.3 Thermische und energetische Wirkung auf Gebäudeebene .....	21
<b>4. Praxis</b> .....	<b>24</b>
4.1 Planung, Implementierung und Pflege.....	24
4.2 Pflanzenauswahl.....	24
4.3 Kosten und Nutzen .....	26
4.4 Kombination von Gründächern und Photovoltaik .....	28
4.5 Gebäudebegrünung als Kompensationsmaßnahme .....	30
4.6 Klimawandeltaugliche Gestaltung.....	32
<b>5. Ausblick</b> .....	<b>34</b>
<b>Literatur</b> .....	<b>35</b>

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1</b> Extensiv begrüntes Dach auf einem Gebäudekomplex der EnBW City GmbH & Co. KG in Stuttgart .....	6
<b>Abbildung 2</b> Intensiv begrüntes Dach / Dachgarten auf einem Verwaltungsgebäude am <i>Dortmunder U</i> in Dortmund .....	7
<b>Abbildung 3</b> Begrünte Fassade des <i>Caixa Forums</i> in Madrid. ....	9
<b>Abbildung 4</b> Klassifizierung von Fassadenbegrünungen auf Grundlage deutsch- und englischsprachiger Literatur .....	10
<b>Abbildung 5</b> Wirkungen der Gebäudebegrünung aus Gebäude-, Umfeld- und Stadtebene .....	11
<b>Abbildung 6</b> Wärmeübertragung auf begrünten Dächern.....	13
<b>Abbildung 7</b> Retentionsdach auf einem Gebäude der Wasserwerke Bochum.....	19
<b>Abbildung 8</b> Oberflächentemperaturen verschiedener Dachabdeckungen im Tagesverlauf .....	22
<b>Abbildung 9</b> Extensive Dachbegrünung des Oversum Vitalresorts in Winterberg.....	25
<b>Abbildung 10</b> Kombination aus extensiver Dachbegrünung und einer Photovoltaikanlage auf dem Gebäude der Erich Kästner Schule in Langenfeld .....	29
<b>Abbildung 11</b> Klimawandeltraugliche Gestaltung von geplanten Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel.....	33

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1</b> Gegenüberstellung der wichtigsten Merkmale und Eigenschaften der intensiven und extensiven Dachbegrünung.....	8
<b>Tabelle 2</b> Temperaturminderungspotential begrünter Dächer auf Stadtebene.....	15
<b>Tabelle 3</b> Abflussbeiwert C und Jahresabflussbeiwerte von Dachbegrünungen.....	18

## Zusammenfassung

In städtischen Gebieten ist eine zukünftige Verstärkung klimawandelbedingter Einflüsse zu erwarten. Im Vergleich zum Umland sind dort insbesondere höhere Temperaturen als stadtklimatische Effekte relevant. Zudem verstärkt eine zunehmende Flächenversiegelung die Folgen von Starkregenereignissen. Als Anpassungsmaßnahme, die beide Herausforderungen positiv adressieren kann, wird die Nutzung von Dachbegrünungen oder begrünten Fassaden diskutiert. Aus theoretischer Sicht liegen die Vorteile auf der Hand, da eine Verbesserung des Mikroklimas und der Luftqualität, eine Minderung der Abflussspitzen bei Regenereignissen sowie eine Erhöhung der Biodiversität ebenso zu erwarten sind wie eine verbesserte Gebäudedämmung.

Aus praktischer Sicht ergeben sich aber auch viele noch offene Fragen, wobei insbesondere die folgenden zu nennen sind:

- *Wie wird die Wasserversorgung der unterschiedlichen Dach- und Fassadenbegrünungen dauerhaft sichergestellt?*
- *Wie kann die Dachentwässerung in ein nachhaltiges Regenwassermanagement-Konzept für den urbanen Raum eingebunden werden?*
- *Welche klimaangepassten Pflanzen sollten für eine Gebäudebegrünung verwendet werden?*
- *Kann eine Dachbegrünung als Kompensationsmaßnahme für andere Baumaßnahmen dienen?*
- *Wie beeinflussen sich Dachbegrünungen und der Einsatz von Photovoltaik-Anlagen für die Energieerzeugung gegenseitig?*
- *Wie kann die Gebäudebegrünung selbst „klimawandeltauglich“ ausgestaltet werden, damit sie auch zukünftig die ihr zugeordneten Funktionen erfüllen kann?*

Der vorliegende Report fasst den aktuellen Wissensstand hierzu zusammen, gibt einen schnellen Überblick zu den gängigen praktischen Fragestellungen und thematisiert den noch offenen Forschungsbedarf. Er richtet sich vor allem an Stadt- und Raumplaner sowie kommunale Behörden bzw. Kommunalvertreter, die sich mit grüner Infrastruktur im städtischen Raum beschäftigen. Angesprochen sind darüber hinaus auch Interessierte, die sich über die Möglichkeiten, Potentiale und Herausforderungen der Dach- und Fassadenbegrünung informieren möchten.

## 1. Einleitung

Bereits heute sind die Folgen des Klimawandels in Deutschland spürbar. Für den Zeitraum 1881 bis 2014 zeigen Beobachtungsdaten einen Anstieg der Lufttemperatur um  $1,3^{\circ}\text{C}$  im Jahresmittel ( $+1,2^{\circ}\text{C}$  im Sommer,  $+1,1^{\circ}\text{C}$  im Winter) (Kaspar & Mächel 2017). Die stärksten Temperaturänderungen ( $+1,5^{\circ}\text{C}$ ) traten in dieser Zeit in der Westdeutschen Tieflandsbucht, im Linksrheinischen Mittelgebirge und im Oberrheinischen Tiefland auf. Dagegen verzeichnete das Nordostdeutsche Tiefland den geringsten ( $+0,9^{\circ}\text{C}$ ) Temperaturanstieg (Deutscher Wetterdienst 2016). Auch die Anzahl heißer Tage (Tagesmaximum  $\geq 30^{\circ}\text{C}$ ) nahm in Deutschland im Mittel zu und stieg seit den 1950er Jahren von ca. drei Tagen pro Jahr auf neun Tage pro Jahr. Gleichzeitig wurden Kälteextreme seltener. In Deutschland traten neun der zehn wärmsten Jahre seit dem Aufzeichnungsbeginn 1881 ab 1989 auf – fünf davon seit 2000 (Deutscher Wetterdienst 2016). Somit ist bereits heute eine Verschiebung der Maximaltemperaturen hin zu mehr Extremen dokumentiert (Deutschländer & Mächel 2017). Auch beim Niederschlag konnten Veränderungen beobachtet werden. So nahmen diese zwischen 1881 und 2014 – verglichen mit dem langjährigen Mittel von 1961 bis 1990 – um 10,2% zu (Kaspar & Mächel 2017). Dabei ist auch eine Änderung der Niederschlagsmuster wie beispielsweise die Zunahme an winterlichen Starkniederschlägen zu beobachten (Kunz et al. 2017). Allerdings müssen Niederschlagsentwicklungen räumlich differenziert betrachtet werden.

Für die Zukunft projizieren regionale Klimamodelle weitere Veränderungen für Deutschland. Simulationen des regionalen Klimamodellensembles EURO-CORDEX zeigen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts einen möglichen Anstieg zwischen  $+1,2^{\circ}\text{C}$  und  $+3,2^{\circ}\text{C}$  für das Szenario RCP4.5 bzw. zwischen  $+3,2^{\circ}\text{C}$  und  $+4,6^{\circ}\text{C}$  für das Szenario RCP8.5. Für den Niederschlag lässt sich durch die hohe zeitliche und räumliche Variabilität keine allgemeingültige Aussage für Deutschland insgesamt treffen. Niederschlagsänderungen müssen aus diesem Grund räumlich differenziert betrachtet werden. Während das Ensemble für den Winter insgesamt eher von einer Zunahme der Niederschlagssummen ausgeht ( $-3$  bis  $+17\%$  für RCP4.5 bzw.  $+8$  bis  $+32\%$  für RCP8.5), zeigen sich für die Sommermonate sowohl mögliche Zunahmen als auch Abnahmen (Jacob et al. 2017).

Zusätzlich zu den Klimaschutzbemühungen, die viele Städte in den letzten Jahren unternommen haben, gewinnt auch die Anpassung an die Folgen des Klimawandels zunehmend an Bedeutung – nicht nur in Bezug auf die bereits beobachteten Folgen des Klimawandels sondern insbesondere auch im Hinblick auf die zukünftig projizierten Klimaänderungen. Hierbei nimmt das multifunktionell einsetzbare urbane Grün eine besondere Stellung ein. So kann es zur Minderung des Hitzeinseleffektes, zum gezielten Rückhalt von Regenwasser nach Starkregenereignissen, zur Erhöhung der Biodiversität aber auch zur Verbesserung der Luftqualität beitragen (Berardi et al. 2014, Climate Service Center 2014, Naturkapital Deutschland 2016). Viele Wirkungen sind bekannt, allerdings basieren die Erkenntnisse in den allermeisten Fällen auf derzeitigen Beobachtungen. Inwieweit die Zielsetzungen der durchgeführten Begrünungsmaßnahmen auch in der Zukunft Bestand haben, wird in den meisten Fällen nicht geprüft. Im Hinblick auf die projizierten Veränderungen der Klimaparameter müssen die heute eingesetzten städtischen Pflanzen wie z.B. Straßenbäume, Grünflächen, begrünten Gebäudeelementen und Parks auch



zukünftigen Bedingungen – höhere Temperaturen, längere Hitze- und Trockenperioden – standhalten, um ihre Funktion erfüllen zu können (Brune 2016, Kuttler et al. 2017). Somit muss die Klimawandeltauglichkeit der Anpassungsmaßnahmen an sich geprüft werden.

Platzmangel und Flächennutzungskonflikte beschränken in vielen dicht besiedelten Gebieten die Möglichkeit, ausgedehnte Grünflächen und Parks zu schaffen, welche zur Verbesserung des Stadtklimas und der Lebensqualität der Bewohner beitragen. Verfügbare Flächen werden zur Stadtverdichtung für die Schaffung von Wohnraum, Versorgung oder für Infrastrukturen benötigt. Derartige Entwicklungen sind aus Sicht des Klimaschutzes durchaus als positiv zu bewerten, aus Sicht der Anpassung an die Folgen des Klimawandels jedoch als kritisch anzusehen. Von besonderer Bedeutung sind dabei in Bezug auf die städtischen Temperaturen Kaltluftbahnen und eine ausreichende Durchlüftung. Es gilt dabei bestehende Kaltluftbahnen von einer neuen Bebauung freizuhalten und neue Kaltluftbahnen durch Stadtumbaumaßnahmen zu schaffen. Vor diesem Hintergrund nehmen Dach- und Fassadenbegrünungen einen besonderen Stellenwert ein, da sie keinen bzw. kaum Platz auf Straßenniveau in ohnehin verdichteten Stadtgebieten verbrauchen. Die Gebäudebegrünung ergänzt daher andere Formen des urbanen Grüns wie beispielsweise Parks und Grünflächen.

Dieser Report fasst den aktuellen Wissensstand zur Nutzung von Gründächern und begrünten Fassaden als Klimaanpassungsmaßnahme in gemäßigten Klimazonen zusammen und thematisiert aktuelle Forschungsbedarfe. Dazu zählen beispielsweise die Quantifizierung des mikroklimatischen Effekts auf Stadtebene, die optimale Kombination von Dachbegrünung mit Photovoltaikanlagen sowie den Einfluss des Klimawandels auf die Gebäudebegrünung selbst. Der Report diskutiert die Wirksamkeit der Maßnahmen sowohl in Bezug auf das heutige Klima als auch in Bezug auf das zukünftige Klima – speziell mit einem Bezug zur urbanen Hitzebelastung und dem Regenwassermanagement in der Stadt. Der auf wissenschaftlichen Ergebnissen basierende Report unterstützt so auch die Entwicklung und Bereitstellung von Klimaservice (siehe dazu auch European Commission (2015)) und ermöglicht damit eine langfristig erfolgreiche Anpassung an die Folgen des Klimawandels.

## 2. Varianten der Gebäudebegrünung

### 2.1 Dachbegrünung

Dachflächen machen bis zu 30-50% der versiegelten Stadtfläche aus, bleiben jedoch in vielen Städten weitgehend ungenutzt (Dunnett & Kingsbury 2008, Speak et al. 2013). Die Begrünung von Dachflächen bietet die Möglichkeit, diese Flächen effektiv u.a. zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels zu nutzen. Bei der Dachbegrünung wird im Englischen wie im Deutschen zumeist zwischen extensiver und intensiver Dachbegrünung unterschieden (siehe **Tabelle 1**). In einigen Fällen wird zusätzlich die Variante der einfachen Intensivbegrünung eingeschlossen, eine Mischform, welche zum Teil auch als semi-intensive Begrünung oder aufwendige Extensivbegrünung bezeichnet wird (Appl & Mann 2012, Berardi et al. 2014, Li & Yeung 2014). Der Systemaufbau einer Dachbegrünung folgt dem Vorbild der Natur, vom Dachaufbau (entspricht dem Ausgangsgestein) bis zum Substrat (entspricht dem humosen Oberboden) (siehe auch Abbildungen in **Tabelle 1**). Somit werden die natürlichen Bodenfunktionen durch die verschiedenen funktionellen Schichten der Dachbegrünung nachgebildet (Boetticher et al. 2012).



**Abbildung 1** Extensiv begrüntes Dach auf einem Gebäudekomplex der EnBW City GmbH & Co. KG in Stuttgart, Baujahr 2007 (Foto © OPTIGRÜN).

Extensive Gründächer haben im Allgemeinen eine geringe Aufbauhöhe und eine flache Substrattiefe (siehe **Tabelle 1**). Dadurch sind sie leichter und auf vielen Dächern auch nachträglich zu realisieren. Bepflanzt werden sie vorwiegend mit niedrig wachsenden Gräsern, Sedum oder Sukkulenten (Appl & Mann 2012, Berardi et al. 2014). Diese müssen auch extremeren klimatischen Bedingungen wie Hitze, Kälte und vor allem Trockenheit standhalten, da extensive Gründächer in der Regel nicht bewässert werden. Aus diesem Grund erfolgt die Bepflanzung extensiver Gründächer häufig mit naturnahen Pflanzengesellschaften, die relativ anspruchslos und selbsterhaltend sind. Eine Bewässerung ist nur in der Anfangsphase nötig, um das Anwachsen zu unterstützen (Appl &

Mann 2012). Ungefähr 90% der begrünten Dächer in Deutschland werden nur durch Niederschlag und zu einem geringen Anteil durch Taubildung gespeist (Heusinger & Weber 2015). Die extensive Dachbegrünung kann auf Flachdächern, Schrägdächern (5-15° Neigungswinkel) und Steildächern (bis maximal 45° Neigungswinkel) installiert werden. Demgegenüber eignet sich die intensive Dachbegrünung wegen der deutlich größeren Aufbauhöhe (siehe **Tabelle 1**) nur bei flachen bis leicht geneigten Dächern (0 bis 5° Neigungswinkel) (Appl & Mann 2012, Berardi et al. 2014, Vijayaraghavan 2016).



**Abbildung 2** Intensiv begrüntes Dach / Dachgarten auf einem Verwaltungsgebäude am *Dortmunder U* in Dortmund, Baujahr 2010 (Foto © OPTIGRÜN).

Durch die tiefere Substratschicht der intensiven Dachbegrünung können dort verschiedenste Vegetationsformen bis hin zu höheren, mehrjährigen Stauden und Gehölzen gepflanzt werden. Explizit gilt es hierbei zu beachten, dass der Pflegeaufwand, der Bewässerungsbedarf sowie der technische und statische Anspruch deutlich höher sind, wodurch sie die teurere Variante ist (Appl & Mann 2012, FBB 2010a). Zur Klassifizierung in extensive oder intensive Dachbegrünung dienen nicht nur die Höhe der Vegetation und die Dicke der Substratschicht, sondern auch die aktive Nutzung. Ein aktiv als Sportfläche genutzter Rasen wird beispielsweise als intensiv eingestuft, wohingegen extensive Gründächer im Regelfall nur zur Wartung und Pflege betreten werden (Appl & Mann 2012).

Positiv hervorzuheben ist zudem, dass Gründächer generell Lebensräume für viele Pflanzen- und Tierarten bieten und damit die Biodiversität innerhalb der Stadt erhöhen und einem Habitatverlust entgegenwirken (Berardi et al. 2014, Francis & Lorimer 2011, Li & Yeung 2014). Eine höhere Biodiversität ist wiederum vom Standpunkt des Naturschutzes aus positiv zu bewerten. Zudem ist sie ein wichtiger Bestandteil von in der Stadt erbrachten Ökosystemdienstleistungen (Naturkapital Deutschland 2016).

**Tabelle 1** Gegenüberstellung der wichtigsten Merkmale und Eigenschaften der intensiven und extensiven Dachbegrünung (Grafiken: eigene Darstellung).

	Extensive Dachbegrünung	Intensive Dachbegrünung
	<p>① Vegetationsschicht                  ② Substrat                  ③ Filtervlies                  ④ Speicher &amp; Drainageschicht                  ⑤ Dachabdichtung (wurzelfest nach FLL)                  ⑥ Dachkonstruktion</p>	
<b>Vegetation</b>	Moose, Gräser, Sedum, Sukkulenten, Kräuter	Verschiedenste Pflanzenformen bis zu mehrjährigen Sträuchern & Bäumen, häufig Rasenflächen
<b>Pflegeaufwand</b>	gering	hoch
<b>Bewässerung</b>	nur zu Beginn, um das Anwachsen zu unterstützen	notwendig
<b>Technischer Anspruch</b>	gering: einfacher Schichtaufbau	hoch: Statik und Schichtaufbau
<b>Nutzung</b>	Kein Betreten vorgesehen	Dachgarten, städtische Grünfläche, Erholungsraum
<b>Kosten / m<sup>2</sup></b>	- 15-40 € / m <sup>2</sup> (FBB 2010a) - 20-30 € / m <sup>2</sup> (Appl & Mann 2012) - 15-35 € / m <sup>2</sup> (Pfoser et al. 2013)	- ab 60 € / m <sup>2</sup> (FBB 2010a) - ca. 5 € / m <sup>2</sup> je cm Substratstärke (Substratschüttung >15 cm) (Pfoser et al. 2013)
<b>Gewicht / m<sup>2</sup> (wassergesättigt)</b>	50-170 kg/m <sup>2</sup> (Appl & Mann 2012, Bauder 2016, FBB 2010a, Optigrün 2016, ZinCo 2016)	150-1300 kg/m <sup>2</sup> (Appl & Mann 2012, Bauder 2016, FBB 2010a, Optigrün 2016, ZinCo 2016)
<b>Mikroklimatische Wirkung</b>	mittel	hoch
<b>Regenwasser-rückhaltung</b>	mittel	hoch
<b>Abflussbeiwert C je nach Aufbaudicke (nach FLL (2008))</b>	<u>Dachneigung bis 5° // (größer 5°C)</u> >10-15cm   C=0,4 // (C=0,5) >6 - 10cm   C=0,5 // (C=0,6) >4 - 6 cm   C=0,6 // (C=0,7) >2 - 4 cm   C=0,7 // (C=0,8)	<u>Dachneigung bis 5°</u> >50 cm   C=0,1 >25 - 50 cm   C=0,2 >15 - 25 cm   C=0,3
<i>1 = 100% Abfluss</i> <i>0 = 0 % Abfluss</i>		
<b>Dämmende Wirkung</b>	mittel	hoch

## 2.2 Fassadenbegrünung

Je nach Höhe der Gebäude kann die Fassadenfläche die überbaubare Bodenfläche weit übersteigen (FBB 2010b). Die Nutzung von Gebäudefassaden als „vertikale Grünfläche“ hat daher besonders viel Potential bei hohen Bauwerken mit einem großen Wand-Dach-Verhältnis, bietet aber auch Vorteile für niedriggeschossige Häuser. Während begrünte Dächer vor allem für das Dachgeschoss thermische Vorteile bringen können, kann sich der thermische Nutzen bei Fassadenbegrünungen über alle begrünten Stockwerke erstrecken (Cheng et al. 2010, Jim 2015, Manso & Castro-Gomes 2015).

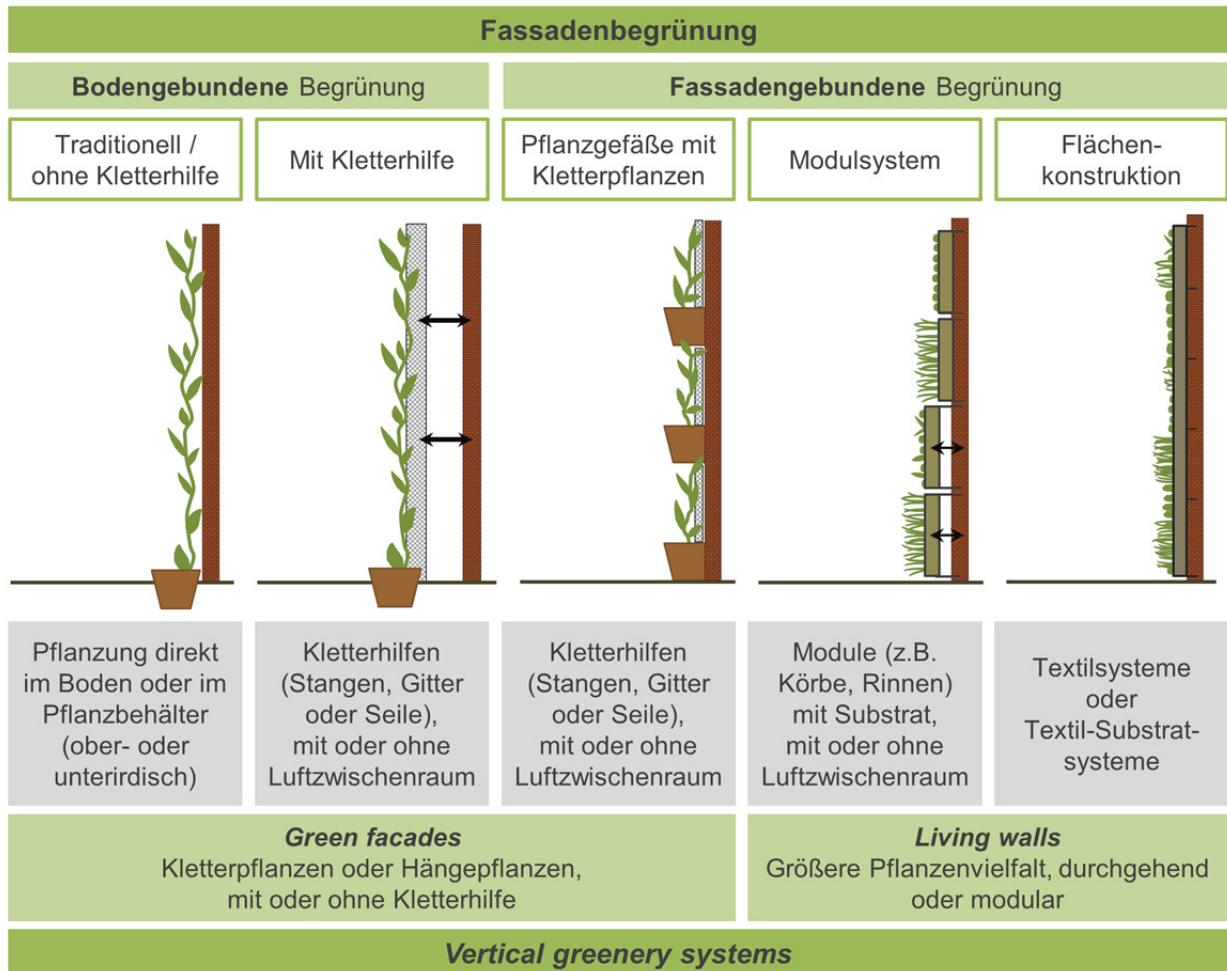


**Abbildung 3** Begrünte Fassade des *Caixa Forums* in Madrid. Die 2007 fertiggestellte intensive Fassadenbegrünung des französischen Botanikers und Gartenarchitekts Patrick Blanc basiert auf einer flächigen Konstruktion aus Polyurethanfolie, Kunststoffgewebe und Filzdecken (Foto © Miriam Brune).

Begrünte Fassaden sind erst seit einigen Jahren in den Fokus der aktuellen Forschung gerückt und gewinnen zunehmend an Bedeutung (Jim 2015). Bisher existiert allerdings noch keine einheitliche Nomenklatur und Definition für begrünte Fassaden und Hauswände (Jim 2015, Köhler 2012). Im deutschsprachigen Raum wird zumeist von begrünten Wänden, begrünten Fassaden, Fassadenbegrünung, vertikaler Begrünung oder vertikalen Gärten gesprochen (FBB 2011, Köhler & Ottelé 2012).

Die englischsprachige Fachliteratur kennt verschiedene Bezeichnungen, unter anderem *green wall*, *green facade*, *living wall* oder *vertical garden* (Cameron et al. 2014, Köhler 2008, Pérez et al. 2014, Price et al. 2015). Die Bezeichnungen werden derzeit jedoch noch nicht einheitlich verwendet. Wahrend die meisten deutschsprachigen Klassifikationen zunachst nach dem Wurzelort der Pflanzen unterscheiden (bodengebunden vs. fassadengebunden), unterteilt die englischsprachige Literatur nach dem technischen Aufbau: *green facades*

(einfacher Aufbau, vor allem Kletterpflanzen) und *living walls* (moderne Modulsysteme, flächige Konstruktionen, nicht nur Kletterpflanzen). Verschiedene Arten der Klassifizierung von Fassadenbegrünungen sind in **Abbildung 4** dargestellt.



**Abbildung 4** Klassifizierung von Fassadenbegrünungen auf Grundlage deutsch- und englischsprachiger Literatur (u.a. Jim 2015, Manso & Castro-Gomes 2015, Price et al. 2015, Cameron et al. 2014, FBB 2014, Pérez et al. 2014, Safikhani et al. 2014, ÖkoKauf Wien 2013, Köhler & Ottelé 2012, FBB 2011, Köhler 2008).

### 3. Wirkung der Gebäudebegrünung

Begrünte Dächer und Fassaden können vielerlei Vorteile bieten, sowohl direkt auf Gebäudeebene als auch – bei ausreichender Flächendeckung – auf Quartiers- und Stadtebene (siehe **Abbildung 5**).



**Abbildung 5** Wirkungen der Gebäudebegrünung aus Gebäude-, Umfeld- und Stadtebene (eigene Darstellung basierend auf Pfoser et al. (2013)).

#### 3.1 Stadtklima und städtische Umwelt

##### 3.1.1 Mikroklima

Mit der Begrünung von Gebäudeteilen aber auch anderen Formen der Stadtbegrünung sind positive Einflüsse für das direkte Umfeld (wie z.B. Kühlung durch Evapotranspiration) sowie – bei ausreichender Flächendeckung – auch auf Quartiers- und Stadtebene verbunden. Der Bereich und das Ausmaß der Wirkung kann durch die Wahl unterschiedlicher Installationsorte gesteuert werden (Cameron et al. 2014, FBB 2011, Manso & Castro-Gomes 2015, Price et al. 2015).

Begrünte Dächer und Fassaden besitzen das Potential, die Überwärmung städtischer Gebiete – bekannt als urbaner Hitzeinseleffekt – zu reduzieren. Verminderte Umgebungstemperaturen führen in sommerlichen Hitzeperioden zu einem verbesserten thermischen

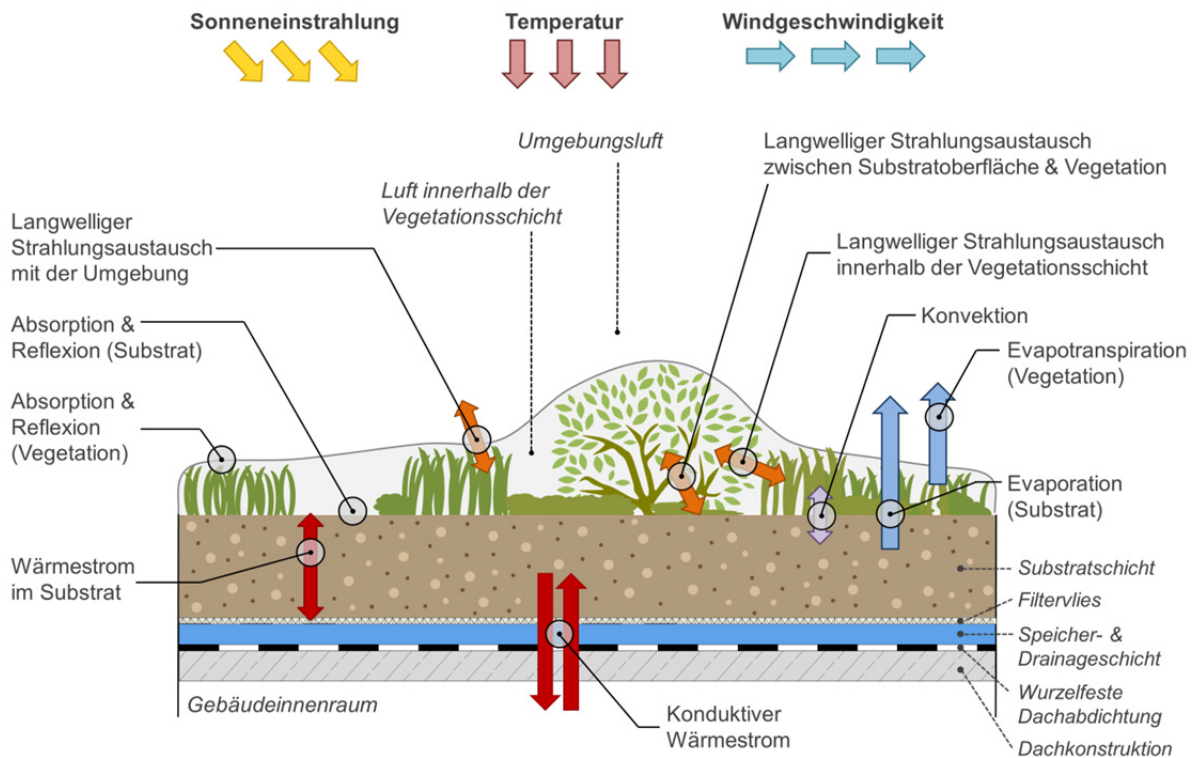
Komfort, einer verringerten gesundheitlichen Hitzebelastung und verbesserten nächtlichen Bedingungen für erholsamen Schlaf (Akbari et al. 2016, Berardi et al. 2014, Kontoleon & Eumorfopoulou 2010). Die Verschattungswirkung der Vegetation verhindert das Aufheizen des unterliegenden Baumaterials des Daches bzw. der Fassade. Im Vergleich zu dunklen Bitumendächern erzielt die Dachbegrünung außerdem durch ihre höhere Albedo (ca. 0,7 - 0,85) eine Vergrößerung des reflektierten Anteils der solaren Einstrahlung, wodurch ein Aufheizen der Oberfläche ebenfalls verringert wird (Berardi et al. 2014, Speak et al. 2013).

Messungen von Heusinger & Weber (2015) in Braunschweig zeigten an einem Sommertag eine um durchschnittlich 11 °C niedrigere Oberflächentemperatur auf einem extensiv begrünten Dach im Vergleich zu einem konventionellen Dach. Die maximale gemessene Verringerung betrug 17,4°C. In verschiedenen Studien konnte auch für begrünte Fassaden eine Reduktion der Oberflächentemperatur um 1,9 - 8,3°C (Eumorfopoulou & Kontoleon 2009), 12 - 20°C (Mazzali et al. 2013), 1,2 - 5°C (Perini et al. 2011) bzw. bis zu 15,5°C (Hoelscher et al. 2016) gemessen werden. Die unterschiedlichen Ausprägungen der Effekte sind auf unterschiedliche klimatische Bedingungen sowie die verwendete Begrünung zurückzuführen. Der Haupteffekt der Oberflächenabkühlung ist vor allem auf die Verschattung und zu einem geringeren Teil auf die Transpirationsleistung zurückzuführen (Hoelscher et al. 2016). Zusätzlich verringert sich durch die dämmende Wirkung der Vegetation die nächtliche Abkühlung, wodurch begrünte Dächer und Fassaden oft höhere Minimumtemperaturen der Oberfläche und damit eine geringere Temperaturamplitude aufweisen (Heusinger & Weber 2015, Hoelscher et al. 2016). Dies führt zu einer Verringerung der thermischen Beanspruchung der Dachhaut und einer dadurch verlängerten Materiallebensdauer.

Zusätzlich zur Verschattung, kann die Umgebungstemperatur des begrünten Daches oder der begrünten Fassade durch Verdunstungskühlung von Vegetation und Substrat gesenkt werden (Coutts et al. 2013, Theodosiou 2009). Heusinger & Weber (2015) geben dafür eine tagsüber um 0,27 °C kühlere Lufttemperatur in 0,5 m Höhe über einem begrünten Dach an (Braunschweig, Messperiode August-Dezember). Die maximal gemessene Abkühlung betrug 0,7 °C (August, 15 Uhr). Messungen in Singapur (tropisches Klima) zeigten eine Abkühlung der Umgebungslufttemperatur um bis zu 1,3 °C in 0,6 m bzw. 3,3°C in 0,15 m Entfernung zu einer begrünten Wand (Wong et al. 2010). Eine in Berlin durchgeführte Studie stellte dagegen vor einer begrünten Fassade keine nennenswerte Abkühlung der Umgebungsluft fest (Hoelscher et al. 2016). Als mögliche Ursache wird dort auf eine Vermischung der Umgebungsluft verwiesen.

Die auf begrünten Dächern beteiligten Wärmeströme sind in **Abbildung 6** dargestellt. Im Vergleich zu nicht begrünten Dächern und Fassaden treten bei begrünten Varianten ein höherer latenter Wärmestrom und ein verringerter sensibler Wärmestrom auf (Kolokotsa et al. 2013). Während auf konventionellen Dächern 95% der eintreffenden Strahlung in Wärme umgewandelt wird, sind dies bei extensiv begrünten Dächern nur 42%. Die restlichen 58% entfallen dagegen auf Verdunstungskälte (Pfoser et al. 2013). In Abhängigkeit von Standort, Art der Begrünung und Wasserverfügbarkeit beträgt der latente Wärmestrom begrünter Dächer zwischen 100 und 600 W/m<sup>2</sup>. Eine Bewässerung führt zu einer Erhöhung der Werte (Santamouris 2014).





**Abbildung 6** Wärmeübertragung auf begrüntem Dächern (eigene Darstellung basierend auf Berardi et al. (2014)).

Der erzielte Einfluss auf Dach- bzw. Wandtemperatur sowie auf die Umgebungstemperatur ist stark von folgenden Faktoren abhängig (Akbari et al. 2016, Bevilacqua et al. 2015, Blanusa et al. 2013, Cameron et al. 2015, 2014, Kolokotsa et al. 2013):

- **Begrünung:** intensiv oder extensiv, Vegetationsstruktur, Bedeckungsgrad (*leaf area index* – LAI), Dicke der Vegetationsschicht, Eigenschaften der verwendeten Pflanzenarten (z.B. Stomata Widerstand, solare Reflexion und Absorption, Wärmeleitfähigkeit, Morphologie, Transpirationsrate)
- **Substrat:** Substrattiefe, Beschaffenheit, Korngrößenverteilung, Dichte, Wasserhaltevermögen, Feuchtigkeit, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit
- **Wasserverfügbarkeit:** Zufuhr durch Niederschlag und/oder Bewässerung, Kapazität der Speicherschicht
- **Klima & Witterung:** Klimazone (Umgebungstemperaturen, Luftfeuchtigkeit, etc.), solare Einstrahlung (gegebene Einstrahlung, Verschattungsgrad, Neigungswinkel und Ausrichtung), Windgeschwindigkeit, Dauer, Intensität und zeitliche Abfolge von Feuchte- und Trockenperioden.

Zudem hat das Umfeld einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die erzielte Wirkung: Die gleiche Begrünungsmaßnahme erzielt im dicht bebauten Innenstadtbereich unter Umständen einen größeren Effekt als in Wohngebieten in Randlage (Žuvela-Aloise et al. 2016). Die Vielzahl an Einflussfaktoren zeigt, dass eine allgemeine Aussage zum Umfang

der zu erwartenden Wirkung schwer möglich ist, da sie standortbezogen ist. Ein Studienvergleich wird zusätzlich dadurch erschwert, dass keine standardisierte Methodik zur Erfassung der mikroklimatischen Effekte existiert (verschiedene Längen und Zeitpunkte der Messreihen, klimatische und witterungsbedingte Unterschiede etc.). Generell zeigen die Untersuchungen jedoch, dass der Kühlungseffekt für die Umgebung umso größer ist, je trockener und wärmer das Klima der Region ist. Allerdings können auch unter humiden Klimabedingungen mikroklimatische Effekte gezeigt werden (Alexandri & Jones 2008, Berardi et al. 2014).

Die durch Evapotranspiration erzielte Kühlung korreliert mit der zur Verfügung stehenden Feuchtigkeit, weshalb in Trockenzeiten mit einer stark reduzierten Kühlwirkung durch Evapotranspiration zu rechnen ist. Andererseits kann eine gegebenenfalls vorgenommene Bewässerung – auch ohne vorliegenden Trockenstress über den Mindestbedarf der Pflanzen hinaus – positive Auswirkungen auf die Kühlwirkung haben (Bevilacqua et al. 2015, Cheng et al. 2010, Coutts et al. 2013, Kolokotsa et al. 2013). So ergaben Messungen von Bevilacqua et al. (2015) und von Köhler et al. (2003) eine stärkere Temperaturabnahme nach Niederschlagsereignissen und der in Folge dessen kurzzeitig verbesserten Wasserverfügbarkeit. In der Studie von Bevilacqua et al. (2015) führte ein höherer Bedeckungsgrad bei gleichbleibend geringer Feuchtigkeit im Substrat nur zu einem geringen Kühleffekt. Erst mit höherer Wasserverfügbarkeit und einer damit einhergehenden höheren Evapotranspiration konnte ein größerer Kühleffekt beobachtet werden. Allerdings steht die Bewässerung extensiv begrünter Dächer vor allem in trockenen Gebieten mit knappen Wasserreserven während sommerlicher Trockenzeiten häufig in Konflikt mit anderen Wassernutzungen.

Andere Studien zeigen darüber hinaus, dass der Bedeckungsgrad ebenfalls ein wichtiger Faktor ist, da freiliegendes Substrat bei unvollständiger Vegetationsbedeckung zu einer Erhöhung der Oberflächen- und Umgebungslufttemperatur führen kann. Grund hierfür sind das beschleunigte Austrocknen des Substrats sowie die geringere Wärmekapazität gegenüber einer dichten Vegetation (Speak et al. 2013). Unsachgemäße Bepflanzung und Lücken im Bestand sollten daher unbedingt durch sorgfältige Anlage und Pflege der Begrünung vermieden werden.

Die verwendeten Arten und die Artenzusammensetzung beeinflussen die Kühlwirkung ebenfalls. In Abhängigkeit der pflanzenspezifischen Eigenschaften wie beispielsweise Transpirationsrate, Blattgröße und Albedo unterscheidet sich die erzielte Wirkung (Blanusa et al. 2013, Cameron et al. 2014, Kolokotsa et al. 2013). Durch die vegetationspezifische saisonale Variabilität zeigen sich außerdem Unterschiede im Jahresgang (Bevilacqua et al. 2015). Bei der Auswahl geeigneter Pflanzen muss zwischen der Fähigkeit zur Verbesserung des Mikroklimas und der Widerstandsfähigkeit gegenüber extremen Wetterbedingungen unterschieden werden. So können beispielsweise viele Sedum-Arten länger als Gräser oder krautige Pflanzen unter den harschen Bedingungen, die auf einem Dach herrschen, überleben (Cook-Patton & Bauerle 2012, Nagase & Dunnett 2010). Untersuchungen von Blanusa et al. (2013) ergaben, dass beispielsweise eine Bepflanzung mit *Stachys* eine bessere Kühlleistung erzielt als das trockenheitstolerantere *Sedum*. In diesem Sinne muss je nach lokaler Situation eine Abwägung zwischen der Maximierung der mikroklimatischen

Wirkung und einer möglichst hohen Trockenheitstoleranz stattfinden. Es hat sich aber auch gezeigt, dass eine möglichst diverse Mischung an Arten einen effektiveren Nutzen erbringen kann als eine Monokultur (Cook-Patton & Bauerle 2012).

Generell existieren in der Literatur bisher wenig quantitative Daten auf Stadtebene darüber, welche kühlende Wirkung bei entsprechender Flächendeckung durch Gebäudebegrünungen zu erwarten sind bzw. wie viele Dachflächen einer Stadt begrünt werden müssen, um einen definierten Temperatureffekt zu erzielen. Dies scheitert zum einen am Fehlen geeigneter Monitoringmaßnahmen, sowie daran, dass bislang keine stadtweit flächendeckende Begrünung umgesetzt wurde, die sich für direkte Messungen eignen würde. Um das Minderungspotential dennoch abzuschätzen, wurden bislang vor allem mesoskalige Simulationen durchgeführt und sensible und latente Wärmeströme auf existierenden Gründächern ausgewertet. Bei der Kalkulation potentiell möglicher Temperatureffekte auf Stadtebene ist zu beachten, dass auf Grund baulicher Anforderungen bei Weitem nicht jede vorhandene Dach- oder Fassadenfläche von Gebäuden für eine Begrünung geeignet ist (Heusinger & Weber 2015). **Tabelle 2** gibt einen Überblick über einige auf Stadtebene durchgeführte Simulationen. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass auch Ergebnisse aus anderen Klimazonen betrachtet werden, die nur bedingt auf Deutschland übertragen werden können.

**Tabelle 2** Temperaturminderungspotential begrünter Dächer auf Stadtebene (nach Santamouris (2014), übersetzt aus dem Englischen und z.T. ergänzt).

Referenz	Stadt	Art der Studie	Gründach	Ergebnisse
Smith & Roebber (2011)	Chicago, USA	Simulation (Weather Research & Forecasting Model)	extensiv	Urbane Temperaturen zwischen 18 und 23 Uhr waren 2-3 K kühler verglichen zu den simulierten Temperaturen ohne die Nutzung begrünter Dächer
Rosenzweig et al. (2006)	New York, USA	Simulation (MM5)	extensiv	Spitzentemperaturen in 2m Höhe verringert um 0,37-0,76 K; durchschnittlich 0,1 bis 0,8 K Temperaturreduktion in Bodennähe bei Begrünung von 50% der Dächer in NYC
Chen et al. (2009)	Tokio, Japan	Simulation (CSCRC Modell)	extensiv	Fast zu vernachlässigender Einfluss auf Straßenniveau bedingt durch die großen Höhen der begrünten Hochhäuser
Ng et al. (2012)	Hong Kong, China	Simulation (ENVI-met)	extensiv	

Der tatsächliche Temperatureffekt ist auf Stadtebene neben den oben genannten Einflüssen auch stark vom prozentualen Anteil begrünter Dächer, dem Verhältnis von Dachfläche zu anderer (vor allem versiegelter) Fläche und der Stadtstruktur (Gebäudehöhe und -geometrie, Bebauungsdichte, etc.) abhängig (Alexandri & Jones 2008, Chen et al. 2009, Ng et al. 2012). Die positive Wirkung auf Straßenniveau nimmt vor allem mit zunehmender Gebäudehöhe

stark ab und ist bei Hochhäusern nur noch marginal bzw. nicht vorhanden (Ng et al. 2012 und Chen et al. 2009). Vor allem bei extensiver Begrünung von Schräg- oder Steildächern mit höherem Neigungswinkel gewinnt zudem die Ausrichtung des Gebäudes durch den unterschiedlichen Strahlungseinfall im Tagesverlauf an Einfluss (Alexandri & Jones 2008).

Der Kühlungseffekt der Fassadenbegrünung ist in verhältnismäßig schmalen Straßen größer als bei breiteren Straßen, in denen die Lufttemperatur zunehmend von der horizontalen, versiegelten Straßenfläche beeinflusst wird (Alexandri & Jones 2008). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Lufttemperatur stärker durch horizontale Flächen beeinflusst wird als durch vertikale Flächen, welche im Tagesverlauf einer geringeren solaren Einstrahlung ausgesetzt sind. Modellergebnisse von Alexandri & Jones (2008) zeigen darüber hinaus, dass in allen Klimazonen eine Kombination aus begrünten Dächern und Fassaden den größten Kühlungseffekt erzielt. Um diese Effekt auch auf Straßenniveau und über größere Stadtgebiete hinweg zu erreichen, wird eine Kombination aus verschiedenen Begrünungsmaßnahmen (Dachbegrünung, Fassadenbegrünung, Parks, Grünflächen, Straßenbäume, etc.) als am effektivsten angesehen (Alexandri & Jones 2008, Rosenzweig et al. 2006).

Betrachtet man das thermische Wohlbefinden, so werden in der Human-Biometeorologie neben der Lufttemperatur verschiedene weitere Faktoren wie beispielsweise die relative Luftfeuchtigkeit, die Windgeschwindigkeit und die solare Einstrahlung berücksichtigt und in verschiedenen Bewertungsindizes zusammengefasst. Beispiele hierfür sind die physiologische Äquivalenttemperatur (*physiological equivalent temperature*, PET) und der *Universal Thermal Climate Index* (UTCI) (Alexandri & Jones 2008, Pfoser et al. 2013). Aus diesem Grund sollte zur Bewertung des Nutzens von Begrünungsmaßnahmen neben der reinen Luft- und/oder Oberflächentemperatur auch der fühlbare thermische Komfort untersucht werden, da dieser für das Wohlbefinden und die Gesundheit der Stadtbewohner eine große Bedeutung besitzt.

### **3.1.2 Umwelt, Luft- und Lebensqualität**

Begrünte Dächer und Fassaden tragen durch die Minderung von Luftschadstoffen mittels trockener Deposition zu einer Verbesserung der Luftqualität ebenso bei, wie zur Reduktion von CO<sub>2</sub>. Auch Nitrat- und Ammoniumstickstoff oder andere in Niederschlägen enthaltene Stoffe können so gebunden werden (Berndtsson et al. 2009, Cameron et al. 2014, FBB 2011, Manso & Castro-Gomes 2015, Price et al. 2015). Für die Verbesserung der Luftqualität spielen besonders Moose eine wichtige Rolle, da sie durch ihre sehr große relative Oberfläche gute Fähigkeiten zur Feinstaubbindung besitzen (Erlach 2012). Auch Lärmemissionen auf Straßenniveau können durch begrünte Fassaden in Form einer direkten Absorption von Geräuschen und einer Verringerung von Klangreflexionen an harten Gebäudeoberflächen reduziert werden. Auf Gebäudeebene bieten auch begrünte Dächer eine Schalldämmung und können zum Schallschutz für das Gebäude beitragen (Akbari et al. 2016, Berardi et al. 2014, FBB 2011, Kontoleon & Eumorfopoulou 2010).

Die visuelle Aufwertung des Wohn- und Arbeitsumfeldes durch Begrünungsmaßnahmen wird von vielen Menschen als sehr positiv für die allgemeine Lebensqualität empfunden (FBB 2011, Köhler 2008, Mangone & van der Linden 2014). Unter Umständen kann sich der

positive psychologische Effekt der Begrünung sogar stärker auf die Produktivität auswirken, als die physiologische Wirkung (Mangone & van der Linden 2014). Werden neben sommergrünen auch immergrüne Pflanzen eingesetzt, bietet die Begrünung ganzjährig eine optische Aufwertung. Durch den Einsatz einer artenreichen Begrünung und einer Mischung aus frühblühenden und spätblühenden Pflanzen, kann die Blütezeit zudem gezielt verlängert werden. Dies ist nicht nur aus ästhetischen Gründen wünschenswert, sondern auch für den ökologischen Mehrwert (Ansel 2016).

Aus ökologischer Sicht stellen begrünte Fassaden wie auch Dachbegrünungen wertvolle (Ersatz-)Lebensräume in ansonsten stark versiegelten Gebieten für verschiedene Tierarten dar und tragen zur Erhöhung der urbanen Biodiversität bei. Durch die Bereitstellung unterschiedlicher Habitats (z.B. durch den Einsatz von Totholz und verschiedener Substrattiefen auf dem Dach) kann eine höhere Biodiversität erreicht werden. (Breuning 2008, Cameron et al. 2014, FBB 2011, Francis & Lorimer 2011, Loh 2008, Manso & Castro-Gomes 2015). Sogar die Kultivierung von Gemüsepflanzen als eine Form des „*urban gardening*“ oder die Haltung von Bienen („*urban beekeeping*“), denen die Blütenpflanzen als Nahrungsgrundlage dienen können, ist je nach Art der Begrünung möglich (Breuning 2008, Dunnett & Kingsbury 2008, Loh 2008, Naturkapital Deutschland 2016). Zuletzt profitieren Gebäudebesitzer bei guter Instandhaltung der Begrünung auch durch einen gesteigerten Wert ihrer Immobilie, resultierend aus einer optischen Aufwertung der Gebäude und der gesteigerten Attraktivität der Wohnviertel. So bieten beispielsweise Dachgärten oder begrünte Sportflächen auf Gebäuden viele Nutzungsmöglichkeiten und damit eine gesteigerte Lebensqualität für die Stadtbewohner (Manso & Castro-Gomes 2015). Ohne regelmäßige und fachgerechte Pflege können andererseits jedoch unerwünschte Schäden und Wucherungen der Pflanzen auftreten, welche eher zu einer optischen Abwertung und verringerten Attraktivität des Viertels führen können (Pfoser et al. 2013). Darüber hinaus können Gebäudebegrünungen wie auch die andere städtische Vegetation negative gesundheitliche Folgen haben – beispielsweise durch die Verstärkung von Allergien (Naturkapital Deutschland 2016).

## **3.2 Urbanes (Regen)Wassermanagement**

### **3.2.1 Regenwasserrückhaltung und Abflussverzögerung**

Begrünte Dächer können ein wichtiges Element für das urbane Regenwassermanagement darstellen. Sie wirken dabei auf zwei Arten: durch Niederschlagsrückhaltung und Abflussverzögerung. Die Niederschlagsrückhaltung entsteht vor allem durch die (Zwischen)Speicherung des Wassers in Substrat und Drainageschicht. Das überschüssige Wasser fließt von dort nach Sättigung der Schichten zeitverzögert und über einen längeren Zeitraum hinweg ab. Dies wird als Abflussverzögerung bezeichnet. Somit werden Abflussspitzen gedämpft, wodurch die kommunalen Entwässerungssysteme entlastet und die Gefahr von durch Starkregen induzierten urbanen Überflutungen verringert wird. Wichtig bei der Bewertung der Maßnahmeneffektivität ist die Kapazität der Wasserrückhaltung (Wasservolumen in Bezug auf Regenmengen und -dauer) und die Abflussverzögerung (zeitlicher Versatz von Abflussspitzen) (Anwar et al. 2012, Erlach 2012, Mentens et al. 2006,

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin 2010, VanWoert et al. 2005, Vijayaraghavan 2016). Auch begrünte Fassaden können zur Rückhaltung von Regenwasser und zur Abflussverzögerung beitragen (Cameron et al. 2014, Loh 2008, Manso & Castro-Gomes 2015), jedoch ist der Beitrag vertikaler Grünflächen im Vergleich zu horizontalen, begrünten Dächern deutlich geringer.

**Tabelle 3** Abflussbeiwert C und Jahresabflussbeiwerte von Dachbegrünungen (Angaben der Jahresabflussbeiwerte für Standorte mit 650-800mm Jahresniederschlag) (nach FLL (2008)).

Art der Begrünung	Aufbaudicke	Abflussbeiwert C		Jahresabflussbeiwert ( $\Psi_a$ ) Versiegelungsfaktor
		Dachneigung bis 5°	Dachneigung >5°	unabhängig von der Dachneigung
Extensive Begrünung	> 2 – 4 cm	C = 0,7	C = 0,8	0,60
	> 4 – 6 cm	C = 0,6	C = 0,7	0,55
	> 6 – 10 cm	C = 0,5	C = 0,6	0,50
	> 10 – 15 cm	C = 0,4	C = 0,5	0,45
Intensive Begrünung	15 – 25 cm	C = 0,3	k.A.	0,40
	> 25 – 50 cm	C = 0,2	k.A.	0,30
	> 50 cm	C = 0,1	k.A.	≤ 0,10

In der Dachbegrünungsrichtlinie der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL 2008) sind Werte für die Abflusskennzahl C und die Wasserrückhaltung im Jahresmittel ( $\Psi_a$  / Versiegelungsfaktor) festgelegt (siehe **Tabelle 3**), welche sich je nach Aufbauhöhe unterscheiden. Das Potential begrünter Dächer zur Wasserrückhaltung und Abflussverzögerung wird maßgeblich durch Tiefe, Art und Material der Substratschicht, Aufbau und Speicherkapazität der Drainageschicht, Struktur, Bedeckungsgrad und Transpirationsleistung der Bepflanzung beeinflusst (Anwar et al. 2012, Mentens et al. 2006, VanWoert et al. 2005, Vijayaraghavan 2016, Villarreal & Bengtsson 2005). Die Substrattiefe ist hierbei der einflussreichste Faktor (Mentens et al. 2006), doch auch die Ausprägung der Drainageschicht hat einen entscheidenden Einfluss. So gibt es beispielsweise spezielle Retentionsdächer, die mit einer ausgeprägten Drainageschicht ausgestattet sind (siehe Beispiel in **Abbildung 7**). Das Wasser wird darin auf langen Wegen umgeleitet, um so eine möglichst große Verzögerung des Abflusses zu erreichen (Ansel 2016). Zusätzlich spielen die klimatischen Bedingungen (z.B. Lufttemperatur und -feuchtigkeit), die Niederschlagsmenge sowie die Vorsättigung des Substrats eine entscheidende Rolle für die Regenrückhaltefähigkeit des Gründaches. Letztere ist auch bedingt durch den zeitlichen Abstand zwischen einzelnen Niederschlagsereignissen. Die Retentionskapazität regeneriert sich zudem im Sommer nach einem Niederschlagsereignis auf Grund erhöhter Evaporation und Transpiration schneller als im Winter (Mentens et al. 2006, Poë et al. 2015, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin 2010, Stovin et al. 2015, 2012).



**Abbildung 7** Retentionsdach auf einem Gebäude der Wasserwerke Bochum. Laut Herstellerangaben beträgt der Spitzenabfluss C (nach FLL) 0,01 – 0,17 bei 1° Dachneigung (Foto © OPTIGRÜN).

Auch die Vegetationsstruktur beeinflusst die Wirkung des Daches: höher wachsende Pflanzen mit größerem Durchmesser und Pflanzenvolumen sowie einem ausgedehnteren Wurzelsystem vergrößern das Wasserrückhaltevermögen und die Abflussverzögerung wegen der stärkeren Interzeption und einer erhöhten, über die Wurzeln aufgenommene Wassermenge (Nagase & Dunnett 2012). Allerdings kann ein sehr dichtes, feinfaseriges Wurzelsystem die Porosität des Substrates und damit die Rückhaltefähigkeit verringern (Maclvor & Lundholm 2011). Im direkten Vergleich waren Gräser am effektivsten für die Wasserrückhaltung geeignet, gefolgt von krautigen Arten und Sedum (Nagase & Dunnett 2012).

Zum Einfluss der Dachneigung existieren bislang widersprüchliche Ergebnisse. Während beispielsweise Mentens et al. (2006) und Bengtsson (2005) keine signifikante Korrelation zwischen der Dachneigung und dem jährlichen Abfluss bzw. der Abflussverteilung feststellen, kommen Villarreal & Bengtsson (2005) und VanWoert et al. (2005) auf Basis von Messungen nach und während einzelner Niederschlagsereignisse zu dem Ergebnis, dass die Rückhaltefähigkeit mit steigendem Neigungswinkel abnimmt. Das Wasserspeichervermögen von Dachbegrünungssystemen variiert nach Herstellerangaben zwischen 20 und 50 l/m<sup>2</sup> für extensiv begrünte Dächer und zwischen 40 und 320 l/m<sup>2</sup> für intensiv begrünte Dächer (Bauder 2016, Optigrün 2016, ZinCo 2016). Besonders wichtig ist hierbei, dass mit steigender Wasserspeicherkapazität auch das wassergesättigte Gesamtgewicht steigt, wodurch sich besondere Anforderungen an die Statik des Gebäudes ergeben. Als grobe Näherung liegt das Gesamtgewicht extensiver Leichtgründächer bei ca. 50-70 kg/m<sup>2</sup>, wohingegen intensiv begrünte Dachgärten bis zu über 1000 kg/m<sup>2</sup> erreichen können (Bauder 2016, Optigrün 2016, ZinCo 2016). Das höchste Rückhaltepotential entsteht generell durch den Einsatz von Substrat mit hoher Speicherkapazität und einer entsprechend ausgeprägten Drainageschicht, die z.B. über Mäander und Abstandshalter verfügt. Aus diesen Grund weisen intensive Dachbegrünungen im Regelfall ein höheres Wasserrückhaltepotential auf

als extensive Dachbegrünungen (siehe auch **Tabelle 3**) (Anwar et al. 2012, Mentens et al. 2006). Einen Spezialfall bilden sogenannte Retentionsdächer, welche für eine möglichst starke Abflussverzögerung konstruiert sind und über eine entsprechende Drainageschicht verfügen. Retentionsdächer können extensiv oder intensiv begrünt sein (Ansel 2016, Bauder 2016, Optigrün 2016, ZinCo 2016). Eine hohe Wasserspeicherkapazität – ob im Substrat oder in der Drainageschicht – ist jedoch mit einem höheren Gesamtgewicht verbunden. Varianten mit hohem Gewicht lassen sich aufgrund statischer Anforderungen häufig schwerer auf Bestandsgebäuden nachrüsten. Sie eignen sich aus diesem Grund häufig besser für Neubauten, während die leichteren, extensiven Varianten auch im Bestand als Anpassungsmaßnahme nachgerüstet werden können (Anwar et al. 2012).

Bei Starkregenereignissen können Gründächer jedoch in Bezug auf das Rückhaltevermögen an ihre Grenzen stoßen, da sich die Niederschlagsrückhaltung umgekehrt proportional zur Niederschlagsintensität verhält. Das bedeutet, dass die prozentuale Regenrückhaltung mit zunehmender Niederschlagsintensität abnimmt (Stovin et al. 2015, 2012). Bei der Interpretation des jährlichen Rückhaltevermögens ist daher in Bezug auf Starkregen Vorsicht geboten: eine jährliche Rückhaltung von beispielsweise 60% bedeutet nicht, dass zwangsläufig auch 60% bei Starkregenereignissen zurückgehalten werden (Stovin et al. 2012).

Dies zeigt sich in einer Untersuchung von Stovin et al. (2015) auf neun verschiedenen Gründächern. Hier wurde im Falle von relativ leichten Niederschlagsereignisse (<10 mm) eine typische Rückhaltung von >80% verzeichnet. Bei stärkeren Niederschlägen war die Rückhaltung dagegen signifikant geringer. Wird die Rückhaltekapazität des Dachs überschritten, wird der zusätzliche Niederschlag direkt ohne Verzögerung als Abfluss abgegeben (Stovin et al. 2015, VanWoert et al. 2005). Bei sehr starkem Niederschlag besteht zudem besonders auf geneigten Dächern die Gefahr der Erosion des Substrates. Die Erosionsgefahr ist umso höher, je mehr Substrat frei liegt. Indes wirkt die Bepflanzung der Erosion entgegen, weshalb einer ausreichenden Vegetationsbedeckung hier eine wichtige Rolle im Erosionsschutz zukommt. Bei stärker geneigten Dächern müssen zusätzlich technische Vorkehrungen getroffen werden, um Erosion zu verhindern (VanWoert et al. 2005). Durch die genannten Grenzen der Regenwasserrückhaltung bei Starkniederschlägen können Gründächer immer nur eine Teilkomponente eines optimierten urbanen Regenwassermanagementsystems darstellen (Anwar et al. 2012). Die große Stärke der Dachbegrünung liegt vielmehr in Zeiten mit einem gleichmäßigeren Niederschlagsmuster (Fang 2010, Ye et al. 2011).

### **3.2.2 Kombination von Gebäudebegrünung mit blauer Infrastruktur**

Unter blauer Infrastruktur wird im Allgemeinen der Einsatz von Wasserelementen (beispielsweise offene Wasserflächen in Form von Seen, Teichen oder Wasserläufen) verstanden. Da die Wasserverfügbarkeit und -versorgung einen entscheidenden Einfluss auf die Wirkung der Begrünung haben, sollte die die Wassersituation der Umgebung in der Planung der Begrünung berücksichtigt werden. Im Idealfall werden blaue und grüne Infrastrukturelemente kombiniert. Für ein optimales Ergebnis bedarf es eines nachhaltigen Gesamtkonzepts. In städtischen Gebieten wird nicht nur die Versickerung durch eine Versiegelung von Flächen erschwert. Zusätzlich hat auch die geminderte



Verdunstungsleistung einen negativen Einfluss auf das Stadtklima. Aus diesem Grund sollte die Maßnahmenplanung das Thema Verdunstung besonders berücksichtigen (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin 2010). Der gezielte Einsatz grüner und blauer Infrastrukturen trägt hierzu maßgeblich bei.

Neben begrünten Dächern kommen seit kurzem beispielsweise in New York City auch sogenannte „blaue Dächer“ (*blue roofs*) zum Einsatz, auf denen Wasser temporär in Speicherschichten oder kleinen Wasserbecken gestaut werden kann (Bloomberg & Holloway 2010). Diese dienen der einfachen Wasserrückhaltung und Abflussverzögerung. Sie sind kostengünstiger und haben einen einfacheren Aufbau als Gründächer und sind deshalb leichter nachzurüsten. Das dort zurückgehaltene Wasser kann potentiell zur Bewässerung genutzt werden. Die positive Wirkung einer Dachbegrünung über die Regenwasserrückhaltung und Abflussverzögerung hinaus (z.B. in Bezug auf Biodiversität und Ästhetik) fehlt den „blauen Dächern“ jedoch.

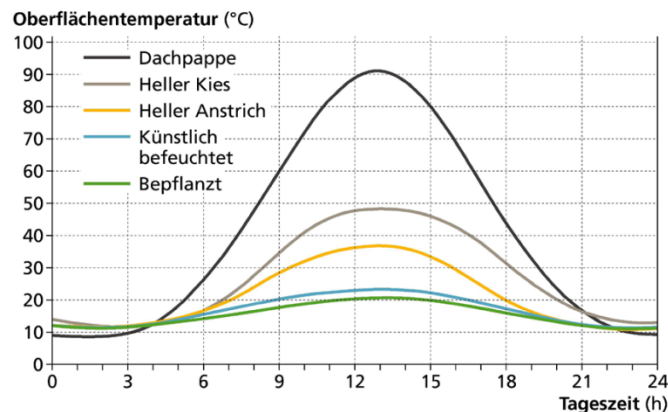
Generell kann eine Kombination verschiedener grüner und blauer Infrastrukturmaßnahmen auf verschiedene Arten erreicht werden. Zum einen kann das vom begrünten Dach aufgefangene und nicht von den Pflanzen genutzte Wasser gespeichert und weiterverwendet werden – beispielsweise für Wasserflächen in der Freiraumgestaltung oder zur Betriebswassernutzung. Dabei ist jedoch die mögliche Anreicherung mit Dünge- und Pflanzenschutzmitteln zu beachten. Je nach geplanter Weiterverwendung des Wassers muss der Einsatz von zugesetzten Düngemitteln entsprechend abgestimmt werden. Umgekehrt kann in trockenen Zeiten ein Teil des Wassers aus blauen Infrastrukturelementen oder Regenwasserzisternen zur Bewässerung grüner Elemente genutzt werden. Wird aufgefangenes Regenwasser für die Bewässerung genutzt, sollte auch dieses auf Schadstoffe wie beispielweise aus Baumaterialien emittierte Stoffe überprüft werden, da diese sich negativ auf die Vegetation auswirken könnten (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin 2010).

### **3.3 Thermische und energetische Wirkung auf Gebäudeebene**

Neben der Wirkung auf Stadtebene bieten begrünte Dächer und Fassaden auch verschiedenen Nutzen für das begrünte Gebäude. Anders als bei den Effekten, die erst bei entsprechender Flächendeckung auf Stadt- oder Quartiersebene auftreten, ist der thermische und energetische Effekt für einzelne Gebäude dabei weitgehend unabhängig davon, ob die umgebende Bebauung ebenfalls begrünt ist. Im Gegensatz zum begrünten Dach, welches sich auf Gebäudeebene vor allem positiv auf das oberste Stockwerk auswirkt, werden die Vorteile der Fassadenbegrünung allen Etagen zu Teil. Insbesondere die natürliche Temperaturregulierung und die damit einhergehende Energieeinsparung birgt so großes Potential für das gesamte Gebäude (Price et al. 2015).

Im Sommer wirkt die Begrünung auf zwei Arten als „passive“ Lösung zum Kühlen von Gebäuden – einerseits durch die Verschattung der Gebäudehülle und andererseits durch die erhöhte Dämmwirkung der Substrat- und Vegetationsschicht. Konventionelle Dächer mit dunklen Bitumenbahnen können im Sommer Temperaturen von über 90°C zur Mittagszeit erreichen. Auf begrünten Dächern ist im Vergleich dazu sowohl die Spitztemperatur als

auch die Temperaturamplitude im Tagesverlauf weitaus geringer (Berardi et al. 2014, Cameron et al. 2014, Castleton et al. 2010, Cheng et al. 2010, Eumorfopoulou & Kontoleon 2009, Feng & Hewage 2014, Kuttler 2011, Loh 2008, Manso & Castro-Gomes 2015) (siehe **Abbildung 8**). Durch die geringere Temperaturbeanspruchung kann das verwendete Material eine längere Lebensdauer erreichen, wodurch sich Reparatur- und Sanierungskosten verringern (Davis & Hirmer 2015, Wong et al. 2010). Gebäudebegrünungen bieten außerdem einen erhöhten Schutz vor UV-Strahlung, Hagel und anderen mechanischen oder chemischen Schadstoffeinwirkungen (Davis & Hirmer 2015, Wong et al. 2010).



**Abbildung 8** Oberflächentemperaturen verschiedener Dachabdeckungen im Tagesverlauf (Quelle: Kuttler (2011), S. 5).

Im Winter wirkt bei begrünten Dächern vor allem die Substratschicht dämmend und verringert somit den Wärmeverlust des Gebäudes nach außen. Auch Fassadenbegrünungen können sich im Winter energetisch günstig auf das Gebäude auswirken, sofern immergrüne Pflanzenarten verwendet werden. Als Resultat der thermischen Wirkung kühlen die Außenwände weniger aus und es wird im Innenraum weniger Energie zum Heizen benötigt. (Cameron et al. 2015, Castleton et al. 2010, Feng & Hewage 2014, Kuttler 2011, Manso & Castro-Gomes 2015). Zu den entscheidenden Faktoren für die thermische Wirkung zählen die klimatischen Bedingungen sowie die Art der Begrünung (z.B. Substrattiefe, Pflanzenwahl, Bedeckungsgrad bzw. Dichte des Bewuchses, Existenz und Breite eines Luftzwischenraums zwischen Fassade und Begrünung) (Jaffal et al. 2012, Kontoleon & Eumorfopoulou 2010, Mazzali et al. 2013, Pérez et al. 2011, Safikhani et al. 2014).

Zudem spielt die Ausrichtung der Fassade eine große Rolle. Bei südexponierten Wänden, welche stark der Sonne ausgesetzt sind, können generell größere Temperaturreduktionen durch Verschattung erreicht werden. Bei Nordwänden, die keine direkte Sonneneinstrahlung erfahren, ist dieser Effekt dagegen geringer (Kontoleon & Eumorfopoulou 2010). Diese können dafür jedoch besonders im Winter von der dämmenden Wirkung der Fassadenbegrünung profitieren (Kuttler 2011). Dagegen kann die Verschattung einer Südwand im Winter gegebenenfalls sogar unerwünscht sein, da sie die Erwärmung der Wand durch Sonneneinstrahlung verhindert, welche während der kalten Jahreszeit durchaus erwünscht sein kann (FBB 2014). Dies sollte bei der Pflanzenauswahl (sommergrüne vs. immergrüne Arten) beachtet werden (siehe dazu auch Abschnitt 4.2).

Durch zunehmend striktere energetische Anforderungen an Gebäude, wie etwa festgelegt durch die jeweils aktuelle Version der Energieeinsparverordnung (EnEV<sup>1</sup>), werden Neubauten mit stetig verbesserter Dämmung und höheren U-Werten errichtet. Dadurch fällt der zusätzliche Energieeinspareffekt im Verhältnis zunehmend geringer aus. Laut Castleton et al. (2010) sparen Dachbegrünungen daher bei Gebäuden, die nach modernstem Standard gebaut sind, kaum zusätzliche Energie. Größeres Einsparpotential besteht dagegen beim Nachrüsten auf Bestandsgebäuden.

Insgesamt kann die Maßnahme der Gebäudebegrünung sowohl einen Beitrag zum Klimaschutz leisten, da Energie zur Beheizung bzw. zur Kühlung eingespart wird, als auch zur Anpassung an den Klimawandel, da kühlere Räume im Sommer die Auswirkungen von Hitzestress auf empfindliche Bevölkerungsgruppen wie kleine Kinder oder ältere Menschen verringert. Je besser das Gebäude jedoch bereits ohne Begrünung gedämmt ist, desto geringer ist der Effekt der Begrünung für den Innenraum (Castleton et al. 2010, Köhler 2008). In diesem Fall birgt der positive mikroklimatische Effekt für die Umgebung größeres Potential als die durch die Begrünung erzielte Energieeinsparung (Berardi et al. 2014).

---

<sup>1</sup> <http://www.enev-online.de/>

## 4. Praxis

### 4.1 Planung, Implementierung und Pflege

Für eine erfolgreiche und langfristig haltbare Begrünung von Dächern und Fassaden, ist eine sorgfältige, fachlich fundierte Planung, Ausführung, Instandhaltung und Pflege unerlässlich. Eine möglichst nachhaltige und ressourcenschonende Gestaltung der Gebäudebegrünung wird zudem durch den Einsatz von recycelten und lokal verfügbaren Materialien unterstützt (Chenani et al. 2015). Bei Dachbegrünungslösungen spielt neben der Berücksichtigung zusätzlicher Auflast auf das Dach auch Windsoglast, Verwehsicherheit, Absturzsicherung und die Abstimmung mit anderen Elementen (Dachaufbauten, Lüftungsrohre, PV-Anlagen etc.) eine wichtige Rolle (FBB 2010a). Auch bei der Fassadenbegrünung müssen die technischen Ansprüche (Verankerung, Zuglast, etc.) geprüft werden, um spätere Schäden zu vermeiden (Pfoser et al. 2013). Die regelmäßige Pflanzenpflege (Rückschnitt, ggf. Düngung und Bewässerung) sowie die Wartung der technischen Komponenten ist nicht nur notwendig, um die Funktionen der Begrünung als Anpassungsmaßnahme aufrecht zu erhalten, sondern auch um Schäden am Bau zu vermeiden. Die dadurch jährlich anfallenden Kosten, sollten deshalb nicht außer Acht gelassen werden.

Häufige Schadensursachen sind eine ungeeignete Pflanzenauswahl, eine für das Gebäude unpassende Begrünungstechnik, bautechnische Planungsfehler, Vorschädigungen des Gebäudes sowie mangelhafte Pflege und Wartung. Viele dieser Schäden lassen sich jedoch vermeiden (Pfoser et al. 2013). Vor allem die Dichtigkeit des Unterbaus muss vor der Installation der Dachbegrünung geprüft werden, um spätere Schäden und hohe Reparaturkosten zu verhindern (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin 2010). Für die Rahmenbedingungen bei der technischen Umsetzung wird hier auf die Richtlinien zur Dach- und Fassadenbegrünungen der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL 2016), die Fachregeln des Zentralverbandes des Deutschen Dachdeckerhandwerks sowie verschiedene weitere Qualitätsanforderungen (wie CE-Kennzeichnungen) hingewiesen (FBB 2010a).

Eine regelmäßige und fachgerechte Pflege ist die Grundvoraussetzung – einerseits für die Vermeidung von Schäden am Gebäude, andererseits für die Gewährleistung einer guten Funktionalität, Wirkung und Ästhetik. Der Aufwand und die Kosten unterscheiden sich hierbei je nach Begrünungsvariante stark. Eine gewisse Mindestpflege ist jedoch für jede Variante erforderlich, da die Vernachlässigung der Begrünung nicht nur zu Schäden am Gebäude, sondern auch zur Beeinträchtigung der positiven mikroklimatischen Effekte für das Umfeld führen kann (ÖkoKauf Wien 2013, Pfoser et al. 2013).

### 4.2 Pflanzenauswahl

Die Auswahl geeigneter Pflanzen sollte unter Berücksichtigung der heutigen wie auch der zukünftig zu erwartenden (mikro-)klimatischen Verhältnisse sowie der Ausrichtung und Exposition der Fassade oder des Daches (vor allem bei Schrägdächern) erfolgen (Loh 2008). Vor der Implementierung bedarf es einer sorgfältigen Prüfung der Anforderungen und

standörtlichen Gegebenheiten um eine Fehlauswahl und dadurch entstehende Schäden (z.B. bei sonnenempfindlichen Pflanzen) oder eine verminderte Wirkung (z.B. keine ausreichende Kletterhöhe) zu vermeiden (Price et al. 2015). Zu den zu berücksichtigenden Kriterien zählen unter anderem Wachstumsraten, klimatische Ansprüche, Windexposition, Frosthärte, Temperaturtoleranz, Präferenzen bezüglich Sonnen- oder Schattenstandorten, maximal erreichte Kletterhöhe (bei Kletterpflanzen), Blattgröße und -form, Pflegeaufwand, Nährstoffbedarf sowie die angestrebte Optik und Funktionalität der Begrünung (Appl & Mann 2012, Ip et al. 2010, Price et al. 2015). Zudem müssen bei Fassaden unterschiedliche Licht- und Feuchteverhältnisse, sowie Unterschiede in der Luftqualität in unterschiedlichen Höhen beachtet werden. Hier spielt bei bewässerten Fassaden die Form des Bewässerungssystems eine große Rolle (Loh 2008).



**Abbildung 9** Extensive Dachbegrünung des Oversum Vitalresorts in Winterberg, Baujahr 2012 (Foto © OPTIGRÜN).

Während den gestalterischen Möglichkeiten bei intensiv begrünten Dächern durch die gegebene Substrattiefe, die Pflege und die Bewässerung kaum Grenzen gesetzt sind, bieten sich für extensiv begrünte Dächer vor allem weniger pflegebedürftige und weniger anspruchsvolle Arten an, die auch eine zeitweilige Trockenheit gut überstehen. Auf Dächern mit nahezu 0° Neigung ist jedoch das zeitweise Auftreten von Staunässe möglich, so dass hier trockenheitstolerante Arten weniger gut geeignet sind. Der Benennung der Vegetationszusammensetzung liegt in der Praxis keine wissenschaftliche Systematik zu Grunde. Zumeist werden die am häufigsten vertretenen Pflanzengruppen zur Beschreibung des Vegetationsziels herangezogen (z.B. Sedum-Moos-Kraut Bewuchs), wobei die Übergänge zwischen den Typen fließend und nicht definiert sind.

Bei der Pflanzenauswahl für Fassadenbegrünungen besteht in Deutschland und anderen klimatisch gemäßigten Gebieten grundsätzlich die Wahl zwischen immergrünen und sommergrünen Pflanzen. Südexponierte Wände, die der Sonne stark ausgesetzt sind, profitieren im Sommer besonders vom Kühlungs- und Verschattungseffekt. Im Winter

verhindert eine Begrünung dagegen die Erwärmung der Wand durch die Sonne. Nordwände, die dagegen nie der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, profitieren auch im Winter von der dämmenden Funktion der Dachbegrünung und sollten daher bevorzugt mit immergrünen Arten besetzt werden (FBB 2014, GRÜNE LIGA Berlin e.V. 2016, Kuttler 2011, NABU Wedemark 2012).

Hinsichtlich der Langzeitwirkung der Maßnahme sollten die gewählten Pflanzen zudem auf ihre Klimawandeltauglichkeit, d.h. ihre Eignung unter den Bedingungen des Klimawandels, geprüft werden (siehe auch Abschnitt 5). Dazu sollten auf Basis regionaler Klimamodellensembles die möglichen, zukünftigen Entwicklungen beispielsweise im Hinblick auf die Dauer von Trockenphasen, die Anzahl heißer Tage sowie die Anzahl und Intensität von Extremwetterereignissen mit den aktuellen Werten verglichen und bewertet werden.

### **4.3 Kosten und Nutzen**

Viele Städte und Gemeinden bieten als Anreiz für die Begrünung von Gebäuden insbesondere Förderprogramme für Dachbegrünungen, teilweise auch schon für Fassadenbegrünungen. Gefördert werden meist freiwillige Begrünungsmaßnahmen, die nicht durch eine Auflage (z.B. einen Bebauungsplan) vorgeschrieben sind. Die Förderungen werden direkt durch einmalige Zuschüsse gewährt, die sich in der Regel nach der Größe und Ausgestaltung der Begrünung (z.B. an der Substrattiefe) bemessen. Eine weitere Fördermöglichkeit besteht in einer reduzierten Abwassergebühr (bei gesplitteten Abwassergebühren). Auskunftspflichtig sind hierbei in der Regel die Grünflächenämter, Umweltämter oder Bauämter der jeweiligen Städte und Kommunen (FBB 2010a).

Die zunächst höheren Kosten für den Bau eines Gründaches relativieren sich im Laufe der Jahre, da Gründächer bei fachgerechter Installation und Pflege in der Regel eine sehr viel längere Lebensdauer aufweisen, als konventionelle Flachdächer (Pfoser et al. 2013, Porsche & Köhler 2003, Tröltzsch et al. 2012). Zudem stehen den zunächst höheren Ausgaben und den laufenden Kosten für Wartung und Pflege verschiedene direkte und indirekte finanzielle Vorteile gegenüber. Für ein einzelnes Gebäude schlägt sich der Nutzen vor allem in Energieeinsparungen, einer verlängerten Materiallebensdauer, ggf. verringerten Abwassergebühren oder einem gesteigerten Immobilienwert nieder. Dazu kommen weitere indirekte Vorteile, die jedoch zunehmend schwieriger zu bewerten sind.

Die derzeit noch immer größte Herausforderung einer Kosten-Nutzen-Bewertung von Gebäudebegrünungen als Klimaanpassungsmaßnahme besteht in der Erfassung und Bewertung nicht-monetärer Vorteile ohne festgelegten Marktwert (Nurmi et al. 2013). Hierbei wird meist das Konzept der Ökosystemleistungen herangezogen (Naturkapital Deutschland 2016). Zu diesen zählen u.a. die erhöhte Biodiversität und die verbesserte Lebens- und Luftqualität, welche nur indirekt monetär erfasst werden können. Die Kosten-Nutzen-Betrachtung auf Stadtebene beinhaltet weitere komplexe Faktoren wie Einsparungen in der benötigten Kanalinfrastruktur durch die verbesserte Regenwasserrückhaltung. Zudem werden der Klimatisierungsbedarf und damit der Energieverbrauch nicht nur auf Grund der Dämmwirkung am einzelnen Gebäude gesenkt, sondern auch durch die Verminderung der urbanen Hitzeinsel auf Stadtebene. Durch die verbesserte Luftqualität z.B. durch verringerte

NO<sub>x</sub>-Konzentrationen, entstehen weiterhin positive Einflüsse auf die Gesundheit und daher verringerte Kosten im Gesundheitssektor (Niu et al. 2010).

Für die Abwägung der Kosten und Nutzen für eine einzelne Begrünungsmaßnahme kommt erschwerend hinzu, dass zwar der Hausbesitzer (ggf. bezuschusst durch Förderungen) die Kosten der Begrünungsmaßnahme trägt, sich für diesen jedoch nur ein Teil der Vorteile direkt monetär niederschlägt („private Vorteile“). Einige der Nutzen und finanziellen Vorteile kommen jedoch auch den Bewohnern im direkten Umfeld der Stadt zu Gute („öffentliche Vorteile“) (Nurmi et al. 2013). Sollte der private Nutzen die Kosten für Installation und Instandhaltung nicht übersteigen, ist es daher möglich, dass zwar der Gesamtnutzen potentiell größer wäre, der Anreiz für den Einzelnen jedoch nicht ausreicht, um eine Begrünung vorzunehmen (Nurmi et al. 2013). Dieses personelle Auseinanderfallen der Zuordnung von Kosten und Nutzen zeigt sich auch bei der Kapitalwertanalyse von begrünten Dächern und konventionellen Dächern.

Eine Studie von Niu et al. (2010) am Beispiel Washington zeigt, dass der Haupteinflussfaktor auf den Breakeven-Punkt auf Gebäudeebene die Kosten einer nach 20-Jahren fälligen Sanierung des konventionellen Daches ist. Auf Stadtebene verringerte sind währenddessen Infrastruktur- und Emissionskosten ausschlaggebend. Allerdings stellen sich viele der Vorteile auf Stadtebene nur bei einer ausreichend hoher Begrünungsrate ein, weshalb in der Praxis die Anreize für viele, einzelne Hausbesitzer groß genug sein müssen, um eine möglichst flächendeckende Begrünung zu erreichen (Nurmi et al. 2013). Ebenso wie viele der Vorteile auf Stadtebene vom Begrünungsgrad abhängen, können sich auch die Kosten mit zunehmender Verbreitung der Gebäudebegrünung ändern. Mit zunehmender Implementierungsrate und Vergrößerung des Anbietermarktes können Skaleneffekte auftreten. So sind die Installationskosten pro Quadratmeter Dachbegrünung in Deutschland durch die längere Historie geringer als beispielsweise in Finnland, wo die die Dachbegrünung noch weit weniger verbreitet ist (Nurmi et al. 2013).

Eine Untersuchung der Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel in Deutschland (Tröltzsch et al. 2012) im Auftrag des Umweltbundesamtes hat sich ebenfalls mit der Anpassungsmaßnahme „Grüne Dächer“ befasst. Im Vordergrund steht dabei die extensive Dachbegrünung. Hierbei zeigt sich, dass auf der Grundlage klassischer Kosten-Nutzen-Analysen ohne explizite Berücksichtigung von Umweltnutzen beispielsweise die Baukosten sowie auch die Wartungskosten von extensiven Begrünungen höher sind als bei einem Kiesdach. Trotzdem kommen Tröltzsch et al. (2012) zu der Einschätzung, dass sich grüne Dächer durch ihre längere Lebensdauer über den gesamten Lebenszyklus hinweg rechnen. Die Wirtschaftlichkeit wird zudem unter Einbezug und Bewertung weiterer Nutzenaspekte (vermiedene Gesundheitskosten, vermiedene Produktivitätseinbußen, verbessertes Regenwassermanagement) erhöht. Als Beispiel wird hier Vermeidung von hitzebedingten Todesfällen angesprochen: in der Stadt Düsseldorf könnten so – eine entsprechende Wirkung auf das Stadtklima vorausgesetzt – Nutzen in der Größenordnung von 4 bis 8 Mio. € pro Jahr generiert werden (Tröltzsch et al. 2012). Methodisch zeigt sich, dass insbesondere die Quantifizierung des Nutzens in der Regel noch immer auf stark vereinfachten Annahmen beruht und die tatsächliche Wirkung von Gründächern auf das Stadtklima sehr spezifisch von den jeweiligen Gegebenheiten abhängt. Zudem fallen Kosten

und Nutzen – wie zuvor bereits beschrieben – auf unterschiedlichen Ebenen an: die Kosten trägt der Hausbesitzer, während sich die positive Wirkung auch über den direkten Nutzen für das Gebäude hinaus auf Quartiers- oder Stadtebene zeigt.

Eine ausführliche Kosten-Nutzen-Analyse von Pfoser et al. (2013) fällt ebenfalls positiv zu Gunsten des Gründachs im Vergleich zum Kiesdach aus. Die Installationskosten werden hier mit 22€/m<sup>2</sup> für ein extensives Gründach (10cm Substrat) und mit 9€/m<sup>2</sup> für ein Kiesdach (5cm Kiesdeckung) angegeben. Pfoser et al. (2013) beziehen in ihre Analyse Investitionskosten (Begrünung bzw. Kies und Dachabdichtung unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Lebensdauer), laufende Wartungskosten, Niederschlagswassergebühren sowie eine Energiekostenreduktion (Heiz- bzw. Klimatisierungseinsparungen) mit ein. Eventuell unterschiedliche statische Erfordernisse und daraus entsehende Kosten wurden nicht betrachtet. Trotz der höheren anfänglichen Kosten für die Installation und Wartung, rechnet sich das extensive Gründach im Vergleich zum Kiesdach über den gesamten Lebenszyklus. Über eine Dauer von 50 Jahren (5% Diskontierung) beträgt der Barwert des extensiven Gründaches so ca. 75€/m<sup>2</sup>, der des Kiesdaches 77€/m<sup>2</sup>. Da in diesem Kostenvergleich keine Gründachförderung eingerechnet wurde, könnte eine zusätzliche Förderung die Gesamtkosten des Gründaches weiter senken (Pfoser et al. 2013).

In einem weiteren Teil der Kosten-Nutzen-Analyse von Pfoser et al. (2013) wurde die Kombination beider Dachtypen mit einer Photovoltaikanlage untersucht. Zusätzlich zu den zuvor genannten Faktoren wurden hier die Installations- und Wartungskosten der PV-Anlage sowie der Stromertrag verrechnet. Hier beträgt der Barwert des extensiven Gründaches mit PV-Anlage über eine Dauer von 50 Jahren (5% Diskontierung) und 114€/m<sup>2</sup>, der des Kiesdaches mit PV-Anlage 46€/m<sup>2</sup>. Mit der PV-Anlage auf dem Gründach lässt sich ein höherer Stromertrag erzielen (siehe hierzu auch Kapitel 4.4). Insgesamt kann dieser gesteigerte Gewinn die höheren Kosten jedoch nicht decken. Die höheren Kosten resultieren aus einem erhöhten Wartungsaufwand sowie aus den Kosten der gewählten Begrünungsvariante. Diese ist teurer als die Begrünungsvariante ohne PV-Anlage, da Verschattungsbereiche berücksichtigt werden müssen. „Weiche Faktoren“ wie die positive, mikroklimatische Wirkung und der ökologische Mehrwert sind in dieser Rechnung jedoch nicht abgebildet. Zusätzliche Fördermaßnahmen würden in diesem Fall Anreize für Hausbesitzer schaffen, sich dennoch für die Begrünung in Kombination mit Photovoltaik zu entscheiden und somit zur Klimaanpassung in der Stadt beizutragen (Pfoser et al. 2013).

#### **4.4 Kombination von Gründächern und Photovoltaik**

Anforderungen an Dämmung und Anlagentechnik von Neubauten wurden in den letzten Jahren durch Änderungen in der Energieeinsparverordnung (EnEV<sup>2</sup>) zunehmend verschärft. Da sich die Nutzung erneuerbarer Energien positiv auf die kalkulierte Bilanz des Gebäudes auswirkt, wird die zur Verfügung stehende Dachfläche immer häufiger durch Photovoltaikanlagen (PV) beansprucht, was auf den ersten Blick dazu führen könnte, dass diese Fläche nun für eine Dachbegrünung nicht mehr zur Verfügung steht. Tatsächlich ist es

---

<sup>2</sup> <http://www.enev-online.de/>



jedoch so, dass sich beide Nutzungen auf derselben Fläche nicht ausschließen, sondern sogar Synergien bilden können (FBB 2006, Hui & Chan 2011, Pfoser et al. 2013).

Der Ertrag der PV-Module wird durch ihre Temperatur beeinflusst, da der elektrische Widerstand mit steigender Temperatur zunimmt, wodurch sich wiederum die Leistung verringert. Synergien zwischen Gründächern und Photovoltaik können dadurch entstehen, dass die Betriebstemperatur der PV-Module durch die Begrünung gesenkt wird – zum einen aufgrund des Kühlungseffekts der Evapotranspiration, zum anderen aufgrund einer erhöhten Albedo im Vergleich zum Schwarzdach. Die kühleren Paneele erzielen so einen höheren Wirkungsgrad und die Effizienz der Energieerzeugung steigt (FBB 2006, Lamnatou & Chemisana 2015). Folglich dient die Begrünung für die PV-Anlage auch als Anpassungsmaßnahme an steigende Temperaturen. Köhler et al. (2007) konnten eine entsprechende Steigerung der Effizienz um ca. 6% gegenüber einem Schwarzdach nachweisen. Eine Messreihe der ZinCo GmbH (2011) ergab eine Leistungssteigerung von 4%. Das genaue Ausmaß der Effizienzsteigerung hängt jedoch stark von Systemdesign und -anordnung sowie den lokalen Gegebenheiten ab (Hui & Chan 2011).



**Abbildung 10** Kombination aus extensiver Dachbegrünung und einer Photovoltaikanlage auf dem Gebäude der Erich Kästner Schule in Langenfeld, Baujahr 2010 (Foto © OPTIGRÜN).

Im Gegenzug kommt die Verschattung durch die PV-Module der Vegetation zu Gute, indem direkte Sonneneinstrahlung und der in diesem Zusammenhang mögliche Trockenstress gemindert werden. Ergebnisse des Monitorings eines kombinierten Grün- und PV-Daches in Berlin zeigen ein verstärktes Wachstum der Pflanzen in den durch PV-Modulen zeitweise bzw. durchgehend verschatteten Bereichen (Köhler et al. 2007, 2002). Zusätzlich konnte dort eine Zunahme der Artenzahl und der räumlichen Variationen unter den Modulen gezeigt werden. In Fällen einer kombinierten Nutzung sollten bei der Pflanzenauswahl die durch die PV-Anlage veränderten Bedingungen berücksichtigt und für die Bereiche unter den Paneelen schattentolerante Pflanzen verwendet werden (Hui & Chan 2011).

Bei der Begrünung gilt es jedoch darauf zu achten, dass die Module nicht durch die Vegetation verschattet werden, weshalb sie vorsorglich erhöht auf Rahmen zu installieren sind. Zudem muss ein regelmäßiger Rückschnitt der Pflanzen entweder im Rahmen der Pflegemaßnahmen der Grünflächen oder bei der Wartung der Module eingeplant werden, um eine Verschattung und damit Leistungsabnahme der PV-Anlage zu verhindern. Zur Verringerung des Pflegeaufwands eignet sich vor allem eine extensive Begrünung mit niedriger Wuchshöhe (Appl & Mann 2012, Hui & Chan 2011, Köhler et al. 2002). Die Solarpaneele können auf speziellen Kunststoffplatten befestigt werden, welche anschließend mit Substrat bedeckt werden. Um auch die Pflanzen unter den Paneelen mit ausreichend Niederschlagswasser zu versorgen, kann das vom Modul abtropfende Wasser aufgefangen und mittels eines Kapillarvlieses unter die Module geleitet werden (Hui & Chan 2011, Optigrün 2016).

Bei der Wahl einer kombinierten Nutzung, sollte im Vorfeld nicht vergessen werden, dass das Dach für Instandhaltung und Wartung der PV-Anlage sowie für den Rückschnitt der Vegetation häufiger betreten werden muss. Dadurch treten zusätzliche Störungen für die Vegetation auf, welche nach Möglichkeit auf ein Minimum reduziert werden sollten, auch wenn sich eine völlige Störungsfreiheit durch den Wartungsbedarf nicht ermöglichen lässt (Köhler et al. 2007). Um die Standfestigkeit der PV-Anlage zu garantieren und sie gegen Schäden durch Windsog zu sichern, ist traditionell eine Verankerung der Stützen im Dachaufbau erforderlich, wodurch hohe Punktlasten an einzelnen Stellen entstehen können und eine Durchdringung der Dachhaut notwendig wird. In Kombination mit einer Dachbegrünung entfallen kostenaufwändige und schadensanfällige Dachdurchdringungsarbeiten, da das Begrünungssystem selbst genug Auflast bietet, um die Anlage zu beschweren. Zusätzlich verteilt sich die Auflast gleichmäßiger auf die Fläche als bei konventionellen Verankerungen (Appl & Mann 2012, FBB 2006, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin 2010).

Zusammenfassend bietet die Kombination von Dachbegrünungen mit Photovoltaikanlagen großes Potential durch gegenseitige Synergien und die effiziente Nutzung der Dachfläche. Beide Systeme stehen also nicht in gegenseitiger Konkurrenz. Da die Kombinationslösung jedoch erst in jüngerer Zeit verwendet wird, sind viele Fragen in Bezug auf langfristige Wechselwirkungen zwischen beiden Komponenten noch offen und bedürfen einer tiefergehenden Untersuchung.

#### **4.5 Gebäudebegrünung als Kompensationsmaßnahme**

Eine weitere aktuelle Diskussion aus dem Bereich der praktischen Anwendungsmöglichkeiten von Gebäudebegrünungen beschäftigt sich mit der Frage, ob und nach welchen Kriterien es möglich sein könnte, Kompensationsmaßnahmen in Form von Dachbegrünungen umzusetzen (Epping 2016). Grundsätzlich ist die Eingriffs-Ausgleich-Regelung das bedeutendste Instrument zur Durchsetzung von Belangen des Naturschutzes, mit dem Ziel eine generelle Verschlechterung für Natur und Landschaft zu unterbinden. Dazu sollen nicht vermeidbare Eingriffe durch Maßnahmen des Naturschutzes ausgeglichen werden (§§ 14 und 15 des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG 2015) sowie §§ 1a und

35 des Baugesetzbuches (BauG 2015)). Die aus Baumaßnahmen entstehenden Beeinträchtigungen der Natur sind funktional auszugleichen beziehungsweise es sind gleichwertige andere Aufwertungen vorzunehmen.

Die Kompensation im räumlichen und funktionalen Zusammenhang lässt sich erreichen, indem die beeinträchtigte Funktion des Naturhaushaltes am selben Ort zeitnah durch eine andere Maßnahme verbessert wird. Ebenso ist die Kompensation durch nicht-funktionale, aber „gleichwerte“ Maßnahmen mit oder in Ausnahmefällen ohne räumlichen Zusammenhang möglich (Schumacher & Fischer-Hüftle 2011). Im Zug der stetig voranschreitenden Nachverdichtung in Städten, die häufig auf Kosten von Grünflächen erfolgt, gerät zunehmend also auch die Frage in den Fokus, ob der Bau von Gründächern als Kompensationsmaßnahme bewertet werden kann, insbesondere, da ein räumlicher Zusammenhang der Flächen nicht unbedingt erforderlich ist. Außerdem stellt sich die Frage, ob bereits bestehende Gründächer nachträglich im Rahmen der „Flächen- und Maßnahmenbevorratung“ zu bestehenden Poolflächen zugeschlagen werden können.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass Dachbegrünungen nicht unter den rechtlichen Begriff des Ausgleichs, jedoch unter den des Ersatzes fallen könnten, da das Anlegen eines Gründaches zwar die Anforderungen der Gleichwertigkeit, jedoch nicht der Gleichartigkeit erfüllen kann (Epping 2016). Somit stellen sich ganz konkret die Fragen, ob, in welcher Weise und in welchem Umfang Dachbegrünungen einen Eingriff kompensieren können, welche Instrumente dafür zielführend wären und welche Kriterien hier angelegt werden können. Da dieser Bereich noch durch Forschungsbedarf gekennzeichnet ist, werden an dieser Stelle aufbauend auf Epping (2016) zunächst einige wesentliche Aspekte kurz skizziert.

Um die Nutzung von Dachbegrünungen als Kompensationsmaßnahmen erfolgreich zu implementieren, ist zunächst ein Bewertungsverfahren für die Eingriffe und die anschließende Berechnung des Kompensationsumfanges notwendig. Dazu muss eine Karte erstellt werden, die Angaben über die Bodenqualität, die Art der Bebauung und die Nutzung beinhalten sollte. In dieser sollten die Kriterien verankert sein, die Dachbegrünungen erfüllen müssen, um entsprechend angerechnet werden zu können. Darüber hinaus sollte die Statik der Dächer in einer weiteren Karte festgehalten werden, um Dächer für die mögliche Nutzung identifizieren zu können.

Als notwendiges Kriterium kann zunächst abgeleitet werden, dass Dachbegrünungen nur dann als Ersatzmaßnahme dienen können, wenn sie eine entsprechend hohe Biodiversität erwarten lassen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass auch extensive Gründächer – insbesondere durch eine artenreiche Bepflanzung und die Integration von unterschiedlichen Habitaten wie Totholz, unterschiedlichen Substrathöhen, Sand- und Kiesinseln – eine hohe Biodiversität aufweisen können. Bei intensiven Gründächern ist wiederum vor allem die Art der Nutzung relevant, so dass hier mitunter eine vielgenutzte und/oder monoton bepflanzte Fläche – wie oft gedüngter, regelmäßig getrimmter Rasen – tendenziell auch eine geringere Biodiversität aufweisen kann. Um einem möglichen Verfehlen der Zielsetzungen der Kompensationsmaßnahmen entgegen zu wirken, sollten die Maßnahmen hinsichtlich möglicher Auswirkungen durch klimatische Veränderungen geprüft werden. Somit sollten

Dachbegrünungen eine langfristig klimaresiliente Pflanzenvielfalt aufweisen, die standortspezifisch und wissenschaftlich fundiert angelegt wird. Zudem ist abzuwägen, ob ein Eingriff in den Naturraum in vollem Umfang durch ein Gründach ersetzt werden kann oder ob er – je nach Standort und Art der Begrünung – beispielsweise nur maximal bis zu 50% kompensiert werden kann, so dass der verbleibende Ausgleich ausschließlich auf traditionellem Wege erfolgt. Um in Zukunft Dachbegrünungen als Ersatzmaßnahmen nutzen zu können und dem Flächenkonflikt langfristig entgegen zu wirken, sollten zudem alle Neubauten direkt mit grünen Dächern geplant und gebaut werden. Zusätzlich können auch hinreichende Kriterien diskutiert werden, beispielsweise, dass die notwendigen Aufbauten, wenn möglich, aus nachwachsenden und lokal gewonnenen Rohstoffen hergestellt werden. Um über die eigentliche Funktion der Dachbegrünung auch die sozialen Vorteile, die Grünanlagen mit sich bringen, nutzen zu können, sollten die Dachbegrünungen nach Möglichkeit für ergänzende Nutzungen zugänglich gemacht werden.

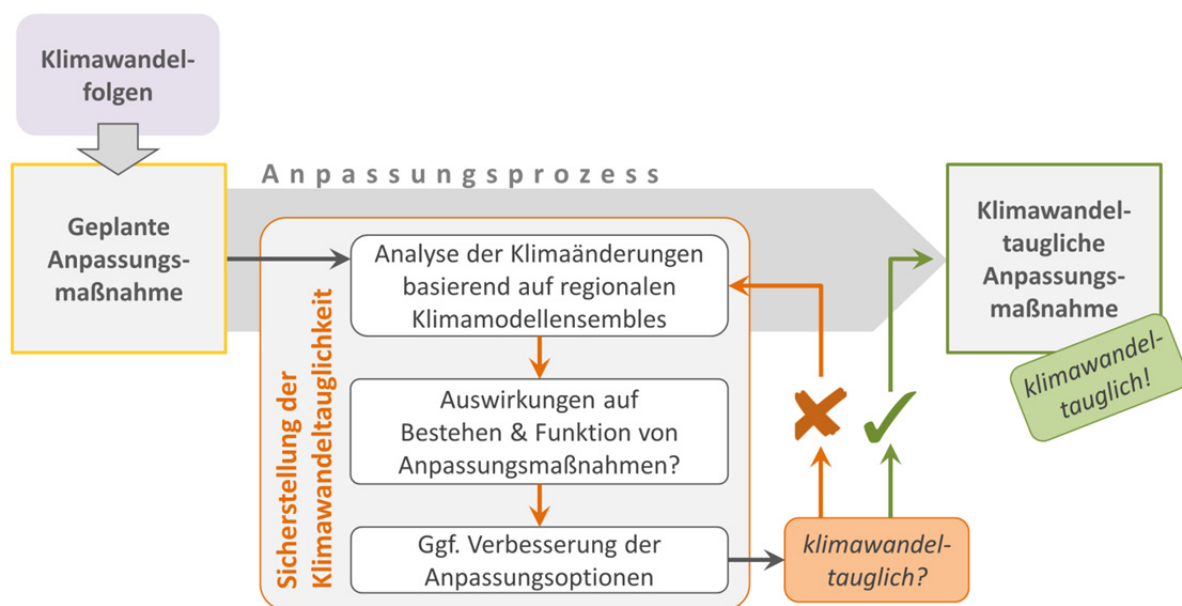
#### 4.6 Klimawandeltaugliche Gestaltung

Dach- und Fassadenbegrünungen können zum Klimaschutz ebenso wie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels beitragen. Um die Beständigkeit und den vollen Funktionsumfang auch zukünftig dauerhaft zu sichern, müssen die Begrünungsmaßnahmen selbst „klimawandeltauglich“ gestaltet werden. Das bedeutet, dass Begrünungsmaßnahmen nicht nur zur Anpassung an den Klimawandel dienen, sondern auch selbst gegenüber den heutigen und zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels zu schützen und abzusichern sind. Die Begrünung ist so zu planen und umzusetzen, dass sie auch unter den sich ändernden klimatischen Bedingungen besteht, ohne klimatisch bedingte Schäden davonzutragen oder Einbußen in ihrer Wirkung und Funktion zu erleiden. Der Klimaanpassungsaspekt muss daher bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden. Andernfalls entstehen unter Umständen dadurch höhere Kosten, dass Schäden auftreten, sich die Lebensdauer verringert oder die Funktionsfähigkeit – und der damit gegebenenfalls verbundene monetäre Vorteil – nicht voll gewährleistet ist.

Die Schritte hin zu einer klimawandeltauglichen Gestaltung von Maßnahmen im Rahmen des Klimaanpassungsprozesses verdeutlicht schematisch **Abbildung 11**. Nach der Auswahl einer potentiellen Anpassungsmaßnahme müssen mögliche Klimawandelfolgen und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Maßnahme selbst identifiziert werden. Da sich Klimawandelfolgen regional und lokal unterscheiden, sollten für die Einschätzung der zu erwartenden Veränderungen möglichst hochaufgelöste Klimaprojektionen aus Modellensembles herangezogen werden, um Aussagen über die Robustheit und Signifikanz der Ergebnisse basierend auf dem aktuellen Stand der Klimaforschung zu ermöglichen (Birkmann & Fleischhauer 2009, Jacob et al. 2014, Pfeifer et al. 2015). Sollten in Zukunft negative Auswirkungen zu erwarten sein, müssen entsprechend Verbesserungen oder Ergänzungen vorgenommen werden, damit die Anpassungsmaßnahme klimawandeltauglich ist. Dieses Vorgehen lässt sich ebenso auf bereits bestehenden Maßnahmen anwenden, um diese im Nachhinein auf ihre Klimawandeltauglichkeit zu prüfen bzw. diese falls nötig nachzubessern.

In Bezug auf Dach- und Fassadenbegrünungen müssen unter Anderem beispielsweise folgende Aspekte bedacht werden: Auswahl klimaangepasster Pflanzenarten, Zuwanderung von nicht-heimischen Pflanzenschädlingen, die Schäden an der Begrünung verursachen können, zukünftig geänderter Bewässerungsbedarf, geänderte Anforderungen an die Windsicherung, Schutz vor Extremwettereinflüssen (z.B. Hagel, Sturm, Starkregen), gute Eignung der verwendeten Materialien unter veränderten Umweltbedingungen sowie die Planung der Wasserrückhaltung entsprechend möglicher Niederschlagsveränderungen.

Um all diese Aspekte berücksichtigen zu können, bedarf es Expertise in verschiedenen Bereich – von der Klimadatenbereitstellung, über die Empfehlung und Planung der Maßnahme und die Bewertung ihrer Klimatauglichkeit, die bis hin zur fachgerechten, praktischen Umsetzung. Da die örtlichen Gegebenheiten dabei eine große Rolle spielen, sollte die Klimawandel-tauglichkeit individuell, lokal bewertet werden.



**Abbildung 11** Klimawandeltraugliche Gestaltung von geplanten Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel (eigene Darstellung).

## 5. Ausblick

Trotz der Vielzahl an bereit vorhandenen Studien, welche den Einsatz der Gebäudebegrünung als Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel und als Maßnahme einer nachhaltigen und ökologischen Stadtentwicklung befürworten, bestehen noch viele offene Fragen. Insbesondere in Bezug auf die Effektivität in der Bekämpfung urbaner Hitzeinseln kann bislang nur auf Simulationen und Modelle zurückgegriffen werden. Großflächige Messergebnisse, die den Erfolg von Maßnahmen dokumentieren könnten, gibt es dagegen nicht, da bisher keine stadtweiten Gebäudebegrünungen durchgeführt wurden. Zudem müssen bei den erzielten Wirkungen auch die klimatischen und stadt-spezifischen Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Aus diesem Grund sind Angaben zur Ausprägung der mikroklimatischen Wirkung aus der Literatur nicht ohne weiteres an jeden beliebigen Ort übertragbar.

Im Rahmen zukünftiger Anpassungsstrategien sollte ein besonderes Augenmerk auf die Verknüpfung von Gebäudebegrünung und Wasserelementen gelegt werden. Zum einen ist die mikroklimatische Wirkung der Begrünung eng an die Wasserverfügbarkeit geknüpft, zum anderen können die geschaffenen Retentionsräume ihren Teil zur Regenentwässerung beitragen. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass das System insbesondere bei Starkregenereignissen an seine Grenzen stoßen kann und diese Ereignisse anders abzufangen sind. Um Synergien nutzen zu können, ist es somit insgesamt empfehlenswert, grüne und blaue Infrastrukturkomponenten gemeinsam zu planen.

Im Zuge der Energiewende und der steigenden Anforderungen an energetische Gebäudestandards, bietet die Kombination von Gründächern mit Photovoltaikmodulen ein noch nicht absehbares Potential, um Klimaschutz und Anpassung an die Folgen des Klimawandels miteinander zu verbinden. Mögliche Synergien wurden in ersten Versuchen bereits aufgezeigt, zu den genauen Wechselwirkungen gibt es jedoch noch einen großen Forschungsbedarf.

Auch wenn der Ansatz der Gebäudebegrünung eine sich im Wachstum befindliche Komponente des urbanen Grüns ist, sollte die anderen Grünflächen in der Stadt auf keinen Fall vernachlässigt werden oder Gründächer als Ausgleichsflächen dienen, nur um die gleichzeitig die Nachverdichtung auf Kosten anderer Grünflächen voranzutreiben. Zum einen ist es bis heute nicht möglich, eine genaue Bilanzierung der Effekte vorzunehmen, zum anderen müssen Frisch- und Kaltluftschneisen zum Umland aufrecht erhalten werden, da deren Funktion auf keinen Fall von einer Gebäudebegrünung – auch nicht von einer großflächigen – übernommen werden kann.

Die Dach- und Fassadenbegrünung an sich ist ebenfalls den Folgen des Klimawandels ausgesetzt und muss daher „klimawandeltauglich“ gestaltet werden, d.h. ihrerseits an die zu erwartenden klimatischen Veränderungen angepasst sein. Dies ist nicht nur wichtig um Schäden vorzubeugen, sondern auch um eine dauerhaft optimale Wirkung der Begrünung zu gewährleisten.

## Literatur

- Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A.L., Rossi, F., Santamouris, M., Synnefa, A., Wong, N.H., Zinzi, M. (2016): Local climate change and urban heat island mitigation techniques – the state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management* 22, 1–16. doi:10.3846/13923730.2015.1111934.
- Alexandri, E., Jones, P. (2008): Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment* 43, 480–493. doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.055.
- Ansel, W. (Hrsg.) (2016): *Kommunale Gründach-Strategien*, 1. ed. Nürtingen.
- Anwar, M., Rasul, M.G., Khan, M.M.K. (2012): Green Roofs for Storm Water Management : A Review. *Water* 11, 1–5.
- Appl, R., Mann, G. (2012): Gründächer und Dachgärten, in: Köhler, M. (Hrsg.), *Handbuch Bauwerksbegrünung. Planung - Konstruktion - Ausführung*. Rudolf Müller, Köln, S. 39–102.
- Bauder (2016): Bauder - macht Dächer sicher [Webseite]. URL: <http://www.bauder.de/de/gruendach.html>.
- BauGb (2015): Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. September 2004 (BGBl. I S. 2414), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 20. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1722) geändert worden ist.
- Bengtsson, L. (2005): Peak flows from thin sedum-moss roof. *Nordic Hydrology* 36, 269–280.
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., GhaffarianHoseini, A. (2014): State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy* 115, 411–428. doi:10.1016/j.apenergy.2013.10.047.
- Berndtsson, J.C., Bengtsson, L., Jinno, K. (2009): Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering* 35, 369–380. doi:10.1016/j.ecoleng.2008.09.020.
- Bevilacqua, P., Coma, J., Pérez, G., Chocarro, C., Juárez, A., Solé, C., De Simone, M., Cabeza, L.F. (2015): Plant cover and floristic composition effect on thermal behaviour of extensive green roofs. *Building and Environment* 92, 305–316. doi:10.1016/j.buildenv.2015.04.026.
- Birkmann, J., Fleischhauer, M. (2009): Anpassungsstrategien der Raumentwicklung an den Klimawandel: „Climate Proofing“ - Konturen eines neuen Instruments. *Raumforschung und Raumordnung RuR* Vol. 6, 114–127. doi:10.1007/BF03185700.
- Blanusa, T., Vaz Monteiro, M.M., Fantozzi, F., Vysini, E., Li, Y., Cameron, R.W.F. (2013): Alternatives to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better „cooling service“? *Building and Environment* 59, 99–106. doi:10.1016/j.buildenv.2012.08.011.
- Bloomberg, M.R., Holloway, C. (2010): NYC Green Infrastructure Plan. New York City Department of Environmental Protection.

- BNatSchG (2015): Bundesnaturschutzgesetz (Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege). Zuletzt geändert durch Verordnung vom 31.08.2015 (BGBl. I S. 1474) m.W.v. 08.09.2015.
- Boetticher, M., Schachtschneider-Baum, D., Dickhaut, W., Ansel, W. (2012): Dachbegrünung – ein Thema für die Bauleitplanung. Methoden, Nutzen, Praxisbeispiele, Vorstellung des Leitfadens „Dachbegrünung für Kommunen“ (Präsentation).
- Breuning, J. (2008): Where Beetles are crawling and Honeybees are humming . Sixth Annual greening Rooftops for Sustainable Communities 1–10.
- Brune, M. (2016): Urban trees under climate change. Potential impacts of dry spells and heat waves in three German regions in the 2050s. Climate Service Center Germany, GERICS Report 24. Hamburg.
- Cameron, R.W., Taylor, J., Emmett, M. (2015): A Hedera Green Façade – Energy Performance and Saving Under Different Maritime-Temperate, Winter Weather Conditions. *Building and Environment* 92, 111–121. doi:10.1016/j.buildenv.2015.04.011.
- Cameron, R.W.F., Taylor, J.E., Emmett, M.R. (2014): What's „cool“ in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. *Building and Environment* 73, 198–207. doi:10.1016/j.buildenv.2013.12.005.
- Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., Davison, J.B. (2010): Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings* 42, 1582–1591. doi:10.1016/j.enbuild.2010.05.004.
- Chen, H., Ooka, R., Huang, H., Tsuchiya, T. (2009): Study on mitigation measures for outdoor thermal environment on present urban blocks in Tokyo using coupled simulation. *Building and Environment* 44, 2290–2299. doi:10.1016/j.buildenv.2009.03.012.
- Chenani, S.B., Lehvävirta, S., Häkkinen, T. (2015): Life cycle assessment of layers of green roofs. *Journal of Cleaner Production* 90, 153–162. doi:10.1016/j.jclepro.2014.11.070.
- Cheng, C.Y., Cheung, K.K.S., Chu, L.M. (2010): Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Building and Environment* 45, 1779–1787. doi:10.1016/j.buildenv.2010.02.005.
- Climate Service Center (Hrsg.) (2014): *Gesundheit und Klimawandel*.
- Cook-Patton, S.C., Bauerle, T.L. (2012): Potential benefits of plant diversity on vegetated roofs: A literature review. *Journal of Environmental Management* 106, 85–92. doi:10.1016/j.jenvman.2012.04.003.
- Coutts, A.M., Daly, E., Beringer, J., Tapper, N.J. (2013): Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Building and Environment* 70, 266–276. doi:10.1016/j.buildenv.2013.08.021.
- Davis, M.M., Hirmer, S. (2015): The potential for vertical gardens as evaporative coolers: An adaptation of the 'Penman Monteith Equation'. *Building and Environment* 92, 135–141. doi:10.1016/j.buildenv.2015.03.033.
- Deutscher Wetterdienst (2016): *Nationaler Klimareport 2016. Klima - Gestern, heute und in der Zukunft*. Offenbach.



- Deuschländer, T., Mächel, H. (2017): Temperatur inklusive Hitzewellen, in: Brasseur, G.P., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.), Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer, Berlin Heidelberg, S. 47–56.
- Dunnett, N., Kingsbury, N. (2008): *Planting Green Roofs and Living Walls*. Timber Press, Portland.
- Epping, A. (2016): Instrumente und Kriterien zur Bewertung der Nutzbarkeit von Dachbegrünungen als Ausgleichsflächen oder Ersatzmaßnahmen - Methodische Grundlagen und mögliche Anwendungen am Beispiel der Freien und Hansestadt Hamburg. Unveröffentlichte Bachelorarbeit an der Leuphana Universität Lüneburg.
- Erlach, N. (2012): *Dachgrün, Studie im Auftrag der MA 22*. Wien.
- Eumorfopoulou, E.A., Kontoleon, K.J. (2009): Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Building and Environment* 44, 1024–1038. doi:10.1016/j.buildenv.2008.07.004.
- European Commission (2015): *A European research and innovation Roadmap for Climate Services*. doi:10.2777/702151.
- Fang, C.F. (2010): Rainwater retention capacity of green roofs in subtropical monsoonal climatic regions: a case study of Taiwan, in: *Design & Nature V: Comparing Design in Nature with Science and Engineering*. WIT Press, Southampton, S. 239–249.
- FBB (2014): *Tagungsband 7. FBB-Symposium Fassadenbegrünung 2014. Vortragsreihe zu Themen der Fassadenbegrünung*. FBB Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V., Berlin, S. 63.
- FBB (Hrsg.) (2011): *Grüne Innovation Fassadenbegrünung. Prospekt der Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V.*
- FBB (2010a): *Grüne Innovation Dachbegrünung*.
- FBB (2010b): *Tagungsband Fassadenbegrünung 2010 - Vortragsreihe zu Themen der Fassadenbegrünung -*, in: FBB (Hrsg.), *FBB-Symposium Fassadenbegrünung*. Saarbrücken, S. 42.
- FBB (2006): *Kombinationslösungen Dachbegrünung - Photovoltaik - Brauchwassernutzung*.
- Feng, H., Hewage, K. (2014): Energy saving performance of green vegetation on LEED certified buildings. *Energy and Buildings* 75, 281–289. doi:10.1016/j.enbuild.2013.10.039.
- FLL (2016): *Bauwerksbegrünung. Übersicht der FLL Publikationen*. [Webseite]. URL: <http://www.fll.de/shop/bauwerksbegrueung.html> (letzter Zugriff am 04.20.2016).
- FLL (2008): *Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen*, 7. ed. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), Bonn.
- Francis, R.A., Lorimer, J. (2011): Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. *Journal of Environmental Management* 92, 1429–1437. doi:10.1016/j.jenvman.2011.01.012.

- GRÜNE LIGA Berlin e.V. (2016): Fassadenbegrünung [Webseite]. URL: <https://www.grueneliga-berlin.de/themen-projekte2/garten-nebenan/tipps-aus-der-gartenpraxis/bepflanzungsmoeglichkeiten/fassadenbegrueung/> (letzter Zugriff am 08.01.2016).
- Heusinger, J., Weber, S. (2015): Comparative microclimate and dewfall measurements at an urban green roof versus bitumen roof. *Building and Environment* 92, 713–723. doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.002.
- Hoelscher, M.T., Nehls, T., Jänicke, B., Wessolek, G. (2016): Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings* 114, 283–290. doi:10.1016/j.enbuild.2015.06.047.
- Hui, S.C.M., Chan, S.C. (2011): Integration of green roof and solar photovoltaic systems. *Joint Symposium 2011: Integrated Building Design in the New Era of Sustainability 2011*, 1–12.
- Ip, K., Lam, M., Miller, A. (2010): Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy. *Building and Environment* 45, 81–88. doi:10.1016/j.buildenv.2009.05.003.
- Jacob, D., Kottmeier, C., Petersen, J., Rechid, D., Teichmann, C. (2017): Regionale Klimamodellierung, in: Brasseur, G.P., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Springer, Berlin Heidelberg, S. 27–36.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsman, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* 14, 563–578. doi:10.1007/s10113-013-0499-2.
- Jaffal, I., Ouldboukhite, S.-E., Belarbi, R. (2012): A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy* 43, 157–164. doi:10.1016/j.renene.2011.12.004.
- Jim, C.Y. (2015): Greenwall classification and critical design-management assessments. *Ecological Engineering* 77, 348–362. doi:10.1016/j.ecoleng.2015.01.021.
- Kaspar, F., Mächel, H. (2017): Beobachtungen von Klima und Klimawandel in Mitteleuropa und Deutschland, in: Brasseur, G.P., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Springer, Berlin Heidelberg, S. 17–36.
- Köhler, M. (2012): Besonderheiten und Vorteile begrünter Architektur, in: Köhler, M. (Hrsg.), *Handbuch Bauwerksbegrünung. Planung - Konstruktion - Ausführung*. Rudolf Müller, Köln, S. 11–18.
- Köhler, M. (2008): Green facades—a view back and some visions. *Urban Ecosystems* 11, 423–436. doi:10.1007/s11252-008-0063-x.

- Köhler, M., Ottelé, M. (2012): Fassadenbegrünung, in: Köhler, M. (Hrsg.), Handbuch Bauwerksbegrünung. Planung - Konstruktion - Ausführung. Rudolf Müller, Köln, S. 103–148.
- Köhler, M., Schmidt, M., Laar, M. (2003): Green Roofs As a Contribution To Reduce Urban Heat Islands. RIO 3 - World Climate & Energy Event 493–497.
- Köhler, M., Schmidt, M., Laar, M., Wachsmann, U., Krauter, S. (2002): Photovoltaic-panels on greened roofs: positive interaction between two elements of sustainable architecture, in: RIO 02 - World Climate & Energy Event. S. 151–158.
- Köhler, M., Wiartalla, W., Feige, R. (2007): Interaction between PV-systems and extensive green roofs. Fifth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show 1–16.
- Kolokotsa, D., Santamouris, M., Zerefos, S.C. (2013): Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions. Solar Energy 95, 118–130. doi:10.1016/j.solener.2013.06.001.
- Kontoleon, K.J., Eumorfopoulou, E.A. (2010): The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. Building and Environment 45, 1287–1303. doi:10.1016/j.buildenv.2009.11.013.
- Kunz, M., Mohr, S., Werner, P. (2017): Niederschlag, in: Brasseur, G.P., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.), Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer, Berlin Heidelberg, S. 57–66.
- Kuttler, W. (2011): Klimawandel im urbanen Bereich. Teil 2, Maßnahmen. Environmental Sciences Europe 23, 21. doi:10.1186/2190-4715-23-21.
- Kuttler, W., O senbr gge, J., Halbig, G. (2017): Städte, in: Brasseur, G.P., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.), Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer, Berlin Heidelberg, S. 225–234.
- Lamnatou, C., Chemisana, D. (2015): A critical analysis of factors affecting photovoltaic-green roof performance. Renewable and Sustainable Energy Reviews 43, 264–280. doi:10.1016/j.rser.2014.11.048.
- Li, W.C., Yeung, K.K.A. (2014): A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. International Journal of Sustainable Built Environment 3, 127–134. doi:10.1016/j.ijbsbe.2014.05.001.
- Loh, S. (2008): Living Walls – A Way to Green the Built Environment. BEDP Environment Design Guide 1, 1–10.
- MacIvor, J.S., Lundholm, J. (2011): Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. Ecological Engineering 37, 407–417. doi:10.1016/j.ecoleng.2010.10.004.
- Mangone, G., van der Linden, K. (2014): Forest microclimates: Investigating the performance potential of vegetation at the building space scale. Building and Environment 73, 12–23. doi:10.1016/j.buildenv.2013.11.012.

- Manso, M., Castro-Gomes, J. (2015): Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 863–871. doi:10.1016/j.rser.2014.07.203.
- Mazzali, U., Peron, F., Romagnoni, P., Pulselli, R.M., Bastianoni, S. (2013): Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate. *Building and Environment* 64, 57–66. doi:10.1016/j.buildenv.2013.03.005.
- Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. (2006): Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning* 77, 217–226. doi:10.1016/j.landurbplan.2005.02.010.
- NABU Wedemark (2012): Informationen zum Naturgarten: Wie begrüne ich Wände? [Webseite]. URL: <http://www.nabu-wedemark.de/wand.html> (letzter Zugriff am 01.08.2016).
- Nagase, A., Dunnett, N. (2012): Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. *Landscape and Urban Planning* 104, 356–363. doi:10.1016/j.landurbplan.2011.11.001.
- Nagase, A., Dunnett, N. (2010): Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: Effects of watering and diversity. *Landscape and Urban Planning* 104, 356–363. doi:10.1016/j.landurbplan.2011.11.001.
- Naturkapital Deutschland (Hrsg.) (2016): Ökosystemleistungen- in der Stadt. Gesundheit schützen und Lebensqualität erhöhen. Berlin, Leipzig.
- Ng, E., Chen, L., Wang, Y., Yuan, C. (2012): A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment* 47, 256–271. doi:10.1016/j.buildenv.2011.07.014.
- Niu, H., Clark, C., Zhou, J., Adriaens, P. (2010): Scaling of Economic Benefits from Green Roof Implementation in. *Environmental science & technology* 44, 4302–4308.
- Nurmi, V., Votsis, A., Perrels, A., Lehvävirta, S. (2013): Cost-benefit analysis of green roofs in urban areas : case study in Helsinki. Helsinki.
- ÖkoKauf Wien (Hrsg.) (2013): Leitfaden Fassadenbegrünung. Wien.
- Optigrün (2016): Optigrün - Die Dachbegrüner [Webseite]. URL: <http://www.optigruen.de/>.
- Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., Cabeza, L.F. (2014): Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39, 139–165. doi:10.1016/j.rser.2014.07.055.
- Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J.M., Cabeza, L.F. (2011): Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Applied Energy* 88, 4854–4859. doi:10.1016/j.apenergy.2011.06.032.
- Perini, K., Ottelé, M., Fraaij, a. L. a, Haas, E.M., Raiteri, R. (2011): Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment* 46, 2287–2294. doi:10.1016/j.buildenv.2011.05.009.

- Pfeifer, S., Bülow, K., Gobiet, A., Hänslar, A., Mudelsee, M., Otto, J., Rechid, D., Teichmann, C., Jacob, D. (2015): Robustness of Ensemble Climate Projections Analyzed with Climate Signal Maps: Seasonal and Extreme Precipitation for Germany. *Atmosphere* 6, 677–698. doi:10.3390/atmos6050677.
- Pfoser, N., Jenner, N., Henrich, J., Heusinger, J., Weber, S. (2013): Gebäude Begrünung Energie: Potentiale und Wechselwirkungen. Darmstadt.
- Poë, S., Stovin, V., Berretta, C. (2015): Parameters influencing the regeneration of a green roof's retention capacity via evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 523, 356–367. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.02.002.
- Porsche, U., Köhler, M. (2003): Life Cycle Costs of Green Roofs: A Comparison of Germany, USA, and Brazil, in: RIO 3 - World Climate & Energy Event. S. 1–5.
- Price, A., Jones, E.C., Jefferson, F. (2015): Vertical Greenery Systems as a Strategy in Urban Heat Island Mitigation. *Water, Air, & Soil Pollution* 226, 247. doi:10.1007/s11270-015-2464-9.
- Rosenzweig, C., Solecki, W.D., Slosberg, R.B. (2006): Mitigating New York City's Heat Island With Urban Forestry, Living Roofs, and Light Surfaces, New York City Regional Heat Island Initiative. Final Report.
- Safikhani, T., Abdullah, A.M., Ossen, D.R., Baharvand, M. (2014): A review of energy characteristic of vertical greenery systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40, 450–462. doi:10.1016/j.rser.2014.07.166.
- Santamouris, M. (2014): Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy* 103, 682–703. doi:10.1016/j.solener.2012.07.003.
- Schumacher, J., Fischer-Hüftle, P. (2011): Bundesnaturschutzgesetz, Kommentar. 2. Auflage, 1043 S., Stuttgart.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin (2010): Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung. Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung. Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung.
- Smith, K.R., Roebber, P.J. (2011): Green roof mitigation potential for a proxy future climate scenario in Chicago, Illinois. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 50, 507–522. doi:10.1175/2010JAMC2337.1.
- Speak, A.F., Rothwell, J.J., Lindley, S.J., Smith, C.L. (2013): Reduction of the urban cooling effects of an intensive green roof due to vegetation damage. *Urban Climate* 3, 40–55. doi:10.1016/j.uclim.2013.01.001.
- Stovin, V., Poë, S., De-Ville, S., Berretta, C. (2015): The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance. *Ecological Engineering* 85, 159–172. doi:10.1016/j.ecoleng.2015.09.076.
- Stovin, V., Vesuviano, G., Kasmin, H. (2012): The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology* 414–415, 148–161. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.10.022.

- Theodosiou, T. (2009): Green Roofs in Buildings: Thermal and Environmental Behaviour. *Advances in Building Energy Research* 3, 271–288. doi:10.3763/aber.2009.0311.
- Tröltzsch, J., Görlach, B., Lückge, H., Peter, M., Sartorius, C. (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel.
- VanWoert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., Rugh, C.L., Fernandez, R.T., Xiao, L. (2005): Green Roof Stormwater Retention. *Journal of Environment Quality* 34, 1036. doi:10.2134/jeq2004.0364.
- Vijayaraghavan, K. (2016): Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57, 740–752. doi:10.1016/j.rser.2015.12.119.
- Villarreal, E.L., Bengtsson, L. (2005): Response of a Sedum green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering* 25, 1–7. doi:10.1016/j.ecoleng.2004.11.008.
- Wong, N.H., Kwang Tan, A.Y., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P.Y., Chan, D., Chiang, K., Wong, N.C. (2010): Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment* 45, 663–672. doi:10.1016/j.buildenv.2009.08.005.
- Ye, J., Yu, S., Zhang, H., Xu, W. (2011): Study on rainwater retention effect of an extensive green roof. 2011 2nd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, MACE 2011 - Proceedings 6908–6911. doi:10.1109/MACE.2011.5988636.
- ZinCo (2016): ZinCo - Leben auf dem Dach [Webseite]. URL: <http://www.zinco.de/> (letzter Zugriff am 04.05.2016).
- ZinCo GmbH (2011): Dachbegrünung erhöht Erträge der Photovoltaik. Pressebericht der ZinCo GmbH vom 24.03.11 [Webseite]. URL: [http://www.zinco.de/aktuelles/presseberichte/pressebericht\\_details.php?id=54](http://www.zinco.de/aktuelles/presseberichte/pressebericht_details.php?id=54) (letzter Zugriff am 01.15.2017).
- Žuvela-Aloise, M., Koch, R., Buchholz, S., Früh, B. (2016): Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. *Climatic Change* 425–438. doi:10.1007/s10584-016-1596-2.





## Kontakt:

Climate Service Center Germany (GERICS)

Fischertwiete 1 | 20095 Hamburg | Germany  
Tel +49 (0)40 226 338-0 | Fax +49 (0)40 226 338-163  
[www.climate-service-center.de](http://www.climate-service-center.de)

Eine Einrichtung des

 **Helmholtz-Zentrum  
Geesthacht**

Zentrum für Material- und Küstenforschung

ISSN 2509-386X