



Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

Bayerisches Staatsministerium für
Wohnen, Bau und Verkehr



Bezahlbar klimagerecht bauen

Kosten-Nutzen-Bewertung
von Maßnahmen im Lebenszyklus

UM
WELT

BAU
WESEN

LAND
SCHAFT

ÖKO
NOMIE

www.stmb.bayern.de

www.stmuv.bayern.de



Zentrum Stadtnatur
und Klimaanpassung



Technische Universität
München

IIÖ

INSTITUT FÜR
IMMOBILIENÖKONOMIE

Wörgl, Österreich



Eine Initiative des
Bayerischen
Umweltministeriums

ZUSAMMENFASSUNG	9
HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR KOMMUNEN, BAUHERR:INNEN UND PLANENDE AUF BASIS DER FORSCHUNGSERGEBNISSE.....	10
ERKENNTNISSE	12
1 KLIMAWANDEL UND BEZAHLBARER WOHNUNGSBAU	14
2 WIE KLIMAGERECHTE MASSNAHMEN IN DIE PLANUNG INTEGRIEREN?	16
 3 NUTZEN KLIMAGERECHTER MASSNAHMEN AM BEISPIEL VON HITZE UND STARKREGEN	20
 4 WAS KOSTEN KLIMAGERECHTE MASSNAHMEN?	30
 5 ERGEBNISSE DER KOSTEN-NUTZEN-BEWERTUNG	38
 6 MASSNAHMEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN	44
LITERATUR	78
ABBILDUNGEN	81
IMPRESSUM	84
FAZIT	85

GRUSSWORT



Klimaschutz und Klimaanpassung sind die Generationenprojekte unserer Zeit. Künftig müssen wir mit mehr Starkniederschlägen im Sommer und gerade in den Städten mit immer mehr Hitzesommern und Tropentagen rechnen. Ein zentraler Ansatz, um dieser Herausforderung zu begegnen, ist klimaangepasstes Bauen. Wir wollen die Städte von morgen so gestalten, dass sie über natürliche Klimaanlagen und funktionale grüne und blaue Infrastrukturen verfügen. Die Menschen in den Städten sollen mit klug geplanten Maßnahmen vor extremen Temperaturen und Regenfällen geschützt und ihre Lebensqualität gesichert werden.

Wir brauchen insbesondere beim Wohnungsbau tragfähige und solide Handlungsempfehlungen für die Anpassung an den Klimawandel. Darum haben wir den Lehrstuhl für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen und den Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität München beauftragt, in Zusammenarbeit mit dem Institut für Immobilienökonomie und dem Bayerischen Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr reale Modellprojekte im geförderten Wohnungsbau zu analysieren. Dabei wurden wichtige Fragen bearbeitet, etwa zu den Folgen des Klimawandels für den bezahlbaren Wohnungsbau oder zur Integration von klimagerechten Maßnahmen in die Planung. Kosten und Nutzen von Maßnahmen zur Klimaanpassung wurden ebenfalls untersucht. Die vorliegende Broschüre liefert konkrete, praxisorientierte Antworten auf diese und weitere Fragen.

Die praktische Umsetzung der untersuchten Maßnahmen kann einen wertvollen Beitrag zum Schutz vor den Auswirkungen des Klimawandels leisten. Das gilt insbesondere für den Erhalt und die Neupflanzung von Bäumen, für Bodenbeläge im Außenraum, Versickerungsanlagen, Dach- und Fassadenbegrünung und Sonnenschutz. Außerdem belegen die Forschungsergebnisse, dass diese Maßnahmen auch wirtschaftlich sinnvoll sind. Die wichtigste Erkenntnis: Selbst bei höheren Investitionskosten überwiegen langfristig ökonomische und gesellschaftliche Vorteile. Klimagerechte Maßnahmen müssen daher bei der Planung sehr früh berücksichtigt werden.

Kommunen, Bauverantwortlichen und Planern werden in dieser Broschüre prägnante wissenschaftsbasierte Orientierungshilfen angeboten. Sie sollen helfen, Maßnahmen zur Klimaanpassung zu identifizieren und erfolgreich umzusetzen.


Ihr
Thorsten Glauber, MdL
Bayerischer Staatsminister für Umwelt und Verbraucherschutz

GRUSSWORT



Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

wir haben ein ehrgeiziges Ziel: Unsere gebaute Umwelt soll klimaneutral werden. Das Bauwesen nimmt eine entscheidende Rolle beim Klimaschutz ein, denn hier gibt es große Potenziale, die Treibhausgas-emissionen zu reduzieren. Klimagerechtes Bauen besteht aber noch aus einem zweiten Punkt: der Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Als Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr setzen wir in beiden Feldern an.

Die bayerische Wohnraumförderung gibt mit dem Wohnbau-Booster wichtige Impulse für mehr bezahlbares und gleichzeitig mehr

nachhaltiges Wohnen. So wollen wir dauerhaft nicht nur dringend benötigte Wohnungen realisieren, sondern auch die dazugehörigen Anforderungen an Infrastruktur, Klimaschutz und Klimaanpassung umsetzen. Mit verbesserten Förderkonditionen und dem neuen Nachhaltigkeitszuschuss geben wir für diese Aufgaben zusätzliche Anreize.

Mit unserem „Experimentellen Wohnungsbau“ initiieren wir gezielt bezahlbare und nachhaltige Wohnkonzepte. Bereits 2019 haben wir das Modellvorhaben „Klimaanpassung im Wohnungsbau“ in enger Kooperation mit dem Umweltministerium gestartet. Zehn unterschiedliche Modellprojekte entwickeln dabei praxisnahe Lösungen für klimaangepasstes Bauen sowie für die veränderten klimatischen Bedingungen und deren Auswirkungen, wie etwa Hitzewellen oder schwere Unwetter. Kommunen, Bauherr:innen und Planer können die einzelnen Bausteine zur Klimaanpassung in ihre eigenen Projekte einfließen lassen. So stellen wir unsere Städte und Ortschaften robuster gegen die Auswirkungen des Klimawandels auf.

Wir sind ein verlässlicher Partner für die bayerischen Kommunen und die Bauwirtschaft. Lassen Sie uns die Zukunft gemeinsam gestalten!

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ch. Bernreiter', written in a cursive style.

Ihr
Christian Bernreiter, MdL
Bayerischer Staatsminister für Wohnen, Bau und Verkehr

GRUSSWORT



Ich kann mir kaum einen Bereich an unserer Universität vorstellen, der künftig ohne Berücksichtigung des Themas Nachhaltigkeit auskommen wird. Mit der TUM Sustainable Futures Strategy 2030 haben wir diese Perspektive ganz oben auf unsere Agenda gesetzt. Wir machen unsere Universität damit zur Gestalterin einer globalen nachhaltigen Entwicklung – wissenschaftlich, ökonomisch, ökologisch, sozial.

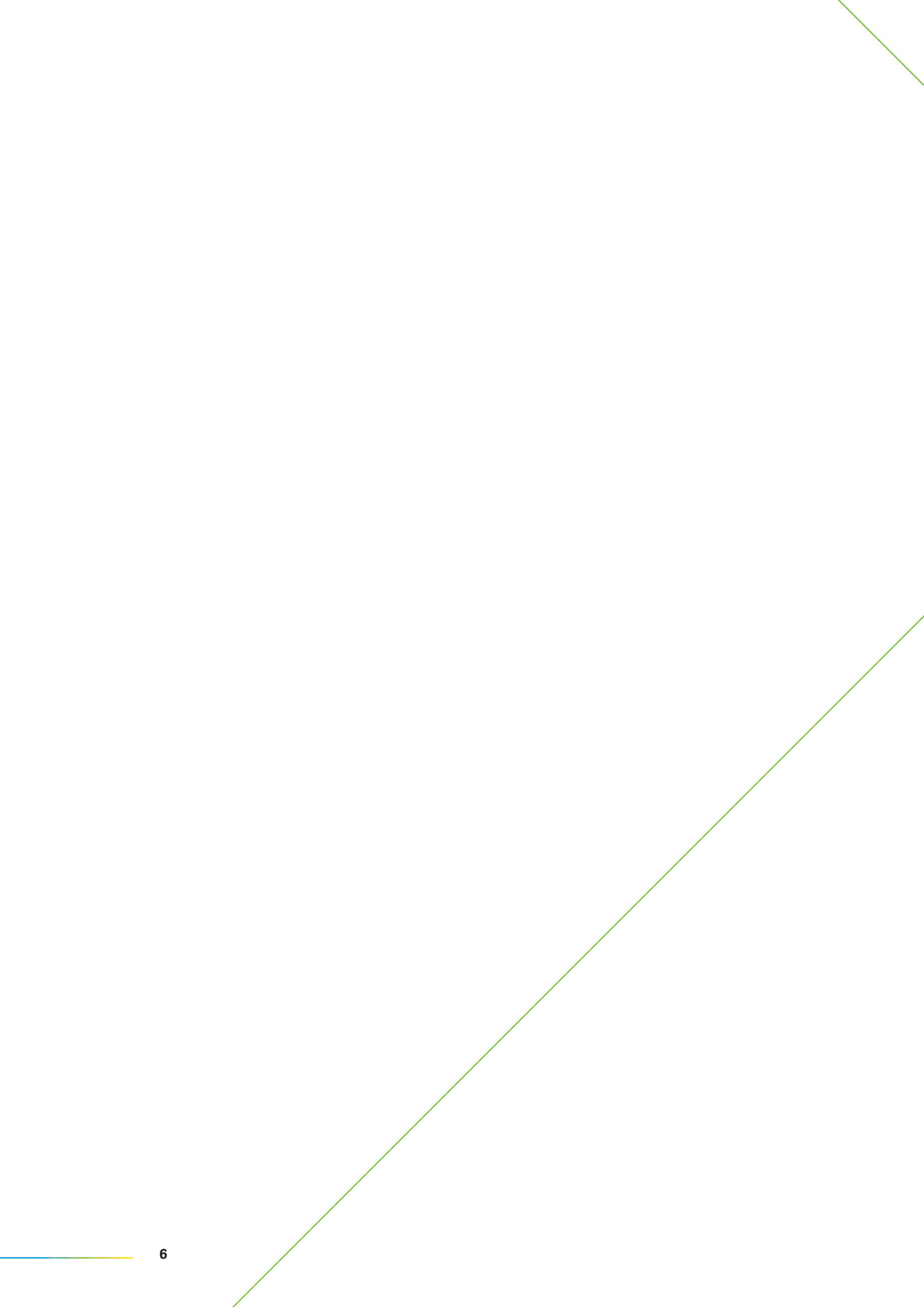
Dieser zentrale strategische Ansatz spiegelt sich in verschiedenen Initiativen wider, die in enger Zusammenarbeit von Praxis und Wissenschaft entstehen. Dafür steht gerade auch das Forschungsprojekt

„Begleitforschung: Klimagerechtes Bauen – Modellvorhaben“. Es zeichnet sich vor allem durch seine interdisziplinäre Ausrichtung aus. Landschaftsplanung und Architektur wirken hier mit dem Bau- und Umweltingenieurswesen sowie den Wirtschaftswissenschaften zusammen, um ganzheitliche Lösungen für die Herausforderungen im Wohnungsbau im Kontext des Klimawandels zu entwickeln. Die hier entwickelten Handlungshinweise dienen dazu, unter Beachtung der in der Praxis vorhandenen Rahmenbedingungen, Nachhaltigkeitsanforderungen zeitnah und kostenbewusst umsetzen zu können.

Ein weiterer Schlüsselaspekt ist die wissenschaftlich fundierte Beratung der Politik, um die Notwendigkeit der Integration von klimagerechten Maßnahmen in Planungs- und Umsetzungsverfahren zu verdeutlichen. Dies ermöglicht es uns, die Forschungserkenntnisse und Innovationen in politische Entscheidungen und damit in die gesellschaftliche Wirklichkeit einfließen zu lassen. Nur auf der Grundlage solider Expertise kann das komplexe Thema Nachhaltigkeit erfolgreich angegangen werden.

A handwritten signature in black ink, reading "Prof. F. Hofmann". The signature is stylized and fluid.

Ihr
Prof. Thomas F. Hofmann
Präsident der Technischen Universität München





Ziel der Broschüre ist es, Kommunen, Bauherr:innen und Planende dabei zu unterstützen, klimagerechte Maßnahmen im Wohnungsbau zu identifizieren und in der Planung zu berücksichtigen.

Darunter verstehen wir Maßnahmen, die Klimaanpassung und Klimaschutz berücksichtigen.

Um deren Bezahlbarkeit zu bewerten, stellen wir über den gesamten Lebenszyklus ihre Kosten sowie den umweltbezogenen und gesellschaftlichen Nutzen in diesem Forschungsvorhaben gegenüber.

FORSCHUNG BEGLEITET MODELLPROJEKTE

Das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanzierte das interdisziplinäre Forschungsprojekt "Begleitforschung: Klimagerechtes Bauen – Modellvorhaben". Dieses wurde unter dem Dach des Zentrums für Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK) an der Technischen Universität München ausgeführt. Das Forschungskonsortium bestand aus dem Lehrstuhl für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen, Prof. Dr.-Ing. Werner Lang, und dem Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft, apl. Prof. Dr. rer. nat. habil. Brigitte Helmreich, in Kooperation mit dem Institut für Immobilienökonomie (IIÖ) unter der Leitung von Prof. Dr. Sven Bienert. Für die Beratungsstelle für Energieeffizienz und Nachhaltigkeit der Bayerischen Architektenkammer (BEN) begleitete Dipl.-Ing. Univ. Landschaftsarchitekt Andreas Rockinger das Vorhaben beratend.

Das Forschungsprojekt setzte auf dem Modellvorhaben "Klimaanpassung im Wohnungsbau" des Experimentellen Wohnungsbaus des Bayerischen Staatsministeriums für Wohnen, Bau und Verkehr auf und begleitete Planungswettbewerbe für bayernweit elf Modellprojekte (Abbildung 1). Bei den Modellprojekten ging es vor allem darum, staatlich geförderte Neubauprojekte in urbaner Umgebung umzusetzen. Im ersten Schritt entwickelte das interdisziplinäre Forschungsteam mögliche Abgabeleistungen, Textbausteine sowie einen Kriterienkatalog mit dem Fokus klimagerechtes Bauen, der den Auslobenden als Basis für die Grundlagenermittlung und den Auslobungstext diente. Das Preisgericht nahm Stellung zu den klimatischen Belangen der Entwürfe. Im nächsten Schritt wurden die fünf Siegerentwürfe näher untersucht, um die Wirtschaftlichkeit klimagerechter Maßnahmen anhand unterschiedlicher Szenarien zu bewerten. Ergebnisse und Erkenntnisse der Praxispartner:innen und Forschenden wurden in sieben Workshops und Interviews protokolliert und im Abschlussbericht dokumentiert.



Abbildung 1: Karte Modellprojekte

ZUSAMMENFASSUNG

Die Schaffung von bezahlbarem Wohnraum ist eine Herausforderung für Bauherr:innen sowie öffentliche oder private Investor:innen. Die Anpassung von Gebäuden an sich ändernde Klimabedingungen sehen viele als zusätzliche Belastung, welche die Wirtschaftlichkeit von Bauprojekten mindert.

Diese Broschüre bewertet Maßnahmen zu Klimaschutz und Klimaanpassung anhand einer Kosten-Nutzen-Bewertung, die auch Nebeneffekte, wie Gesundheits- und Umweltkosten, einbezieht. Mithilfe dieser Argumentationsgrundlage können Kommunen, Bauherr:innen und Planende klimagerechte Maßnahmen in die Praxis überführen und die Kosten und Nutzen den jeweiligen Akteur:innen sinnvoll zuordnen. Im Endbericht sind die detaillierten Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Bewertung aufgeschlüsselt.

Die Analyse realer Modellprojekte im geförderten Wohnungsbau zeigt: Die untersuchten Maßnahmen leisten einen wichtigen Beitrag zum Schutz vor Auswirkungen des Klimawandels und sind zudem wirtschaftlich und gesellschaftlich sinnvoll. Die Maßnahmen umfassen Baumerhalt und -pflanzung, Bodenbeläge im Außenraum, Versickerungsanlagen, Dach- und Fassadenbegrünung sowie Sonnenschutz.

Entscheidend ist zu erkennen, dass erhöhte Investitionskosten langfristige ökonomische und gesellschaftliche Vorteile erzielen. Damit dies gelingt, sind klimagerechte Maßnahmen im Planungsprozess früh zu berücksichtigen.

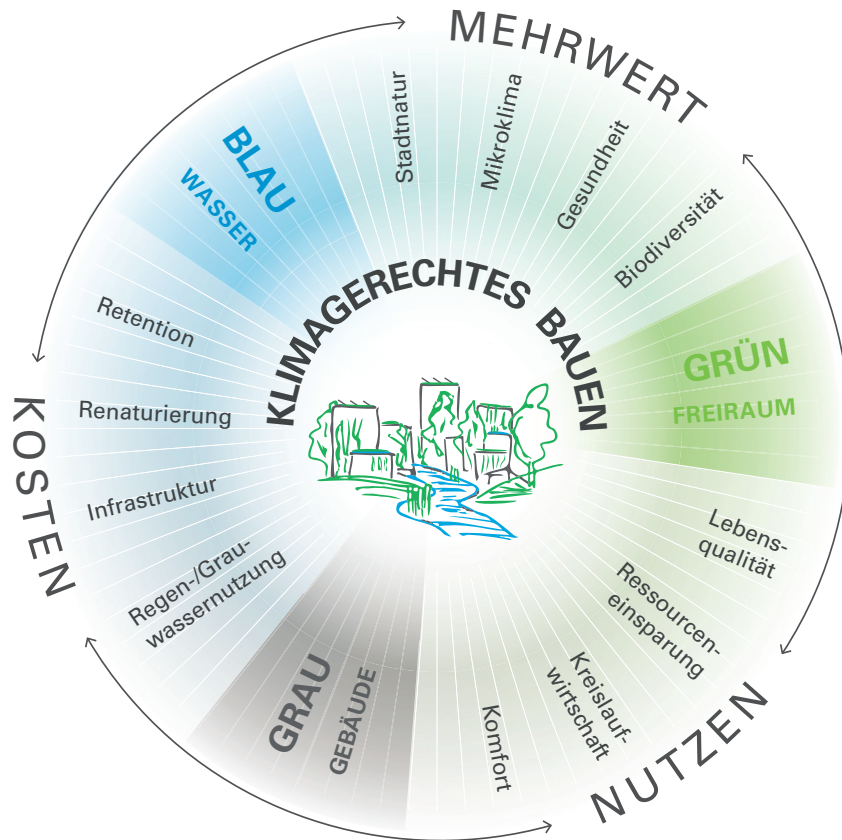


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Themenfelder des Projektes

HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR KOMMUNEN, BAUHERR:INNEN UND PLANENDE AUF BASIS DER FORSCHUNGSERGEBNISSE

Kommune / Förderstelle / öffentliche Hand

Nutzung von **Bauleitplanung, Baugenehmigung und bauordnungsrechtlichen Instrumenten** (BayBO) zur Sicherstellung der Umsetzung von klimagerechten Maßnahmen (z.B.: Stellplatzsatzung, Baumschutzverordnung)

Bereitstellen von Informationen zur **Risiko- und Grundlagenermittlung** am Standort (Bsp.: Klimafunktionskarte, Starkregenhinweiskarte, Hitzekarte)

Wahrnehmen der **Vorbildfunktion** der öffentlichen Hand bei eigenen Bauvorhaben

Vorsorgepflicht: Gesundheits- und Umweltkosten für die Allgemeinheit reduzieren

Öffentlichkeitsarbeit zur Förderung der Akzeptanz von klimagerechten Maßnahmen

Allianzen bilden zwischen verschiedenen Akteursgruppen

Gezielter Einsatz von **Förderinstrumenten** zur Schaffung von Anreizen zur Umsetzung klimagerechter Maßnahmen

Bauherr:innen

Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von klimagerechten Maßnahmen anhand einer **Lebenszykluskostenberechnung (LCC)**

Hohe Qualität durch umweltbezogene und gesellschaftliche Nutzen erhöhen die **Attraktivität der Immobilie** auf dem Markt

Sicherung der Qualität in Bezug auf klimagerechtes Bauen durch frühzeitige Einbindung eines **interdisziplinären Planungsteams**

Durchführung von **Planungswettbewerben** zur frühzeitigen Integration ganzheitlicher Konzepte

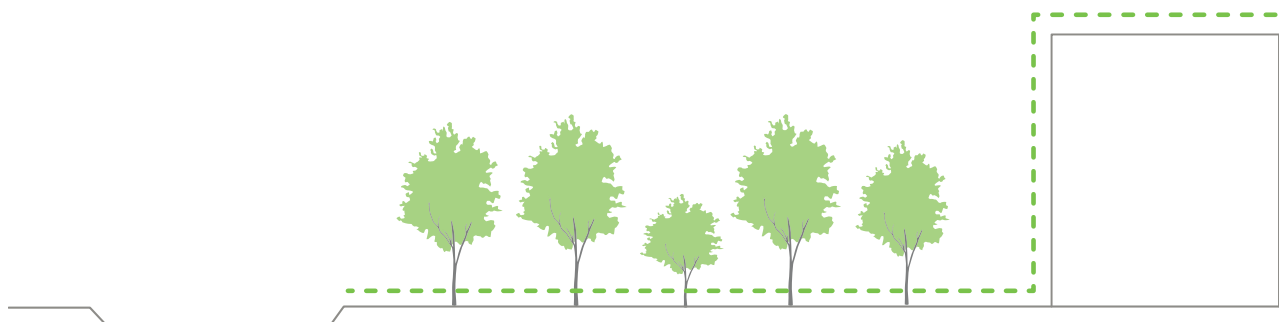


Abbildung 3: Akteursbezogene Handlungsempfehlungen

Planende

Baumbestand erhalten
(siehe Kapitel 6.1)



**Neue Bäume pflanzen & Raum
vorsehen für große Bäume**
(siehe Kapitel 6.2)



Versiegelung minimieren
(siehe Kapitel 6.3)



Regen- und Grauwasser nutzen



**Lokalen Wasserhaushalt erhalten
durch oberirdische Vor-Ort-
Bewirtschaftung von
Niederschlagswasser**
(siehe Kapitel 6.4)



**Bestehende Infrastrukturen
verwenden & Gebäudebestand
weiterentwickeln**



Flächen multifunktional belegen



**Dachbegrünung +
Photovoltaikanlagen**
(siehe Kapitel 6.5)



Fassaden begrünen
(siehe Kapitel 6.6)



Außenliegender Sonnenschutz
(siehe Kapitel 6.7)



- Anpassung an Hitzetage und Tropennächte
- Anpassung an Starkregen und Überflutung
- Anpassung an Trockenheit und Dürre
- Hoher gesellschaftlicher und umweltbezogener Nutzen
- Wirtschaftlich sinnvoll für Bauherr:innen
- Wirtschaftlich sinnvoll für Kommunen

ERKENNTNISSE



Dringlichkeit klimagerechten Bauens

Der Klimawandel und der Rückgang der Biodiversität beschleunigen sich; Extremwetterlagen nehmen zu. Sofortiges Handeln ist geboten!



Projektentwicklungsprozess

Klimagerechte Belange sind frühzeitig in den Projektentwicklungs- und Planungsprozess zu integrieren. Mögliche Förderungen sind dabei zu beachten.



Standortabhängige Planung

Um Klimarisiken berücksichtigen zu können, ist eine standortabhängige Analyse erforderlich. Dies kann langfristig Kosten sparen und Risiken minimieren.



Vernetztes Denken

Interdisziplinäre Planungsteams sind notwendig, um klimagerecht zu planen und wirtschaftlich zu bewerten. Sie decken die Themen Architektur, Freiraumplanung, Regenwassermanagement und Wirtschaftlichkeit ab.



Lebenszyklusbetrachtung

Investitionen in der Gegenwart schützen vor den hohen Folgekosten klimabedingter Extremwetterereignisse. Vor allem Kommunen müssen zudem externe Effekte wie Umwelt- und Gesundheitskosten einbeziehen.



Kosten-Nutzen-Bewertung

Eine klassische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf Basis von Kostenfaktoren reicht für eine ganzheitliche Betrachtung klimagerechter Maßnahmen nicht aus. Denn diese bieten gesellschaftliche und ökologische Nutzen im Vergleich zu herkömmlichen Bauweisen. Diese Nutzen müssen mit den Kosten ins Verhältnis gesetzt werden.



CO₂-Emissionen bepreisen

Die Bepreisung von CO₂-Emissionen für Heizen und Kühlen ist heute noch zu niedrig, wird in Zukunft jedoch an Relevanz gewinnen. Maßnahmen, die CO₂-Emissionen im Betrieb senken, werden dadurch künftig eine hohe Wirtschaftlichkeit aufweisen. Der Verzicht auf die Verbrennung fossiler Energieträger erscheint dabei zentral.



Wohn- und Lebensqualität steigern

Klimagerechte und biodiversitätsfördernde Maßnahmen können die Wohn- und Aufenthaltsqualität erhöhen. Positive Auswirkungen auf die Vermietbarkeit von Wohnungen, auf den natürlichen Wasserhaushalt und die Biodiversität sind zu erwarten.



Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung für Wohnungsbau an einem Fließgewässer

1

KLIMAWANDEL UND BEZAHLBARER WOHNUNGSBAU

Der Klimawandel beeinflusst den bezahlbaren Wohnungsbau: Zunehmende Wetterextreme erfordern widerstandsfähigere Gebäude und Freiräume, die zu einer Erhöhung der Investitionskosten führen können. Energieeffiziente Bauweisen und die Nutzung erneuerbarer Energien bieten jedoch auch die Chance, Betriebskosten langfristig zu senken und die Resilienz des Gebäudebestands zu erhöhen.

KLIMAGERECHTES BAUEN

- **Mit klimagerechten Maßnahmen** lassen sich die Ziele des Klimaschutzes und/oder der Klimaanpassung erreichen.
- **Klimaschutz** bedeutet, klimaschädliche Emissionen zu reduzieren bzw. vermeiden (Mitigation).
- **Klimaanpassung** bezeichnet Maßnahmen, die Gebäude und Freiräume an sich ändernde klimatische Bedingungen anpassen, um die Auswirkungen des Klimawandels zu reduzieren (Adaption).

Gebäude müssen auf den Klimawandel reagieren

Der Bau- und Immobiliensektor steht vor enormen Herausforderungen: Durch den Klimawandel nehmen Extremwetterereignisse (physische Risiken) zu. In Bayern wird eine Zunahme von Hitzetagen und -wellen, Tropennächten, Trockenperioden und Starkniederschlägen erwartet. Damit sich Gebäude und Freiräume an das sich verändernde Klima anpassen können (Adaption), sind die regional unterschiedlichen Risiken projektspezifisch zu prüfen und in der Planung zu beachten. Gleichzeitig muss der Bausektor wesentlich zum Klimaschutz beitragen, indem er seine Emissionen reduziert (Mitigation). Dadurch ist er Risiken ausgesetzt, die sich aus dem Übergang zu einer CO₂-freien Wirtschaft ergeben (transitorische Risiken).

Diese Anforderungen zu erfüllen und dabei die Bezahlbarkeit von Wohnraum sicherzustellen, ist eine Aufgabe, bei der Kommunen, Bauherr:innen und Planende gezielt zu unterstützen sind. Dafür sind Investitionen in klimagerechte Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit zu bewerten. Nutzenpotenziale ergeben sich für die Kommune, Projektträger:innen/Investor:innen, Mieter:innen und die Gesellschaft.

PHYSISCHE UND TRANSITORISCHE RISIKEN

- *Physische Risiken ergeben sich aus den Auswirkungen des Klimawandels und den damit zusammenhängenden Extremwetterereignissen. Dies sind z. B. durch Starkregenereignisse überflutete Keller oder zunehmende Kühlperioden aufgrund steigender Hitzetage.*
- *Transitorische Risiken entstehen durch den Umbruch zu einer klimaschonenden, kohlenstoffarmen Wirtschaftsweise. Der Immobilienbestand muss zu einem emissionsneutralen Betrieb umgebaut werden.*

Resiliente Infrastrukturen planen

Die Auswirkungen des Klimawandels erfordern eine ganzheitliche Betrachtung des Bauens und integrierte, fachübergreifende Lösungen. Von Beginn an sind planerische und ökonomische Aspekte zu beachten und alle Beteiligten früh in den Planungsprozess einzubeziehen.

Für die Anpassungsfähigkeit eines Standortes an Extremereignisse ist es essentiell, Gebäudeebene (graue Infrastruktur) und umgebende Freiräume (grüne Infrastruktur) inklusive Wasserressourcen (blaue Infrastruktur) (Abbildung 5) gleichzeitig zu betrachten und eng verzahnt zu planen. Die Planung einer grau-grün-blauen Infrastruktur berücksichtigt Synergien wie eine multifunktionale Nutzung des Außenraums.

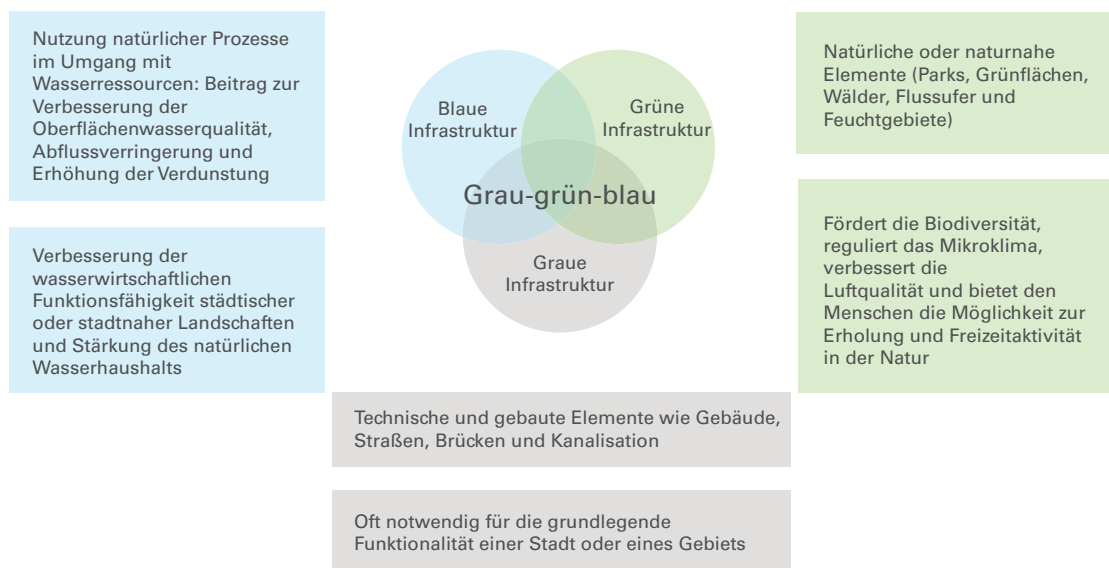


Abbildung 5: Das vernetzte, integrierte Planen zwischen "grau-grün-blau" kombiniert und verknüpft drei Infrastrukturtypen in urbanen und ländlichen Gebieten, um eine nachhaltige, widerstandsfähige Umwelt für Mensch, Tier und Natur zu schaffen

Wirtschaftlichkeit von klimagerechtem Bauen

Bei der Planung klimagerechter Maßnahmen stehen Investierende vor den Fragen: Lohnt sich das im sozial geförderten Wohnungsbau? Wie lassen sich zusätzliche Kosten rechtfertigen, wenn diese nicht auf die Miete umlegbar sind? Die Antworten erfordern eine ganzheitliche Kosten-Nutzen-Betrachtung, die Baukosten und Kosten für Unterhalt und Verwertung umfasst. So werden langfristige Einsparungen durch eine erhöhte Energieeffizienz und reduzierte Klimarisiken berücksichtigt. Verbesserte Aufenthaltsqualitäten verbessern zudem langfristig die Vermietbarkeit der Wohnungen. Die Kostenpositionen sind daher den jeweiligen Nutzeneffekten zuzuordnen.

BEZAHLBAR

- Eine Maßnahme oder Bauweise ist bezahlbar, wenn die lebenszyklusbasierten Kosten nicht oder nur geringfügig höher sind als bei konventionellen Bauweisen (bei einer Barwertbetrachtung und ggf. unter Einbezug von Förderungen).
- Die Kosten- und Nutzeneffekte sind den jeweiligen Beteiligten klar zuzuordnen, um sinnvolle Handlungsempfehlungen ableiten zu können.
- Zu betrachten sind gesellschaftliche und ökologische Kosten und Nutzen.

2

WIE KLIMAGERECHTE MASSNAHMEN IN DIE PLANUNG INTEGRIEREN?

Das interdisziplinäre Forschungsteam hat in Zusammenarbeit mit den Praxispartner:innen die Integration von klimagerechten Maßnahmen in den Planungsprozess untersucht. Das Ergebnis zeigt: Maßnahmen zu Klimaschutz und -anpassung lassen sich in Projektentwicklungs- und Planungsprozesse ohne zu großen Mehraufwand integrieren, sofern sie von Beginn mitgedacht werden. Wichtig ist, die Maßnahmen aus einer langfristigen Perspektive zu betrachten und von Anfang an in die Planung zu integrieren (vgl. Abbildung 6). Zuerst ist jedoch zu klären, ob ein Bedarf für zusätzlichen Wohnraum besteht oder ob der vorhandene Bestand ausreichend ist (Schritt 0).

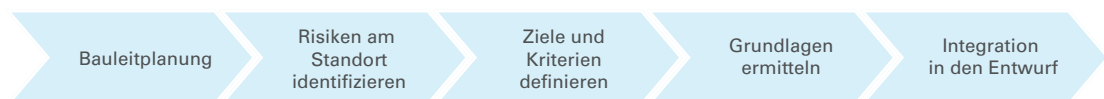


Abbildung 6: Integration von klimagerechten Maßnahmen in Projekt- und Planungsprozesse

Schritt 1: Klimatische Belange in der Bauleitplanung beachten

Bestehende innerstädtische Gebiete gilt es, bevorzugt zu verdichten und zu entwickeln, bevor neue Flächen bebaut werden. Gebäude im Bestand sind zu erhalten und bei Bedarf den veränderten Nutzungsansprüchen anzupassen. Bei einer Verdichtung ist das urbane Grün zu sichern und weiterzuentwickeln, Mobilität zur Förderung der Innenentwicklung ist auszubauen. Dies fördert eine nachhaltige Stadtentwicklung, die vorhandene Infrastruktur nutzt und den Flächenverbrauch reduziert. Bei der Baurechtschaffung ist somit insbesondere darauf zu achten, dass Grünflächen erhalten und weiterentwickelt werden. Sie sind wichtig für das Stadtklima und die biologische Vielfalt in den umliegenden Quartieren. Grundstücke, die beispielsweise einem hohen Überschwemmungsrisiko ausgesetzt sind, sind nicht zu entwickeln. Klimafunktions- und Starkregenhinweiskarten sind eine Basis und ein hilfreiches Instrument für eine nachhaltige, stadtklimatisch vorteilhafte Stadtentwicklung.

Schritt 2: Risiken am Standort identifizieren

Extremwetterereignisse werden in Zukunft vermehrt auftreten, jedoch nicht gleichermaßen an allen Orten. Starkregenfälle werden je nach Region häufiger und/oder intensiver; außerdem ist je nach Region mit mehr Hitzetagen oder zunehmender Trockenheit zu rechnen. Derartige physische Risiken eines Bauvorhabens sind standortspezifisch zu ermitteln, um die künftig zu erwartende Gefährdungslage korrekt einzuschätzen. So können geeignete Maßnahmen ergriffen werden, um die Resilienz der zu errichtenden Bauten zu erhöhen. Mithilfe von Klimaprojektionen lassen sich neben der heutigen Exponierung bzgl. Naturgefahren auch Ableitungen zur künftigen Dynamik der Risiken in Bezug auf Extremwetterereignisse des konkreten Standorts erforschen.

TOOLS ZUR STANDORTBEZOGENEN ERMITTLUNG VON KLIMARISIKEN SIND

- Bayerisches Klimainformationssystem (www.klimainformationssystem.bayern.de)
- Umweltatlas Bayern (www.umweltatlas.bayern.de)
- GIS-ImmoRisk Naturgefahren (www.gisimmorisknaturgefahren.de)

Schritt 3: Für die Planung relevante Ziele und Kriterien definieren

Die Zusammenstellung eines interdisziplinären Planungsteams, das u. a. Kompetenzen in Architektur, Landschaftsarchitektur und Siedlungswasserwirtschaft hat, ist notwendig; denn aus den Klimarisiken lassen sich **Ziele** ableiten (Abbildung 7 und 8), die für das zu beplanende Grundstück bzw. Gebäude besonders relevant sind. Ein Beispiel ist die Anpassung an häufigere Hitzetage. Anhand von **Kriterien** ist zu prüfen, ob diese Ziele in der Planung berücksichtigt wurden oder werden können. Diese Kriterien sind eine Orientierungshilfe in frühen Planungsphasen und helfen, Abgabeleistungen für Planungswettbewerbe zu definieren. Aus den Kriterien lassen sich **Maßnahmen** für die Planung ableiten. So stellt z. B. der Erhalt des Baumbestands eine Anpassung an Hitzetage dar (Abbildung 7). Abbildung 8 (Seite 18/19) fasst die Kriterien zum klimagerechten Bauen zusammen und ordnet sie Zielen zu. Daraus abgeleitete konkrete Maßnahmen haben wir in einer Kosten-Nutzen-Analyse näher untersucht (Kapitel 6).

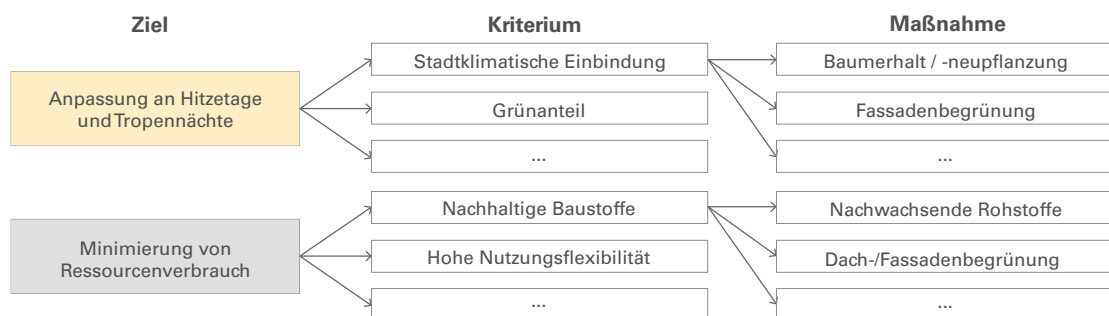


Abbildung 7: Beispielhafte Ziele, Kriterien und Maßnahmen

Schritt 4: Grundlagen ermitteln

Ein interdisziplinäres Team leitet aus den in den vorherigen Schritten definierten Kriterien und Randbedingungen Maßnahmen ab, mit denen die klimarelevanten Ziele erreicht werden sollen. Im Fall von Planungswettbewerben sind die Auslobungstexte inklusive Abgabeleistungen so zu formulieren, dass sie die Ziele adressieren. Zur Bewertung oder zum Vergleich von Entwürfen ist es notwendig, Rahmenbedingungen zu definieren – wie den Erhalt von Bestandsbäumen (Kapitel 6.1) oder den maximalen Versiegelungsgrad. Sind die Ziele gesetzt und Kriterien definiert, gilt es, die Grundlagen für die weitere Planung zu schaffen, um die Umsetzbarkeit klimagerechter Maßnahmen zu gewährleisten. Um die Ziele auch zu erreichen, sind alle wichtigen Randbedingungen des klimagerechten Bauens aufzubereiten.

- So ist eine Klimafunktionskarte bei der Kommune anzufragen und z. B. freizuhaltende Frischluftschneisen sind zu analysieren.
- Der Bebauungsplan ist auf die Umsetzbarkeit möglicher Klimaanpassungsmaßnahmen zu prüfen (z. B. Dachneigung für Begrünung geeignet).
- Den Bauherr:innen sind ein ggf. zeitlicher und personeller Mehraufwand für ein vergrößertes Planungsteam zu kommunizieren.

BAUHERR:INNEN HABEN FÜR DIE GRUNDLAGENERMITTLUNG KLIMARELEVANTER BELANGE FOLGENDES ZU BEAUFTRAGEN UND ERMITTELN

- Baugrundgutachten unter Beachtung der Versickerungsfähigkeit des Untergrundes inkl. Grundwasserflurabstand
- Vegetations- und Grünflächenkartierung
- Baumkataster inkl. Beurteilung der Erhaltungswürdigkeit von Bäumen
- Mobilitätskonzept zur Reduzierung des Stellplatzschlüssels

Schritt 5: Integration in den Entwurf

Aus den in den vorherigen Schritten definierten Kriterien und Randbedingungen werden Maßnahmen abgeleitet, um die klimarelevanten Ziele zu erreichen. Im Fall von Planungswettbewerben sollten sich die Planungsteams aus Stadtplaner:innen sowie Landschafts- und Architekt:innen mit wasserwirtschaftlicher Expertise zusammensetzen. Klimagerechte Maßnahmen gilt es, mit umweltverträglichen Materialien auszuführen. Fördermöglichkeiten für geplante Maßnahmen sind zu prüfen (Kapitel 5).

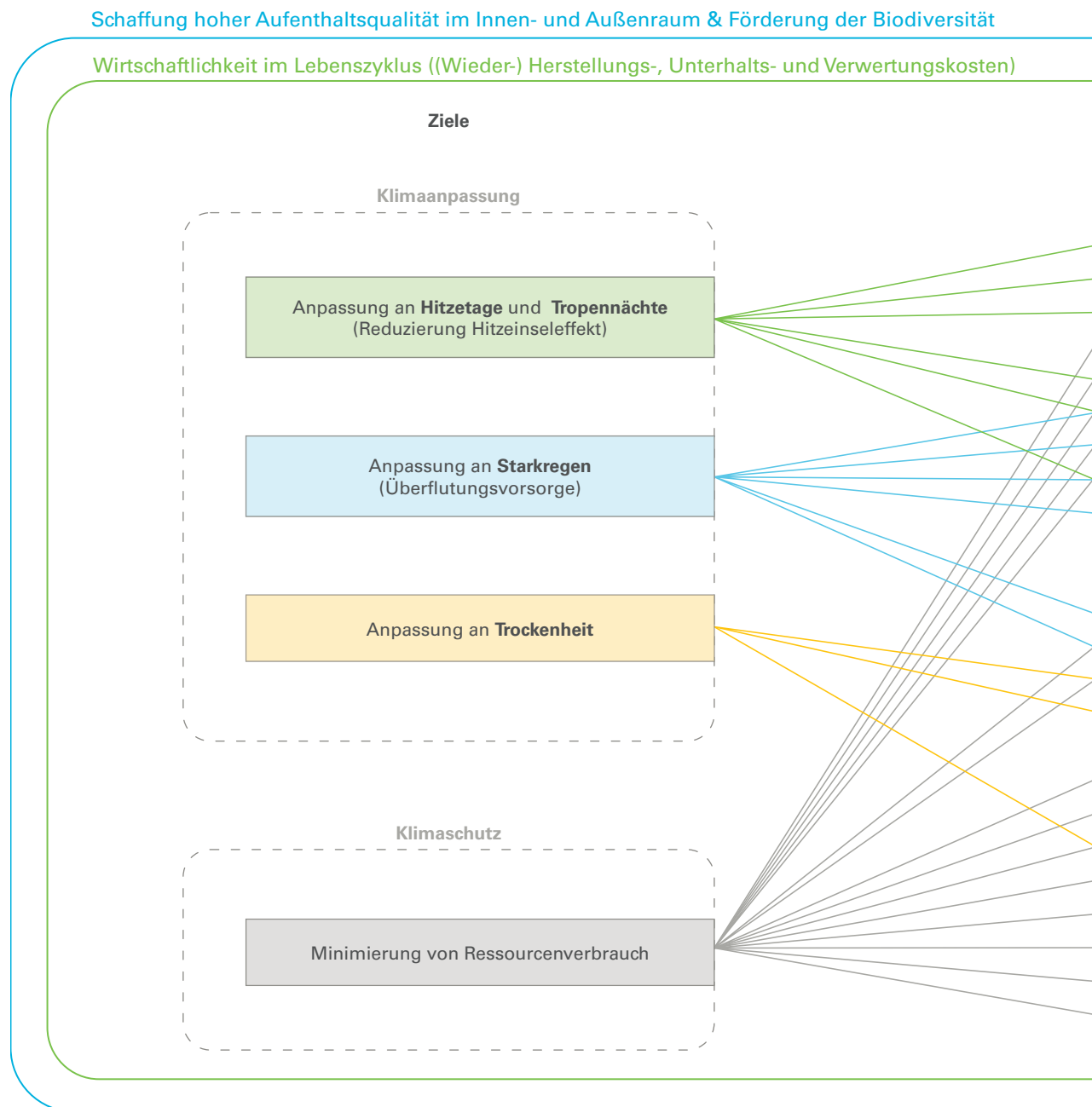
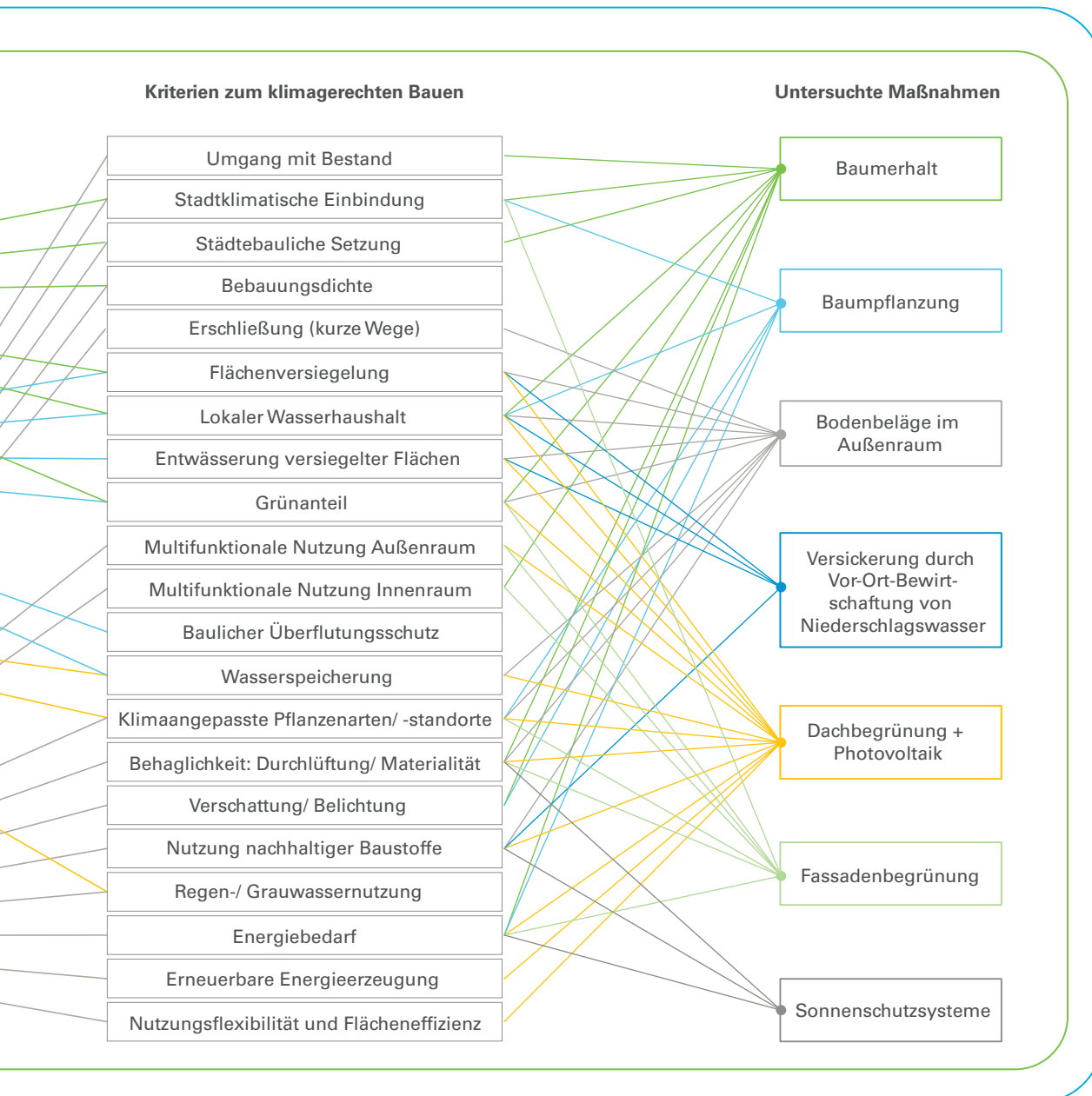


Abbildung 8: Ziele, Kriterien und untersuchte Maßnahmen zum klimagerechten Bauen. Die Kriterien konzentrieren sich vor allem auf Hitzetage, Tropennächte sowie Starkregen. Sie gelten neben der Planung von Gebäuden auch für den Außenraum.

LITERATURHINWEIS

Die Veröffentlichung "Die Planung einer grünen Stadt der Zukunft – Handlungsmöglichkeiten und Instrumente" beschreibt Details zu Planungsinstrumenten für eine klimaangepasste Stadtplanung [56].





3

NUTZEN KLIMAGERECHTER MASSNAHMEN AM BEISPIEL VON HITZE UND STARKREGEN

Für jede Maßnahme untersuchten wir die Nutzenpotenziale der grau-grün-blauen Infrastrukturen. Der betrachtete Nutzen umfasst nicht oder schwer monetarisierbare Aspekte und zeigt den ökologischen und gesellschaftlichen Wert einer Maßnahme, wie beispielsweise das Grünvolumen oder die Verdunstungskühlung.

Hitze, Trockenheit und Starkregen sind für die Klimaanpassung besonders relevant. Die Wetterextreme werden kontinuierlich zunehmen und betreffen weite Teile Bayerns – im Gegensatz zu lokal und temporär auftretenden Risiken wie Winterstürme, Hagel oder Hochwasser. Maßnahmen zur Anpassung von Gebäuden und Außenräumen an Hitze und Starkregen lassen sich relativ einfach in die Planung integrieren und bedeuten oft nur ein Upgrade bestehender Maßnahmen. Der ermittelte quantitative Nutzen bezieht sich vor allem auf Hitze und Starkregen.

Quantitative Nutzenermittlung

Der Nutzen wurde quantitativ über Berechnungen oder Simulationen anhand der Modellprojekte ermittelt. Abbildung 10 zeigt die untersuchten Maßnahmen und den ermittelten Nutzen. Die Nutzenwerte verglichen wir innerhalb der Varianten einer Maßnahme und bewerteten sie pro Nutzen mit 1 bis 10 Punkten (1 = sehr niedriger Nutzen, 10 = sehr hoher Nutzen).

Die ermittelten Punkte wurden dann pro Variante nutzenübergreifend gemittelt. Ein Großteil des ermittelten Nutzens bezieht sich auf gegenwärtige und künftige Klimabedingungen. Basis war das RCP-Szenario 4.5, ein Szenario mit gemäßigttem Klimaschutz [2]: Es geht von einer Erderwärmung von 2,6 °C bis zum Jahr 2100 gegenüber dem vorindustriellem Wert aus [4]. Das Maß der Reflexion von Materialien (vgl. Albedo) wird für beide Zeiträume als konstant angenommen. Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse (graue Emissionen) beziehen sich auf einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (Abbildung 10).



Abbildung 9: Beispielbild für einen begrünten Straßenraum

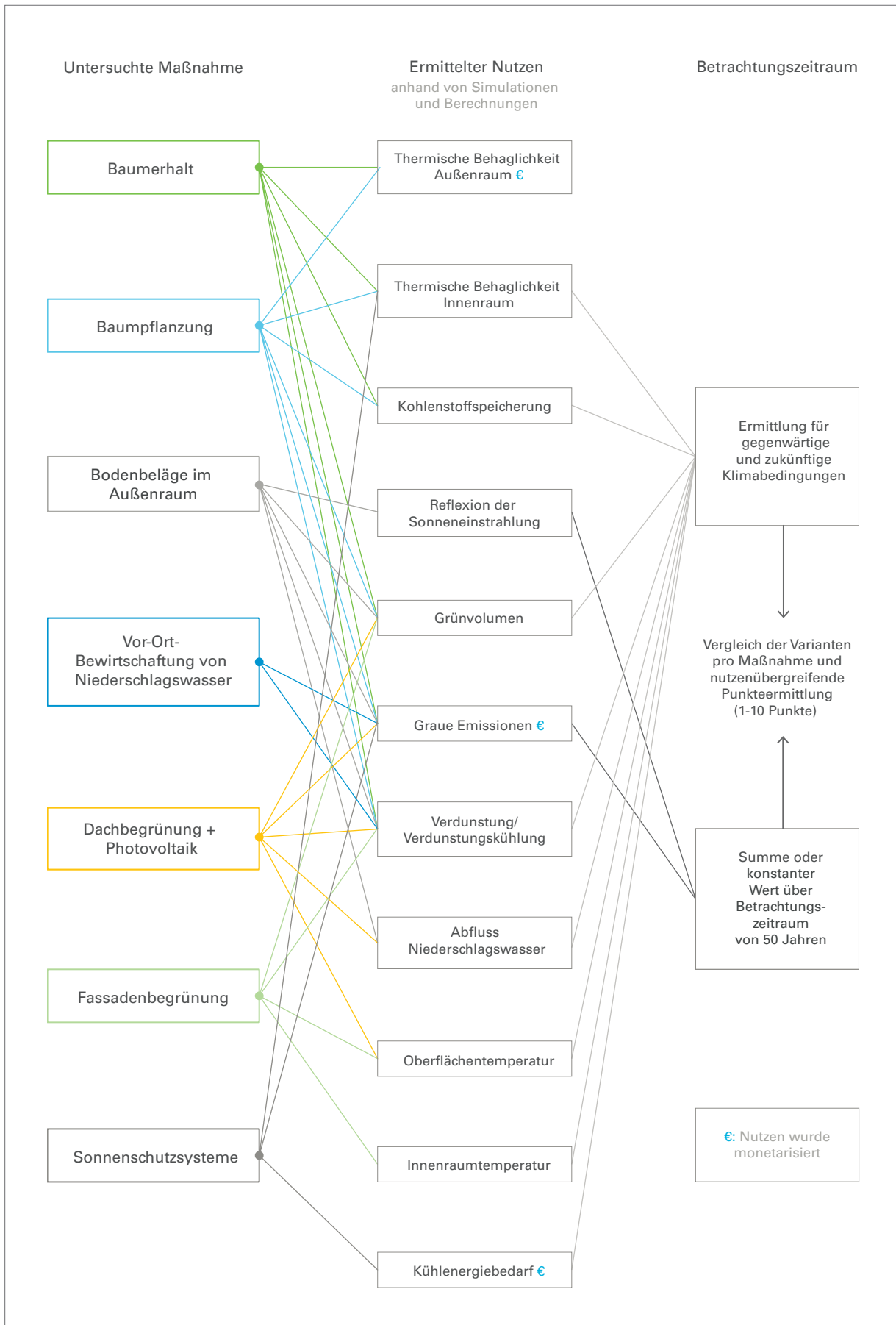


Abbildung 10: Überblick der ermittelten quantitativen Nutzenfaktoren für die betrachteten Maßnahmen

Thermische Behaglichkeit im Außenraum [°C PET]

- Als Maß für den menschlichen thermischen Komfort oder die gefühlte Temperatur ermittelten wir mit dem Tool ENVI-met [5, 6] die physiologische äquivalente Temperatur (PET) einer Referenzperson an einem Hitzetag ($T_{\max} > 30\text{ °C}$). Wesentliche Einflussfaktoren sind Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung sowie der Reflexionsgrad der Materialien [7]. Sofern die Werte über 35 °C PET liegen, ist die Wärmebelastung für den Menschen stark.
- Je höher der Wert, desto geringer ist die Punktzahl.
- In der Wirtschaftlichkeitsberechnung über Gesundheitskosten berücksichtigt (vgl. Kapitel 4).

Thermische Behaglichkeit im Innenraum [°C]

- Die thermische Behaglichkeit im Innenraum beschreibt die Größe PMV (Predicted Mean Vote), die auf einer Skala von -3 (sehr kalt) bis +3 (sehr heiß) das thermische Empfinden wiedergibt. Dabei fließen neben Faktoren wie Oberflächen- und Lufttemperatur, Luftfeuchte und -geschwindigkeit auch der Aktivitätsgrad und die Art der Bekleidung in die Berechnung ein. Die größte Zufriedenheit mit der Umgebung ist bei einem PMV von Null gegeben. [8] Dieser Wert resultiert aus Simulationsrechnungen, die mit Rhino Grasshopper erfolgten.
- Je näher der Wert an Null liegt, desto höher ist die Punktzahl.

Gebäudetemperatur im Innenraum [°C]

- Eine Verschattung des Gebäudes kann die thermische Belastung im Innenraum senken, wodurch das Wohlbefinden des Menschen und dessen Produktivität steigt. Die Innenraumtemperatur an einem Hitzetag ($T_{\max} > 30\text{ °C}$) wurde mit dem Tool ENVI-met [3, 4] berechnet.
- Je niedriger der Wert, desto höher ist die Punktzahl.

Kohlenstoffspeicherung [kg]

- Mit dem CityTree-Tool [9, 10] ermittelten wir die Speicherung von Kohlenstoff durch Bäume abhängig von Alter und Baumstandort beispielhaft für die Winterlinde (*Tilia cordata*). Je höher der Grünanteil einer Maßnahme oder eines Quartiers ist, desto mehr Kohlenstoff wird gespeichert.
- Je höher der Wert, desto höher ist die Punktzahl.

Reflexion der Sonneneinstrahlung (Albedo) [-]

- Eine Literaturrecherche [11] ergab die Albedo abhängig von der Helligkeit der Materialien.
- Je höher der Wert, desto höher ist die Punktzahl.

Grünvolumen [m³/m²]

- Das Grünvolumen für Bäume berechneten wir mit dem CityTree-Tool [9, 10] abhängig von Alter und Baumstandort beispielhaft für die Winterlinde (*Tilia cordata*). Für Oberflächen, Dächer und Fassaden wurden Literaturwerte angenommen.
- Je höher das Grünvolumen, desto höher ist die Punktzahl.

Graue Emissionen [kg CO₂-Äquiv.]

- Die Bilanzierung der Treibhausgas-Emissionen erfolgte mittels einer Lebenszyklusanalyse nach DIN 14044:2021-02 [12].
- Den CO₂-Ausstoß im Bau und Unterhalt von Gebäuden mindern Maßnahmen wie erneuerbare Energien in der Strom- und Wärmeerzeugung, nachwachsende Rohstoffe beim Bau oder Effizienz der Wärmebereitstellung.
- Je geringer der Wert, desto höher ist die Punktzahl.
- In der Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigen wir dies über die ermittelten Umweltkosten (vgl. Kapitel 4).

Verdunstung [%] und Verdunstungskühlung [kWh im Sommer/Baum]

- Die aktuelle Praxis zur Bewirtschaftung von Niederschlagswasser ist vor allem auf Versickerung und Ableitung ausgerichtet; jedoch sollte die Verdunstung bzw. Verdunstungskühlung für die Klimaanpassung als relevante Zielgröße betrachtet werden [13].
- Mit einer Wasserbilanz nach DWA-A 102-4 [14] berechneten wir die Verdunstung anteilig vom Jahresniederschlag. Je höher der Verdunstungsanteil, desto mehr Nutzenpunkte wurden vergeben.
- Die Verdunstungskühlung ermittelten wir mithilfe einer täglichen Wasserbilanzberechnung.
- Je höher der Wert, desto höher ist die Punktzahl.

Abfluss Niederschlagswasser [%]

- Eine Wasserbilanz nach DWA-A 102-4 [14] ergab den Anteil des Abflusses vom Jahresniederschlag.
- Je niedriger der Wert, desto höher ist die Punktzahl.

Oberflächentemperatur Hitzetag [°C]

- Eine mikroklimatische Simulation mit dem Tool ENVI-met [5, 6] lieferte die Oberflächentemperatur einer Fassade an einem Hitzetag ($T_{\text{max}} > 30 \text{ °C}$), um z. B. die Auswirkung einer Fassadenbegrünung zu messen [7].
- Je niedriger der Wert, desto höher ist die Punktzahl.

Kühlenergiebedarf [kWh/a]

- Wir ermittelten den Strombedarf für die Kühlung unter der Annahme, dass ab 26 °C Raumtemperatur ein Kühlgerät zum Einsatz kommt.
- Je niedriger der Wert, umso höher ist die Punktzahl.
- In der Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde dies über den Strompreis berücksichtigt (vgl. Kapitel 4).

Hitzetage und Tropennächte

Relevanz

Die Anzahl der Hitzetage pro Jahr wird sich in Bayern bis 2070 um das Drei- bis Vierfache erhöhen [2]. Auch Tropennächte werden zunehmen. Beides beeinflusst das Wohlbefinden von Menschen im Innen- und Außenraum negativ. Mit einer klimagerechten Gestaltung von Gebäuden und Freiräumen lassen sich die Temperaturen senken und damit die Aufenthaltsqualität erhöhen.

Extreme Hitze bei Tag und Nacht führt zu gesundheitlichen Risiken [15]. Dies verursacht Kosten, die die Allgemeinheit tragen muss [16]. Monetär zu bewerten, ist die Folge von Hitzetagen auch anhand steigender Kühlkosten für den Gebäudesektor. In Deutschland wird vermehrt aktiv gekühlt – auch in Wohngebäuden [17]. Bei konventionellen Kühlungssystemen wie Klimaanlage steigt der Stromverbrauch, was wiederum den CO₂-Ausstoß verstärkt [18].

Zudem speichern viele Materialien, wie Beton oder Asphalt, die Wärme und geben diese erst in der Nacht wieder ab. Das verstärkt den Wärmeinseleffekt [19]. Grünflächen hingegen vermindern unmittelbar Hitzeinseln in Stadträumen: Bei der Verdunstung von Niederschlagswasser wird Wärme entzogen, was sich kühlend auswirkt. Insbesondere in dicht bebauten Innenstädten sind extreme Hitzebelastungen und sogenannte Tropennächte darum häufiger als am Stadtrand oder auf dem Land.

Die Verschattung z. B. durch große Bäume steigert den Komfort im Außenraum. Eine Fassadenbegrünung kühlt ohne großen Bodenflächenbedarf Gebäude durch Verschattung und Verdunstung.

HITZETAGE UND TROPENNÄCHTE

Hitzetage sind Tage mit einem Temperaturmaximum von mindestens 30 °C. In Tropennächten sinkt das Temperaturminimum nicht unter 20 °C.

Klimagerechte Maßnahmen zur Reduktion von Hitze

Die folgenden Maßnahmen sind besonders effektiv an Hitzetagen und in Tropennächten.

- **Übergeordnete und lokale Durchlüftung im Quartier**
Kaltluftleitbahnen sollten möglichst nicht bebaut werden, um den Abtransport von Luftschadstoffen sowie die Zulieferung von Kaltluft zu gewährleisten und einer Überhitzung des Quartiers vorzubeugen.
- **Versiegelung minimieren und Oberflächen gestalten**
Werden Erschließungs- und Stellplatzflächen minimiert und (teil-)entsiegelt sowie Freiflächen und Dächer begrünt, mindert dies deutlich den Hitzeinseleffekt durch Verdunstung und die Wärmespeicherkapazität von Bodenoberflächen. Die Ergebnisse zeigten, dass eine extensive Begrünung von Dachflächen im Vergleich zu Kies die Oberflächentemperatur an einem Hitzetag von 53 °C auf 27 °C reduzieren kann. Helle Belagsflächen reduzieren durch den Albedoeffekt Oberflächentemperaturen zusätzlich. (Kapitel 6.3 und 6.5)

- **Lokalen Wasserhaushalt erhalten**

Um die Verdunstung zu erhöhen und so den lokalen Wasserhaushalt zu unterstützen, ist Niederschlagswasser vor Ort zu bewirtschaften. Bei Rückhalt, Nutzung und anschließender Versickerung von Niederschlagswasser sind oberirdische Anlagen (Mulde, Mulden-Rigole) unterirdischen (Rigole, Versickerungsschacht) vorzuziehen. Die Ergebnisse zeigten, dass diese ca. 17 % des anfallenden Niederschlagswassers verdunsten können. (Kapitel 6.4)

- **Bestandsbäume erhalten und zukunftsfähige Bäume pflanzen**

Ein vitaler, großer Baum hat eine sehr hohe Klimawirksamkeit. Das immense Kronenvolumen sorgt mit seiner Verschattungs- und Verdunstungsleistung für Komfort im Außenraum an Hitzetagen. Den Ergebnissen zufolge leistet ein gesunder Großbaum rund zehnmal soviel Verdunstungskühlung wie ein neu gepflanzter Baum.

Durch Verschattung von Fassaden und Reduktion der Umgebungstemperatur bleiben neben den Freiflächen auch die Gebäude kühler, was den technischen Kühlbedarf senkt. Für die Klimawirksamkeit braucht es allerdings große, vitale Bäume. Ein Baum, der heute neu gepflanzt wird, wird frühestens in 15 – 20 Jahren relevante Verschattungs- und Kühleffekte liefern. Bestandsbäume sind darum wichtig und zu schützen. (Kapitel 6.1 und 6.2)

- **Regen- und Grauwasser nutzen**

In Zisternen gespeichertes Regen- oder Grauwasser lässt sich zur Bewässerung urbanen Grüns oder zur Gebäudekühlung nutzen. Zisternen versorgen die Vegetation in heißen, trockenen Perioden ausreichend mit Wasser und leisten so Verdunstungskühlung.

- **Fassaden begrünen**

Die Begrünung von Fassaden dient als klimatischer Puffer von Gebäuden. Insbesondere an Standorten, an denen (noch) keine Großbäume vorhanden sind, ist Fassadenbegrünung effektiv. Die Ergebnisse zeigten, dass eine Begrünung die Oberflächentemperatur der Fassade an Hitzetagen um ca. 18 °C reduzieren kann. (Kapitel 6.6)

- **Wohnungen belüften**

Quer- oder Über-Eck-Lüftung schützt Innenräume gegen Überhitzung.

- **Sonnenschutz vor Fensterflächen verwenden**

Ein außenliegender Sonnenschutz vor verglasten Flächen reduziert die Überhitzung im Gebäude effektiv und ist innenliegenden Systemen vorzuziehen. (Kapitel 6.7)



Abbildung 11: Beispielbild für Abkühlung im Außenraum an einem Hitzetag

Starkregenereignisse

Relevanz

Klimaprojektionen deuten darauf hin, dass in Bayern künftig mit stärkeren Starkniederschlagsintensitäten im Sommer und häufigeren langanhaltenden, großflächigen Niederschlagsereignissen im Winter zu rechnen ist [2, 20]. Trotzdem wird sich die mittlere Jahresniederschlagssumme kaum verändern [2]. Anzahl und Intensität der Starkniederschlagstage sind regional unterschiedlich und standortspezifisch zu prüfen.

Durch starke oder langanhaltende Niederschläge eindringendes Wasser kann Gebäude stark schädigen. Eine Überlastung der kommunalen Entwässerungssysteme kann zu Schäden und Verschmutzungen an und in Gebäuden und an der Infrastruktur führen. Weitere Schäden wie Verschlammung der Grünflächen und Vitalitätsverlust der Bepflanzung sind in Freiflächen möglich, wenn Niederschlagswasser nicht gezielt abgeleitet und gedrosselt wird.

STARKREGEN

Besonders hohe Niederschlagsmengen treten innerhalb kurzer Zeit, örtlich begrenzt und oft mit Gewittern auf. Da sie schwer vorhersagbar sind, sind sie für Städte und Siedlungen mit hohem Anteil an versiegelter Fläche eine Herausforderung.



Abbildung 12: Überflutete Fläche nach einem Starkregenereignis

Das Klimazentrum des Bayerischen Landesamtes für Umwelt bietet unter www.klimainformationssystem.bayern.de einen anschaulichen Überblick über Klimakenngrößen, Klimaveränderung und verwandte Themenbereiche inklusive regionaler Unterschiede [2].

Klimagerechte Maßnahmen zur Minimierung von Schäden durch Starkregen

Die folgenden Maßnahmen sind bei Starkregen besonders wirksam.

- **Versiegelung minimieren**
Durch teilversiegelte statt vollversiegelte Oberflächen für Erschließungen und Stellplätze verdunstet und versickert mehr Niederschlagswasser auf der Fläche. Das verringert das Risiko von Schäden durch Überflutungen. Die Ergebnisse zeigten, dass von ungebundenen Pflastersteinen ca. 30 % weniger Niederschlag abfließt als von einer asphaltierten Fläche. Eine Begrünung wirkt sich positiv aus, da sie zusätzlich Verdunstung fördert. (Kapitel 6.3)
- **Dächer begrünen**
Je höher der Substrataufbau auf begrünten Dächern, desto mehr Niederschlagswasser wird zurückgehalten. Die Begrünung schützt zudem die Dachabdichtung vor extremen Witterungseinflüssen und kann deren Lebensdauer erhöhen. (Kapitel 6.5)
- **Retentionsräume multifunktional nutzen**
Flächen im Außenraum wie Spielplätze, Straßenräume oder Sportplätze lassen sich bei Starkregen multifunktional als Überflutungsflächen oder für offene Ableitungen und Notwasserwege nutzen.
- **Bauliche Maßnahmen am Gebäude**
Bauliche Maßnahmen am Gebäude wie Rückstauklappen oder eine weiße Wanne helfen, Schäden durch Starkregen vorzubeugen oder zu minimieren.

LITERATURHINWEIS

Die Broschüre "Wassersensible Siedlungsentwicklung" gibt einen Überblick über Maßnahmenpotenziale und die planerische Umsetzung der wasserbewussten Stadt [21].

Qualitative Nutzen für Umwelt und Gesellschaft

Neben ihrem quantitativen Nutzen, wie der Reduktion von Oberflächentemperaturen, wirken sich klimagerechte Maßnahmen auch qualitativ auf Umwelt und Gesellschaft aus. Der Klimawandel beeinflusst vor allem durch die Zunahme von Hitze und Trockenheit die Qualität von Freiräumen mit Konsequenzen für Bewohner:innen und Stadtnatur. Klimagerechte Maßnahmen erfüllen im Stadtraum also gleich mehrere Funktionen: Neben der Regulation des Mikroklimas in Innen- und Außenräumen wirken sie sich erheblich auf die Qualität urbaner Lebensräume aus.

Im urbanen Raum sind Lebensräume des Menschen immer auch Lebensräume für bestimmte Tiere und Pflanzen. Die Natur mit ihrer Artenvielfalt trägt wesentlich zur Qualität städtischer Freiräume bei. Bei der Gestaltung klimagerechter Freiräume und Gebäudehüllen sollten Bauherr:innen, Planende und Kommunen deshalb immer Freiraumqualität und Biodiversität zusammendenken.

Die ganzheitliche, zukunftsfähige Optimierung von Außenräumen ermöglicht eine höhere und bezahlbare Wohnqualität und Freiräume, die multifunktional nutzbar sind. Angenehme Aufenthaltsorte sind Treffpunkte und Orte des Austausches für unterschiedliche Generationen und soziale Milieus. Das fördert das gesellschaftliche Miteinander und den sozialen Zusammenhalt in Wohnquartieren. Spiel- und Sportflächen sowie naturnahe Rückzugsräume sind wichtig für individuelle Erholung und zum Ausgleich im Alltag. Qualitätsvolle Wohn- und Freiräume sorgen für Stressreduktion und Zufriedenheit der Bewohner:innen. Damit haben sie einen positiven Effekt auf deren allgemeine Gesundheit sowie die Produktivität im Schul- und Berufsleben. Dementsprechend erzielen Investitionen in klimagerechte Maßnahmen für qualitativ hochwertige Freiräume auch immer einen gesamtgesellschaftlichen und volkswirtschaftlichen Nutzen – im Sozial- und Gesundheitswesen und in der Privatwirtschaft.

Für Bauherr:innen bedeuten Immobilien mit hoher Lebensqualität wirtschaftliche Rentabilität und langfristige Investitionssicherheit. Sind Quartiere beliebt, kann die Miete entsprechend hoch sein. Langfristig sichern klimagerechte Maßnahmen die Wohnqualität und damit auch in Zukunft eine Vermietbarkeit der Wohnungen. Die geringeren Betriebskosten gewährleisten Mieter:innen die Bezahlbarkeit.



Abbildung 13: Beispielbild für Pflanzenvielfalt vor Gebäuden

Das DGNB-System für biodiversitätsfördernde Außenräume bietet Orientierung bei der Gestaltung von nachhaltigen, biodiversitätsfördernden Außenräumen und Gebäudehüllen. Der Kriterienkatalog besteht aus neun Kriterien, die den drei Themen ökologische, ökonomische sowie soziokulturelle und funktionale Qualität zugeordnet sind. [22]

Qualität durch klimagerechte Maßnahmen erhöhen

- **Bestandsbäume erhalten und zukunftsfähige Bäume pflanzen**
Baumkronen sind Lebensräume vor allem für Vögel und Insekten. Je älter der Baum, desto größer ist sein Artenpotenzial. Dementsprechend wichtig ist es, Bestandsbäume zu erhalten. Unterhalb der Baumkrone sind vielfältige Nutzungen wie z. B. Picknicken möglich, die an Hitzetagen von der Verschattung profitieren. Die Auswahl ökologisch wertvoller Baumarten begünstigt die Artenvielfalt. Bei Nutzungen ist auf einen intakten Wurzelraum zu achten.
- **Dächer begrünen**
Begrünte Dächer bieten ungestörte Lebensräume und sind zudem als Dachterrasse oder -garten nutzbar. Je dicker die Substratauflage des begründeten Daches, desto mehr Nutzungsmöglichkeiten, Pflanzenvielfalt und Bodenleben gibt es. Zudem lassen sich in Kombination mit einer Photovoltaik-Anlage (PV) hohe CO₂-Einsparungen über den Lebenszyklus eines Daches erreichen, wenn der erzeugte Strom den Netzbezug reduziert.
- **Fassaden begrünen**
Begrünte Fassaden bieten Lebensräume und Nahrungsquellen für Insekten und Vögel. Eine attraktive Begrünung kann Gebäude und Quartiere optisch aufwerten. An Loggien und Balkonen entstehen angenehme, verschattete Aufenthaltsorte für den Sommer.
- **Oberflächen gestalten und Versiegelung minimieren**
Ein intaktes Bodenleben ist die Grundlage für Biodiversität. Weniger Versiegelung und ausreichende Überdeckung ermöglichen es, dass mehr Pflanzen wachsen; Tiere haben mehr Lebensraum und Nahrung. Versiegelte Flächen hingegen bieten kaum Lebensraumpotenziale. Durch wasserdurchlässige Beläge lassen sich teilweise Bodenfunktionen wiederherstellen und Möglichkeiten für Fugenvegetation schaffen. Helle, optisch ansprechende Oberflächenbeläge steigern die Freiraumqualität.
- **Lokalen Wasserhaushalt erhalten**
Oberirdische Rückhaltung, Speicherung, Nutzung, Verdunstung und Versickerung ermöglichen einen ausgeglichenen Wasserhaushalt, der Pflanzen zu Gute kommt. Wechselfeuchte Bereiche sind besondere Lebensräume für seltenere Tiere und Pflanzen. Die Nutzung von Niederschlagswasser in Zisternen erlaubt eine ökologisch nachhaltige Bewässerung, die für eine vitale, artenreiche Bepflanzung vor allem an Extremstandorten wichtig ist.
- **Retentionsräume multifunktional nutzen**
Retentionsräume lassen sich vielfältig als naturnahe Biotope, Spiel-/Grünflächen oder auch als Quartiersplätze nutzen.



4

WAS KOSTEN KLIMAGERECHTE MASSNAHMEN?

Damit Maßnahmen zum klimagerechten Bauen in der Praxis umgesetzt werden, müssen sie sich wirtschaftlich darstellen lassen.

Relevanz einer lebenszyklusbasierten Kostenberechnung

Zum Lebenszyklus einer Immobilie zählen die Phasen Planung und Errichtung, Betrieb und Erhaltung, Erneuerung, Abriss und Entsorgung. Die im Lebenszyklus entstehenden Kosten, die sich dem Projekt unmittelbar zuordnen lassen, sind die Lebenszykluskosten (engl.: Life Cycle Costs, LCC). Durch den Vergleich der LCC einzelner Varianten lässt sich die auf die gesamte Lebensdauer bezogene, wirtschaftlich optimierte Variante ermitteln.

Dies gilt auch für die Bewertung klimagerechter Maßnahmen. Zu betrachten sind dabei neben den Herstellungskosten die langfristigen Unterhaltskosten, die durch Wartung, Betrieb und Sanierungen entstehen. Der Lebenszyklus-Gedanke ist bereits in frühen Planungsphasen zu berücksichtigen, wenn die Einflussmöglichkeiten noch hoch sind.

Im Verlauf des Lebenszyklus nimmt der Grad der Beeinflussbarkeit der Erst- und Folgekosten rapide ab. Vor Beginn der Ausführungsphase ist es möglich, dass die Kostenbeeinflussbarkeit durch die Auftragsvergabe steigt; sie sinkt aber vor allem in der Nutzungsphase auf eine marginale Einflussnahme (Abbildung 14).

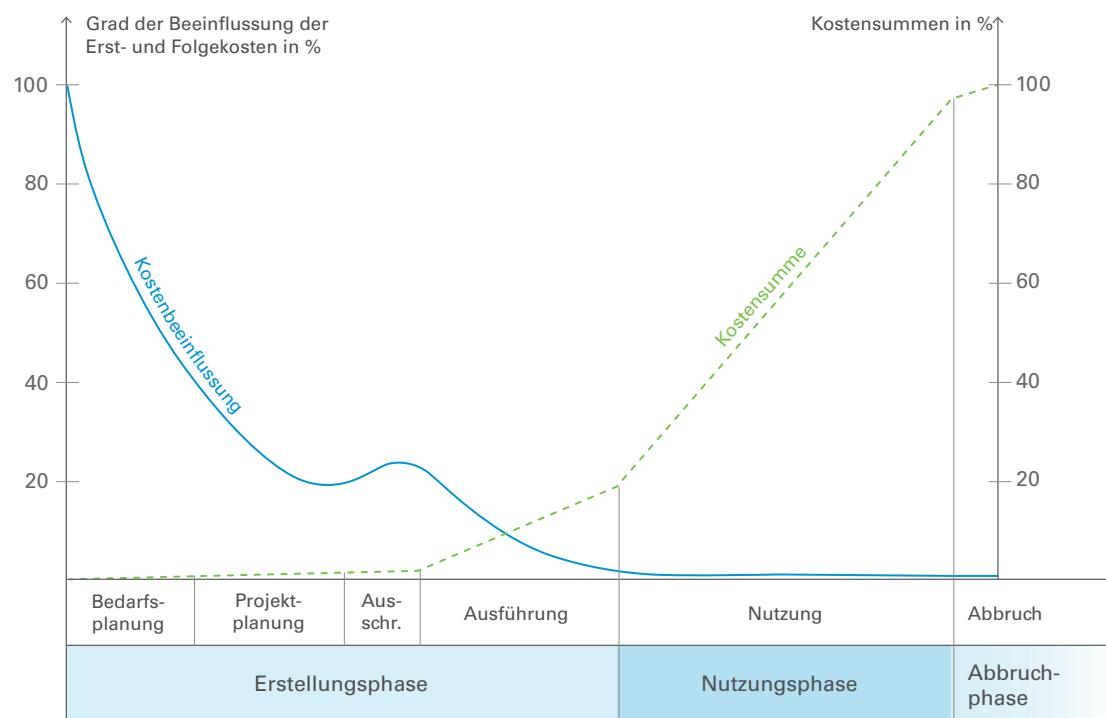


Abbildung 14: Beeinflussbarkeit und Höhe der Herstellungs- und Folgekosten

DEFINITION LEBENSZYKLUSKOSTENBERECHNUNG (ENGL. LIFE CYCLE COSTING, LCC)

LCC bezeichnet die Gestaltung von objektbezogenen Maßnahmen über den **gesamten** Lebenszyklus der Objekte hinweg mit dem Ziel der wirtschaftlichen Optimierung. Dabei werden sämtliche im Lebenszyklus des Gebäudes entstehenden Kosten inklusive **Errichtung, Betrieb und Rückbau** erfasst. Die in der ISO 15686-5 [23] definierte Betrachtung ist ein

rein ökonomischer Ansatz für Investitionsplanungen. Für die konkrete Immobilie bedeutet dies, dass eine LCC mit dem Ziel erstellt wird, verlässliche Aussagen über die Ausgaben einer Immobilie zu generieren oder Optionen der Ausgestaltung des Bauprojekts zu bewerten.

Anwendung einer lebenszyklusbasierten Kostenberechnung in der Praxis

Die LCC-Betrachtung bildet möglicherweise entstehende höhere Investitionskosten ab, die durch klimagerechte Maßnahme entstehen, und stellt diese Varianten gegenüber. Ziel ist, zu untersuchen, ob und wo sich Kosten im laufenden Betrieb reduzieren lassen und ob diese den Mehraufwand bestimmter Maßnahmen rechtfertigen. Gleichzeitig sind auch die Vorteile geringerer Folgekosten in der Nutzungsphase einer klimaangepassten Ausführung transparent zu machen. Besonders zu beachten sind dabei die veränderten klimatischen Rahmenbedingungen und die dadurch erhöhten Aufwendungen beispielsweise für den Kühlenergiebedarf von Gebäuden. Fokus der LCC-Betrachtung im Forschungsprojekt war die Gegenüberstellung von Varianten klimagerechter Maßnahmen und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten. Die reine LCC betrachtet somit zunächst keine ggf. höheren Erträge oder Nutzenpotenziale der Ausführungsvarianten. Auch werden keine Kosten berücksichtigt, die insgesamt für die Allgemeinheit, respektive Gesellschaft, entstehen.

Nettobarwert (NBW) und Diskontierungszinssatz

Da die Zahlungen für die Herstellung, den Betrieb und etwaige Rückbau- und Wiederherstellungskosten zu unterschiedlichen Zeiten fällig werden, ist es notwendig, alle Auszahlungen auf einen einheitlichen Bezugszeitpunkt zu beziehen. Hierfür werden die künftigen Zahlungen mittels eines Diskontierungszinssatzes abgezinst und so in einen Barwert überführt. **Der Nettobarwert (NBW) gibt den gegenwärtigen Wert aller künftigen Zahlungsströme an** und spiegelt letztlich die Vorteilhaftigkeit einer Investition. Er dient als Entscheidungsgrundlage zur Beurteilung von alternativen Maßnahmen. Ein niedriger NBW deutet auf eine günstigere Investition hin. Der zu wählende Diskontierungszinssatz ist je Investor individuell zu veranschlagen und setzt sich aus dem Verzinsungsanspruch und dem Rendite-Risiko-Profil des Investierenden sowie der Anlageklasse zusammen.

BEISPIEL DISKONTIERUNGSSZINSSATZ ERNEUERUNG DACH

Geplant ist, ein Dach für ein Gebäude herzustellen: Die Varianten Kiesdach und extensive Dachbegrünung stehen zur Auswahl. Das Kiesdach hat Herstellungskosten von ca. 60 €/m², die extensive Dachbegrünung von ca. 75 €/m². Das Kiesdach muss in ca. 25 Jahren erneuert werden, hierbei fallen weitere Kosten an. Das Dach mit der extensiven Dachbegrünung ist hingegen länger nutzbar. Um diesen künftigen, erwartbaren Zahlungsstrom in der

Gegenwart bewerten und die Varianten vergleichen zu können, muss die dafür notwendige Summe auf den Erstellungstag abgezinst werden. Hierfür wird ein Zinssatz gewählt, der bei einer alternativen Anlage mit einem vergleichbaren Rendite-Risikoprofil zu erzielen ist. Die Summe der zu erwartenden abgezinsten Zahlungsströme bildet somit den Nettobarwert. Mit diesem kann bewertet werden, ob es sinnvoll ist, diese höhere Investition zu tätigen.

BEISPIEL DISKONTIERUNGSSZINSSATZ UND INFLATION

Zu beachten ist auch, dass in der Realität die gleichen Materialien in Zukunft, aufgrund von Preissteigerungen (Inflation), ggf. teurer sind. Um die reale Verzinsung zu ermitteln, ist neben dem Diskontierungszinssatz eine Annahme über die künftig zu erwartende Inflation zu treffen und zu berücksichtigen.

Lebenszykluskostenberechnung (LCC) zukünftig als Standard

Das klassische Kostenmanagement nach DIN 276 [24] in der Projektentwicklung – und damit eine reduzierte Beurteilung rein anhand der Herstellungskosten zum Errichtungszeitpunkt – ist zu überdenken. Die Integration von Lebenszykluskosten ist ein Muss für eine zukunftsorientierte, nachhaltige und wirtschaftliche Projektentwicklung. Ziel der LCC ist ein sinnvoller, bewusster Umgang mit wirtschaftlichen Ressourcen. Eine lebenszyklusbasierte Betrachtung aller Kosten stellt sicher, dass die Effekte künftiger Anpassungskosten oder generell hohe Unterhaltskosten aufgrund des Klimawandels einen ausreichend hohen Stellenwert bei der Entscheidungsfindung erhalten. Es ist ein Schritt hin zu einer nachhaltigeren, bewussteren Baukultur, die den Fokus auf die langfristigen Konsequenzen des gegenwärtigen Handelns legt.

Anwendungsbeispiel

Das Vorgehen zur LCC-Berechnung erläutern wir anhand der Herstellung eines Daches. Abbildung 15 verdeutlicht die finanziellen Unterschiede einer extensiven Dachbegrünung gegenüber einem Kiesdach über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren. Die Grafik ermöglicht eine ganzheitliche Sicht auf die Lebenszykluskosten. Die hellere Farbschattierung repräsentiert den jeweiligen NBW zum heutigen Stichtag. Die erhöhten Herstellungs- und Unterhaltskosten des Gründachs werden durch die notwendige Erneuerung des Kiesdachs in der LCC ausgeglichen. Das Gründach wird im Betrachtungszeitraum nicht erneuert.

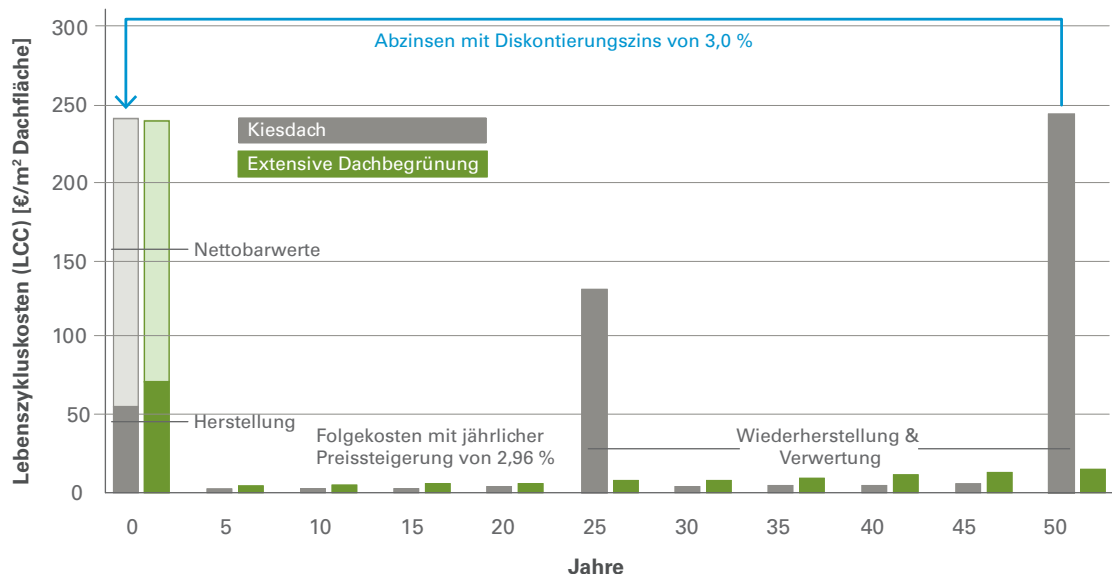


Abbildung 15: LCC der Dachvarianten pro m² (Brutto, NBW für das Jahr 2023)

Die Ausführung als Kiesdach verursacht geringere Herstellungskosten als eine extensiv begrünte Dachfläche; allerdings ist das Kiesdach nach 25 Jahren zu erneuern. Die laufenden Unterhaltskosten beider Varianten sind fast identisch. Vergleicht man die beiden Dächer in einer Barwert-Betrachtung mit einer Inflationserwartung von ca. 3 %, einem Diskontierungszinssatz von 3 % und einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren, zeigt sich, dass das Gründach günstiger ist. Neben diesen bereits bei der LCC-Betrachtung sichtbaren Kostenvorteilen erzeugt ein begrüntes Dach weitere positive Effekte, die Kapitel 6.5 ausführt.

Die Höhe des gewählten Zinssatzes hat signifikanten Einfluss darauf, wie künftige Kosten und Nutzen im Vergleich zu den heutigen Investitionen bewertet werden.

Erweiterung durch Umwelt- und gesellschaftliche Kosten

Die erweiterte LCC-Methode, Whole Life Costing (WLC) genannt, ermöglicht es, die Immobilie im Unternehmens- und im volkswirtschaftlichen Kontext bzw. aus Sicht des privaten Investors zu betrachten. Aspekte, die Gesellschaft und Umwelt betreffen (vgl. Infobox), werden ergänzend zu den Positionen der LCC berücksichtigt und ebenfalls monetär bewertet.

Der Einbezug externer Kosten, die nicht direkt beim Projektträger anfallen, ist essenziell, um die Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft vollständig zu verstehen und verantwortungsvolle Entscheidungen zu treffen. Dies trägt dazu bei, nachhaltigere Lösungen zu finden und langfristig negative Konsequenzen zu vermeiden. Die Internalisierung dieser Kosten ist besonders bei der Abwägung von klimagerechten Maßnahmen der öffentlichen Hand in Zukunft unabdingbar: Denn so lässt sich sicherstellen, dass öffentliche Gelder für Zwecke verwendet werden, die den Klimaschutz und die Klimaanpassung fördern.



Abbildung 16: Beispielbild für artenreiche Begrünung im Straßenraum

Life Cycle Costs (LCC)

(Wieder-)Herstellungskosten

- Kosten, die sich aus Einbau, Montage und Produktion bei der (Erst-)Investition ergeben.
- Ggf. durch die notwendige Erneuerung anfallende Herstellungskosten in einem Betrachtungszeitraum, die nach Ablauf der Nutzungsdauer eines Bau-/Anlagenteils anfallen. [25]

Unterhaltskosten

- Kosten für Instandhaltung, Pflege, Reinigung, Bewässerung und Wartung.
- Betriebskosten für Heizen und ggf. Kühlung. [25]
- Grundannahme: Keine Berücksichtigung der Niederschlagswassergebühren, da diese meist komplett entfallen, wenn das Grundstück vollständig von der Kanalisation abgekoppelt ist.

Verwertungskosten

- Kosten für Abbruch, Rückbau, Recycling und Entsorgung nach Ablauf der Nutzungsdauer. [25]

Die Whole Life Costs (WLC) enthalten zudem

Gesundheitskosten

- Wirtschaftliche gesundheitsbezogene Kosten pro Bewohner:in, die an einem Hitzetag entstehen. Aufgrund der steigenden Anzahl Hitzetage pro Jahr ist eine erhöhte Krankenhausrate zu verzeichnen. Maßnahmen mit einem kühlenden Effekt haben somit sinkende Gesundheitskosten zur Folge. [26]
- Gesundheitskosten, die anfallen, wenn die Tageshöchsttemperatur über 30 °C steigt. Die Anzahl der Hitzetage wurde basierend auf [2] mit den Kosten aus [26] angenommen.

Umweltkosten

- Kosten für Schäden, die für die Gesellschaft aufgrund von Umweltbelastungen durch die Emission von Treibhausgasen entstehen [27].
- Umweltkosten für Baumneupflanzungen basierend auf dem Stromverbrauch für Kühlenergiebedarf aus Simulationen. Diese berechneten wir auf Basis der Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse (Kapitel 3, Seite 21) pro Maßnahme nach den Empfehlungen zur CO₂-Bepreisung des Umweltbundesamtes [27].

Anwendungsbeispiel Umweltkosten und Gesundheitskosten

- **Umweltkosten:** Umweltbelastungen verursachen Kosten für die Gesellschaft. Das Umweltbundesamt [27] legt einen Wert von 195 € pro Tonne CO₂ zugrunde, um menschengemachte Umweltschäden zu monetarisieren.
Beispiel: In einem Neubauprojekt mit 50 Wohneinheiten auf 3.500 m² Wohnfläche wird eine Klimaanlage installiert, die pro Jahr 50.000 kWh Strom verbraucht. Wird dieser Strom aus dem Netz bezogen, erzeugt er Treibhausgasemissionen von rund 30.000 kg CO₂-Äquivalenten, die Umweltkosten von rund 5.900 € pro Jahr entsprechen.
- **Gesundheitskosten:** Volkswirtschaftler:innen haben ermittelt, dass pro Hitzetag gesundheitsbezogene Kosten von 50 Cent pro Person anfallen [26].
Beispiel: In einem stark asphaltierten Neubauquartier wird Wohnraum für 3.000 Bewohner:innen geschaffen. Es gibt keinen Baumbestand, lediglich Neupflanzungen, was zu hohen thermischen Belastungen aufgrund geringer Verschattung führt. Geht man davon aus, dass dadurch 15 Hitzetage pro Jahr entstehen (Tage, an denen die Temperatur im Quartier einen Höchstwert von 30 °C überschreitet), folgen daraus Gesundheitskosten von über 22.500 € pro Jahr.

Kostenermittlung

Den ermittelten Kosten liegen verschiedene Quellen zugrunde: Diese stammen vorrangig aus dem Baukosteninformationszentrum (BKI) 2022/2023 [28]. Hinzu kamen Angaben von Herstellern (z. B. [29–31]), Fachleuten (z. B. Beratungsstelle für Energieeffizienz und Nachhaltigkeit der Bayerischen Architektenkammer, Bundesverband GebäudeGrün e.V.) und aus Veröffentlichungen (z. B. [27, 32–35]). Mithilfe dieser Daten konnten wir die in den letzten Jahren evidente massive Baukostensteigerung und sehr spezifische Ausführungsvarianten, für die es noch wenige Vergleichspreise/Benchmarks gibt, berücksichtigen. Nicht berücksichtigt haben wir Förderungen und Finanzierungskonditionen der jeweiligen Maßnahmen, da sich diese regional unterscheiden, starken zeitlichen Schwankungen unterliegen und somit projektspezifisch aktuell zu erheben sind. Die Kosten in dieser Broschüre werden stets als Nettobarwert angegeben, es sei denn, dies ist explizit anders erwähnt. Die Begriffe LCC und WLC werden im Folgenden stets gleichbedeutend mit dem Nettobarwert im Sinne der LCC oder WLC verwendet.

Bei allen Kosten handelt es sich um Bruttokosten (inkl. Mehrwertsteuer). Abhängig von der jeweiligen Klimaanpassungsmaßnahme werden die Kosten pro Stück oder pro m² angegeben, in Abhängigkeit der jeweils gängigen Bezugsgröße.

Forschungsergebnisse: Kosten klimagerechter Maßnahmen

Bringen klimagerechte Maßnahmen höhere Kosten mit sich als konventionelle Bauweisen? Unseren Ergebnissen zufolge sind die Herstellungskosten der klimagerechten Maßnahmen meist höher als die der konventionellen Bauweisen. Jedoch können viele der untersuchten klimagerechten Maßnahmen in Zukunft die zu erwartenden Betriebs- und Unterhaltskosten reduzieren. Dadurch entsteht ein geringerer NBW als für konventionelle Maßnahmen. Wichtig ist dabei die Ausführungsqualität der Maßnahme, da diese entscheidend für ihre Langlebigkeit und Klimawirksamkeit ist. Im Folgenden werden wir die Ergebnisse als Barwerte darstellen. Wenn wir von Kosten im Sinne der LCC oder der WLC sprechen, ist somit stets der Nettobarwert (NBW) der entsprechenden Betrachtung gemeint.

Eine detaillierte Kostenaufstellung der einzelnen Maßnahmen ist dem Endbericht des Forschungsprojektes zu entnehmen und hier beispielhaft ausgeführt.

- **Baumbestand erhalten**

Der Erhalt eines gesunden Baumbestands ist, falls ein Baumschutz nötig ist, mit Herstellungskosten von ca. 2.000 € pro Baum verbunden. Die Fällung und Ersatzpflanzung eines neuen Baumes kosten hingegen rund 3.500 €. Die Unterhaltskosten sind für beide Bäume gleich. (Kapitel 6.1)

- **Baumpflanzung**

Die Pflanzung von neuen Bäumen in einer Grünfläche ist mit Herstellungskosten von ca. 3.000 € pro Baum und Lebenszykluskosten (LCC) von 6.000 € am günstigsten. Ist ein Baum in einer teilversiegelten Fläche neu zu pflanzen, steigen die Herstellungskosten. Bäume, die nach aktuellem Minimumpflanzstandard [36] gepflanzt werden, ziehen hohe Unterhalts- oder Wiederherstellungskosten nach sich. Wachsende Bäume aufgrund eines unzureichenden Standortes nicht, können Umweltkosten im Sinne der WLC entstehen. (Kapitel 6.2)

- **Bodenbeläge im Außenraum**

Rasen ist mit Lebenszykluskosten von ca. 190 €/m² die kostengünstigste Variante, bietet jedoch nicht die gleichen Funktionen wie befestigte Flächen. Für Hof-, Verkehrs- und Erschließungsflächen lassen sich Varianten von Bodenbelägen einsetzen, die sich beispielsweise durch ihren Versiegelungsgrad unterscheiden. Die Lebenszykluskosten sind für Asphalt und Pflastersteine aus Beton jeweils ca. 460 €/m². Pflastersteine aus Naturstein sind mit 550 €/m² über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren teurer, aber auch langlebiger. Rasenfugenstein liegt mit ca. 490 €/m² über den Lebenszyklus in der Mitte. (Kapitel 6.3)

- **Vor Ort Bewirtschaftung von Niederschlagswasser durch Versickerung**

Versickerungsmulden sind mit 10 €/m² angeschlossener Fläche über den Lebenszyklus die günstigste Option, um Niederschlagswasser zu versickern. Sind die Ausgangsbedingungen für eine Versickerungsmulde nicht gegeben, liegen die Kosten für Mulden-Rigolen-Elemente und Rigolen-Elemente bei ca. 50 €/m² angeschlossener Fläche über den Lebenszyklus. Durch die schlechte Ökobilanz von Rigolen-Elementen fallen Umweltkosten im Sinne der WLC an, die ca. drei bis fünfmal so hoch sind wie die Kosten für Bauherr:innen. (Kapitel 6.4)

- **Dachbegrünung**

Die Lebenszykluskosten für eine extensive Dachbegrünung sind im Vergleich zum Kiesdach etwa gleich hoch. Mit Stromerzeugung durch eine PV-Anlage rentiert sich diese Investition schon nach wenigen Jahren. Intensive Dachbegrünungen sind in der Konstruktion und im Unterhalt teurer als extensive Dachbegrünungen. (Kapitel 6.5)

- **Fassadenbegrünung**

Die Herstellungskosten für eine großflächige bodengebundene Fassadenbegrünung liegen bei ca. 85 €/m² Fassade. Die Unterhaltskosten unterscheiden sich stark, je nachdem wie viel Wurzelraum und Wasser die Pflanze hat. Ist eine Bewässerung notwendig, steigen die Unterhaltskosten stark. Die Lebenszykluskosten liegen dann bei ca. 780 €/m² Fassade. Bei ausreichender Versorgung durch eine unversiegelte Fläche liegt der NBW bei 510 €/m² Fassade. (Kapitel 6.6)

- **Sonnenschutzsysteme**

Außenliegende Sonnenschutzsysteme vor Fensterflächen sind mit ca. 3.000 € pro m² Fenster über den Lebenszyklus verbunden. Eine innenliegende Verdunklung ist mit 2.400 € etwas günstiger. Ohne Sonnenschutz können durch erhöhte Energiekosten für das Kühlen im Gebäude weitere Umweltkosten im Sinne der WLC anfallen. (Kapitel 6.7)



Abbildung 17: Dachbegrünung mit PV-Anlagen

Zur Beurteilung der untersuchten Ausführungsvarianten in Bezug auf Klimaschutz und –anpassung haben wir neben den relevanten Kosten auch den nicht monetär bewertbaren Nutzen ermittelt. Eine Kosten-Nutzen-Bewertung stellt die Kosten einer Maßnahme dem erzielbaren Nutzen gegenüber. Im Folgenden sind die Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Bewertung für die untersuchten Maßnahmen zusammengefasst. Kapitel 6 informiert im Detail über die jeweiligen Maßnahmen.

Baumerhalt

- Der Erhalt gesunder Bestandsbäume ist einer Fällung mit Ersatzpflanzung vorzuziehen, denn der Effekt der Bestandsbäume auf das Mikroklima wirkt sofort. Neupflanzungen brauchen Jahrzehnte bis sie dieselbe Klimawirksamkeit entfalten. Der Baumerhalt ist, selbst wenn Baumschutzmaßnahmen nötig sind, kostengünstiger als eine Fällung mit Ersatzpflanzung.

Baumpflanzung

- Bei Neupflanzungen sind die standortspezifische Wahl der Baumart und die Optimierung des Standorts entscheidend, um unter Berücksichtigung künftiger Klimabedingungen ein optimales Wachstum und den langfristigen Erhalt zu gewährleisten.
- Gegenwärtig werden oft die absehbaren Klimaveränderungen zu wenig berücksichtigt, weshalb Bäume nicht ausreichend wachsen können, um einen positiven Beitrag zur Kühlung eines Quartiers zu leisten. Dies führt letztlich zu höheren Kosten für Investor:innen im Zeitverlauf.
- Je höher der Versiegelungsgrad, umso notwendiger ist eine ausreichende Wasserversorgung (Bewässerung oder optimierter Wurzelraum), um Klimawirksamkeit und Ökosystemleistungen der Bäume zu ermöglichen. Ein Baumstandort in einer Grünfläche ist am kostengünstigsten und bietet die besten Standortbedingungen.
- Nur ausreichend versorgte Bäume wachsen voraussichtlich zu vitalen, klimawirksamen Großbäumen heran. Sie verursachen andernfalls hohe Kosten für Bewässerung und ggf. Ersatzpflanzungen. Eine Folge können erhöhte Kühlkosten im Gebäude oder externe Gesundheitskosten im Sinne der WLC sein. Daher sind sie für die Gesellschaft und Bauherr:innen kostenintensiv.

Bodenbeläge im Außenraum

- Ist eine Flächenbefestigung nicht zwingend notwendig, sind Grünflächen wie Rasen und Wiesen die kostengünstigste Option der Bodenbeläge mit dem höchsten Nutzen, beispielsweise für Wasserhaushalt und Biodiversität. Ist eine Befestigung nötig, unterscheiden sich die Kosten für Pflastersteine aus Beton und Rasenfugensteine nicht maßgeblich und sind nicht mit höheren Kosten verbunden als Asphalt. Je nach Anforderungen an die Funktionalität ist der Einsatz abzuwägen.
- Je geringer der Anteil des Niederschlages, der von Belägen abfließt, desto höher ist die Verdunstungs- und Versickerungsleistung. Dadurch entsteht ein Nutzen für die Umwelt, da ein Teil des Niederschlagswassers dem natürlichen Wasserkreislauf erhalten bleibt und es auch bei Starkregen zu einer Reduzierung des Abflusses kommt. Dies spart Aufwand und Kosten für Regenwasserbewirtschaftungsanlagen oder Abwassergebühren und entlastet kommunale Kanalnetze.
- Beim Bau von Erschließungsflächen sind möglichst wasserdurchlässige Pflastersteine dem Asphalt vorzuziehen. Pflastersteine aus Naturstein weisen bei Herstellung, Nutzungsdauer und Wiederverwertbarkeit eine bessere Ökobilanz auf als solche aus Beton.

Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser

- Die dezentrale Bewirtschaftung von Niederschlagswasser umfasst den Rückhalt (möglichst oberflächlich), die Verdunstung, die Nutzung, die Versickerung und ggf. die Einleitung in ein ortsnahes Gewässer. Diese einzelnen Stufen werden idealerweise kaskadisch angesetzt. Je geringer der Niederschlagsabfluss von angeschlossenen Flächen ist, desto geringer muss die Dimensionierung einer Anlage zur Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser durch Versickerung ausfallen.
- Bei gut durchlässigen Böden ist eine Versickerungsmulde die kostengünstigste Option mit dem höchsten Nutzen, da sie auch Speicherung und Verdunstung umfasst. Die bewachsene Bodenzone von Versickerungsmulden lässt sich zudem biodivers bepflanzen und trägt so zusätzlich zu Verdunstungskühlung und Erhöhung der Artenvielfalt in Siedlungen bei. Im Vergleich zu (Mulden-)Rigolen-Elementen, die bei schlechter durchlässigen Böden zum Einsatz kommen, ist ihre CO₂-Bilanz besser, da Versickerungsmulden aus biologisch abbaubaren Materialien hergestellt werden. Dadurch fallen keine weiteren Kosten im Sinne der WLC an. Alternativ sind bei schlechter durchlässigen Böden auch Versickerungsteiche nutzbar, die neben Speicherung und Versickerung auch Verdunstung ermöglichen.
- Bei unzureichenden Ausgangsbedingungen für eine Versickerungsmulde sind Mulden-Rigolen-Elemente den Rigolen-Elementen vorzuziehen, da sie Verdunstung ermöglichen. Für Bauherr:innen haben beide Systeme ähnliche Kosten pro m² angeschlossener Fläche.
- Bei Mulden-Rigolen-Elementen und Rigolen-Elementen beeinflusst das Material des Füllkörpers die Ökobilanz: Durch einen aufwändigen, energieintensiven Herstellungsprozess sind beispielsweise bei Systemen mit Kiesschüttung die CO₂-Emissionen höher als bei vergleichbaren Systemen aus Kunststoff. Allerdings sind die Auswirkungen von Kunststoff-Füllkörpern z. B. in Bezug auf Recycling und Ausbau nicht vollständig bekannt. Daher ist bei schlecht versickerungsfähigem Boden zwischen Füllkörpern aus Kunststoff oder Kiesschüttung abzuwägen.
- Die schlechte Ökobilanz der Rigolen-Elemente führt zu hohen Umweltkosten, weshalb die Kosten für die Gesellschaft je nach Füllkörpermaterial ca. drei- bis fünfmal so hoch sind wie die reinen Lebenszykluskosten (LCC).

Dachbegrünung

- Dachbegrünungen verringern die abflusswirksame Fläche erheblich. Dadurch sinken die Kosten für die Entsorgung des Niederschlagsabflusses in allen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen (z. B. Versickerungsanlagen) und es wird zum Erhalt des natürlichen Wasserhaushalts durch Verdunstung beigetragen. Die Kosten für eine extensive Dachbegrünung unterscheiden sich über den Lebenszyklus nicht von denen eines Kiesdaches. Durch den höheren Nutzen des extensiven Gründaches ist dieses einem Kiesdach vorzuziehen. Durch eine bewährte wurzelfeste Dachabdichtung lassen sich Schäden am Gebäude ausschließen. Auf den Einsatz schadstofffreier Materialien ist dabei zu achten.
- Die Installation einer PV-Anlage in Kombination mit einer extensiven Dachbegrünung ist problemlos möglich und erzeugt Vorteile in Bezug auf die Effizienz der Stromerzeugung. Ökonomisch trägt sich diese Investition schon nach wenigen Jahren.
- Intensive Dachbegrünungen bieten ein hohes Nutzungspotenzial und hohe Aufenthaltsqualität, sind aber mit höheren Kosten verbunden. Je nach statischen Gegebenheiten, Nutzungsanforderungen und Budget ist die richtige Begrünungsart (intensiv – extensiv) zu wählen.

Fassadenbegrünung

- Besonders an Hitzetagen senken großflächige Fassadenbegrünungen die Innenraumtemperatur und wirken sich positiv auf das Innenraumklima aus. Fassadenbegrünungen sind insbesondere wirksam, wenn der Baumbestand im Umfeld des Gebäudes noch klein oder nicht vorhanden ist. Zudem wird die Oberflächentemperatur durch Verschattung der Fassade deutlich reduziert, durch Verdunstung werden Mikroklima und Wasserhaushalt positiv beeinflusst.
- Eine geringe Versiegelung des Wurzelraumumfelds reduziert den Bewässerungsbedarf maßgeblich. Fassadenpflanzen, die mit einem minimalen Wurzelraum [37] gepflanzt werden, können unter künftigen Klimabedingungen ohne zusätzliche Wasserzufuhr durch Bewässerung kaum überleben. Eine Bewässerung erhöht die Betriebskosten. Daher sollte ein unversiegelter Standort mit ausreichendem Wurzelraum gewährleistet werden, sodass der Bewässerungsbedarf entfällt bzw. reduziert werden kann.
- Die Kosten der Begrünung sind gegen vielfältigen, nicht monetarisierbaren Nutzen wie Aufenthaltsqualität und Artenschutz abzuwägen.

Sonnenschutzsysteme vor Fensterflächen

- Den größten Effekt zeigt ein außenliegender Sonnenschutz, wenn die Verschattung durch Bäume gering ist. Ein erhöhter Heizenergiebedarf durch den Sonnenschutz im Winter lässt sich mit steuerbaren Systemen vermeiden.
- Innenliegende Systeme dienen vorrangig der Verdunkelung und schützen deutlich schlechter vor Überhitzung als außenliegende Systeme.



Abbildung 18: Begrünte Fassade eines Gebäudes

Mögliche Förderlücken identifizieren

Die Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Bewertung enthalten keine Förderungen, da diese von kommunalen Gegebenheiten abhängen und sich oft schnell wandeln. Folglich sollten Bauherr:innen und Planende im Zuge der Projektkalkulation prüfen, ob es eine Förderung für bestimmte Maßnahmen wie Gründächer, Fassadenbegrünung, PV und Zisternen gibt. Sind keine vorhanden, kann die Kommune die Kosten-Nutzen-Analyse als Argumentationsgrundlage für eine mögliche Förderung nutzen. Insbesondere bei einem hohen Nutzenpotenzial für die Allgemeinheit ohne erkennbare Vorteile für den Projektträger kann die öffentliche Hand entscheiden, die (Mehr-)Kosten der Maßnahme nicht nur durch den Projektträger tragen zu lassen, sondern auch durch die öffentliche Hand zu fördern.

Bietet eine klimagerechte Maßnahme, im Vergleich zu einer konventionellen, deutlich größeren Nutzen, aber auch höhere Kosten, sollte die Kommune prüfen, inwieweit Fördergelder eingesetzt werden können, um die Umsetzung klimagerechter Maßnahmen zu garantieren. Wirkt sich eine klimagerechte Maßnahme sehr positiv auf Umwelt und Gesellschaft aus – in Form erhöhter Energieeffizienz, Emissionsreduktion oder einer höheren Aufenthaltsqualität im Außenraum – kann dies eine Förderlücke darstellen. Zusätzliche negative externe Effekte, wie hohe Emissionen, wirken sich auf die Gesellschaft aus. Daher sollte eine Internalisierung, also der Einbezug dieser erhöhten Kosten, auf die Bauherrin oder den Bauherrn erfolgen. Ansatzweise berücksichtigen dies das EU Emission Trading System und das Brennstoffemissionsgesetz, umgangssprachlich CO₂-Steuer. Hier können Kommunen verstärkt aktiv werden, indem sie Anforderungen für die Vermeidung von Emissionen oder Hitzeinseln definieren. Diese Anforderungen können dann Bauherr:innen bereits in der Ankaufskalkulation berücksichtigen. Hierbei ist für die Branche auf kontinuierliche und verlässliche Regulatorik zu achten, die den Rahmen für die Konzeptionierung gibt.

Die Kosten-Nutzen-Analyse ist in die Förder-Entscheidung einzubeziehen; ebenso ist die Kostenträgerschaft den verschiedenen Akteuren sinnvoll zuzuordnen. Dies gewährleistet, dass der Einsatz öffentlicher Gelder neben weiteren Zielen immer auch die Transformation hin zu klimagerechten Lösungen beschleunigt und Umweltauswirkungen minimiert. Gelder sind auch dafür einsetzbar, die initial höheren Kosten klimagerechter Maßnahmen für die Projektträger:innen abzufedern und durch gezielte Förderung die Umsetzung zu incentivieren, falls nicht planungsrechtliche Maßnahmen dies bereits erfordern.

FÖRDERUNGEN

Beispielsweise fördert die Regierung von Oberbayern Wohnraum für Mietwohnungen [38]. Hierfür sind die Mehraufwendungen der Herstellungskosten für die Umsetzung von PV aufzuführen. Um die Mehrkosten zu identifizieren, lässt sich die Kostenzusammenstellung einer konventionellen Maßnahme gegenüber der Umsetzung eines Daches mit PV nutzen (Kapitel 6.5).

Zusammenfassung: Ergebnis der Kosten-Nutzen-Bewertung

Tabelle 1 zeigt eine zusammenfassende Bewertung der sieben untersuchten Maßnahmen und deren Ausführungsvarianten. Die Ergebnisse der Kosten (LCC) und der Nutzen werden einem Ampelsystem zugeordnet. Insgesamt lässt sich sagen, dass lebenszyklusbasiert klimagerechte Maßnahmen bezahlbar sind und den höchsten Nutzen haben. Die rechte Spalte (WLC) zeigt, wie viel mehr Kosten anfallen, sofern man externe Effekte, wie Gesundheits- und Umweltkosten, berücksichtigt. Dies ist insbesondere für Kommunen und die öffentliche Hand relevant.

HINWEIS

Kategorisierung der Nutzen in niedriger Nutzen (1 – 3 Punkte), mittlerer Nutzen (4 – 7 Punkte) und hoher Nutzen (8 – 10 Punkte). Kategorisierung der Kosten in niedrige Kosten (< 115 %), mittlere Kosten (115 – 160 %) und hohe Kosten (> 160 %), wobei 100 % die jeweils kostengünstigste Variante ist.

* Potentiell höhere Kosten durch Wiederherstellungs-, Verwertungs- sowie Gesundheits- und Umweltkosten, da die Bewässerung nur ein Mindestmaß für die Vitalität erbringt.

	 Kosten (LCC)	 Nutzen	Unterschied durch externe Kosten (WLC)
Baumerhalt			
Erhalt gesunder Bestandsbaum	●	●	-
Baumfällung und Ersatzpflanzung in Grünfläche	●	●	+ 5 %
Baumpflanzung			
Baum in Grünfläche (Variante 1)	●	●	-
Baumpflanzung in befestigten Flächen			
Baum bewässert (Variante 2)	●	●	+ 20 %
Baumstandort nach Norm (Variante 3)	* ●	●	-
Optimierter Baumstandort (Variante 4)	●	●	-
Bodenbeläge im Außenraum			
Rasen	●	●	-
Befestigte Flächen			
Rasenfugenstein	●	●	-
Pflaster (Beton)	●	●	+ 1 %
Pflaster (Naturstein)	●	●	-
Asphalt	●	●	+ 1 %
Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser durch Versickerung			
Gut / durchlässiger Untergrund			
Versickerungsmulde mit Grasbepflanzung	●	●	-
Nicht ausreichend / durchlässiger Untergrund			
Mulden-Rigolen-Element mit Kiesschüttung	●	●	-
Mulden-Rigolen-Element mit Kunststoff-Füllkörper	●	●	-
Rigolen-Element mit Kiesschüttung	●	●	+ 455 %
Rigolen-Element mit Kunststoff-Füllkörper	●	●	+ 214 %
Dachbegrünung			
Kiesdach	●	●	+ 4 %
Kiesdach mit Photovoltaik-Anlage	●	●	- 2 %
Extensiv	●	●	+ 3 %
Extensiv mit Photovoltaik-Anlage	●	●	- 1 %
Intensiv	●	●	+ 1 %
Fassadenbegrünung			
Großflächig begrünt, ausreichender Wurzelraum	●	●	-
Großflächig begrünt, minimaler Wurzelraum	●	●	-
Teilweise begrünt, ausreichender Wurzelraum	●	●	-
Teilweise begrünt, minimaler Wurzelraum	●	●	-
Ohne Begrünung	●	●	-
Sonnenschutzsysteme vor Fensterflächen			
Außenliegender Sonnenschutz	●	●	+ 1 %
Innenliegende Verdunkelung	●	●	+ 2 %
Kein Sonnenschutz	●	●	-

● hohe Kosten / niedriger Nutzen

● mittlere Kosten / mittlerer Nutzen

● niedrige Kosten / hoher Nutzen

Tabelle 1: Überblick über das Gesamtergebnis der Kosten-Nutzen-Bewertung

6

MASSNAHMEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Dieses Kapitel stellt die sieben untersuchten Maßnahmen in Varianten dar. Diese haben wir auf Grundlage von fünf ausgewählten Schwerpunktprojekten (Abbildung 1, Seite 8) analysiert und entwickelt. Dabei dient meist eine konventionelle Variante als Referenz. Die Übersichten zu den Maßnahmen enthalten allgemeine Informationen und eine beispielhafte Darstellung des Nutzens, präsentiert an jeweils einem Modellprojekt. Gezeigt werden die lebenszyklusbasierten Kosten (Methodisches Vorgehen vgl. Kapitel 4) und alle quantitativ ermittelten Nutzen (Methodisches Vorgehen vgl. Kapitel 3, Abbildung 10) für die Varianten der Maßnahme. Für die Gesamtbewertung haben wir Kosten und Nutzen der Varianten gegenübergestellt. Die Kosten-Nutzen-Bewertung zeigt zwei Grafiken (LCC und WLC), die die Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen zur Maßnahme zusammenfassen.

Verhältnis von Kosten und Nutzen

Das Kosten-Nutzen-Verhältnis zeigt Abbildung 19: Die horizontalen Achse offenbart zusammengefasst den gesellschaftlichen und ökologischen Nutzen (Abbildung 10, Seite 21); die vertikale Achse bildet die Kosten (NBW) der Maßnahmenvariante ab. Dieser Wert präsentiert die gegenwärtige Investition, die auch künftige Ausgaben und Einnahmen unter Beachtung der Inflation berücksichtigt.

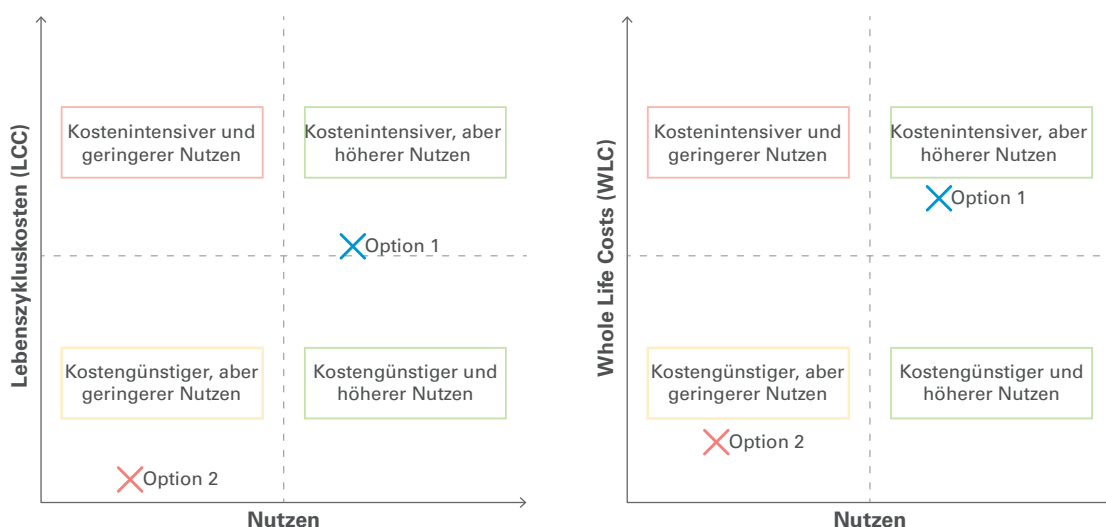


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Kosten-Nutzen-Bewertung, Lebenszykluskosten (a), Whole Life Costs (b)

Die Investition in eine klimagerechte Variante lohnt sich, wenn die Kosten über den gesamten Lebenszyklus in barwerter Form geringer sind als für eine nicht klimagerechte Variante. Ist die klimagerechte Variante teurer, bietet jedoch höheren Nutzen, ist abzuwägen.

KOSTEN-NUTZEN-BEWERTUNG

Die Kosten-Nutzen-Bewertung ist eine weitverbreitete Methode in Wirtschaft und Politik, um Entscheidungen zu treffen und Ressourcen effizient einzusetzen. Sie stellt die Kosten, die mit einer Handlung, einem Projekt oder einer Investition verbunden sind, in Beziehung zum Nutzen, den diese Handlung oder Investition voraussichtlich generieren wird.

Darstellung von LCC und WLC in zwei Grafiken

Für jede Maßnahme gibt es zwei Kosten-Nutzen-Grafiken (Abbildung 19 (a) und (b)). Beide Grafiken illustrieren das Verhältnis von Lebenszykluskosten zu gesellschaftlichem und ökologischem Nutzen. Grafik (a) betrachtet die Lebenszykluskosten im engeren Sinn, die Life Cycle Costs (LCC). Grafik (b) zeigt Lebenszykluskosten im weiteren Sinn, also die Whole Life Cycle Costs (WLC) (vgl. Kapitel 4, Seite 34). Der ermittelte Nutzen bleibt in beiden Grafiken gleich.

Grafik (a) ist vor allem für Bauherr:innen und Planende relevant, da sich die Kosten auf die Umsetzung der Maßnahme beschränken.

Grafik (b) bezieht zu den lebenszyklusbasierten Kosten auch externe Kosten ein, z. B. Umwelt- & Gesundheitskosten (vgl. Kapitel 4, Seite 34). Diese externen Kosten tragen Bauherr:innen nicht direkt; sie können jedoch für Kommunen relevant sein, da neben der Schaffung von Wohnraum auch die Ziele Klimaanpassung und Klimaschutz bedeutsam sind. Der Nettobarwert der Maßnahmenvariante verändert sich meist, da hier die externen Kosten monetarisiert wurden. Gerechnet wurde mit Bruttobeträgen, einer jährlichen Inflationsrate von 2,96 % und einem Diskontierungszinssatz von 3 %. Der Betrachtungszeitraum liegt bei 50 Jahren.

Im Endbericht sind die detaillierten Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Bewertung aufgeschlüsselt.

HINWEIS

Auf den nachfolgenden Seiten werden als Steckbrief die Ergebnisse der sieben Maßnahmen mit Ihren Handlungsempfehlungen aufgezeigt und können als Arbeits- & Argumentationsgrundlage zur Entscheidungsfindung genutzt werden.

6.1	Baumerhalt	S. 46
6.2	Baumpflanzung	S. 50
6.3	Bodenbeläge im Außenraum	S. 55
6.4	Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser durch Versickerung	S. 60
6.5	Dachbegrünung	S. 65
6.6	Fassadenbegrünung	S. 69
6.7	Sonnenschutzsysteme vor Fensterflächen	S. 73

6.1 Baumerhalt

Bäume tragen durch ihre Verschattungs- und Verdunstungsleistung wesentlich zur Kühlung von Quartieren und Gebäuden bei [39, 40]. Ältere, vitale Bäume sind durch ihre Größe und ihr Kronenvolumen immer leistungsfähiger als kleinere, junge Bäume. Durch bauliche Nachverdichtung (Innen- vor Außenentwicklung) werden vielerorts Bestandsbäume gefällt anstatt diese – zur Not aufwendig – zu erhalten.

LITERATURHINWEIS

"Leitfaden zu Stadtbäumen in Bayern" des ZSK [39] für weitere Informationen zu Stadtbäumen.

QUALITATIVER NUTZEN

Bäume sind wichtig für eine qualitativ hochwertige Gestaltung und Raumbildung in Wohnquartieren. Der Raum unter Bäumen lässt sich vielseitig nutzen: z. B. als sozialer Treffpunkt. Aufgrund ihres großen

Grünvolumens sorgen Bäume für eine biologische Vielfalt; sie schaffen ungestörte Lebensräume für Vögel und Insekten. Für den Biotopverbund spielen Baumreihen und Alleen eine wichtige Rolle.

Varianten des Baumerhalts

Den Erhalt eines gesunden Bestandsbaumes verglichen wir mit einer Ersatzpflanzung in einer Grünfläche. Die ermittelten Kosten und Nutzen beziehen sich auf einen Baum.



Kosten des Baumerhalts

Die Lebenszykluskosten inklusive der externen Kosten (Gesundheitskosten im Sinne der WLC) für den Erhalt eines gesunden Bestandsbaumes im Vergleich zu einer Ersatzpflanzung in einer Grünfläche zeigt Abbildung 20. Die Kosten für den Erhalt des Bestandsbaumes enthalten Baumschutzmaßnahmen wie Baumschutzzaun, Wurzelschutz und Pflegerschnitt der Baumkrone. Sind diese aufgrund des Standortes des Bestandsbaums unnötig, verringern sich die Kosten um ca. 2.000 € pro Baum.

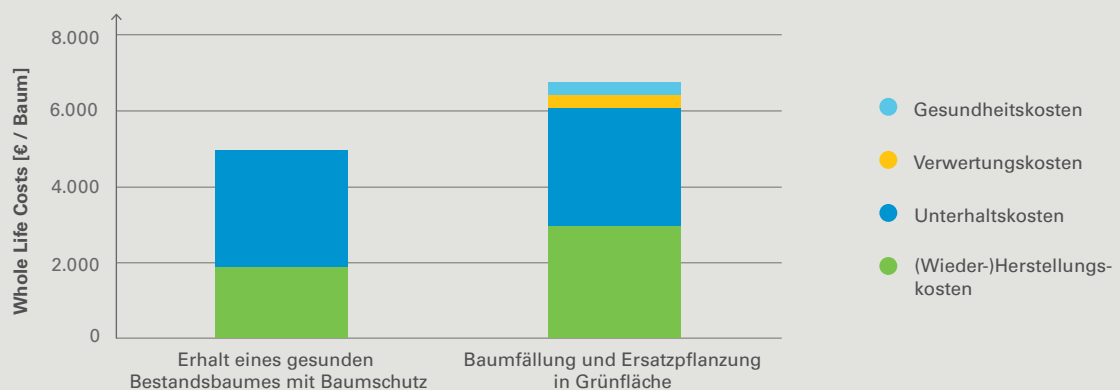


Abbildung 20: Kosten für Baumerhalt mit Baumschutz und Ersatzpflanzung über den Lebenszyklus



Nutzen des Baumerhalts

Abbildung 21 zeigt die ermittelten Nutzen anteilig für die Bewertung mit einer Punktzahl von eins bis zehn. Die Relation der Baumgröße sowie des Kronenvolumens spiegeln sich in den Ergebnissen wider. Im Vergleich bekommt der Erhalt eines gesunden Bestandsbaumes für alle Nutzenfaktoren die volle Punktzahl. Die Baumfällung mit Ersatzpflanzung erhält jeweils den minimalen Wert.

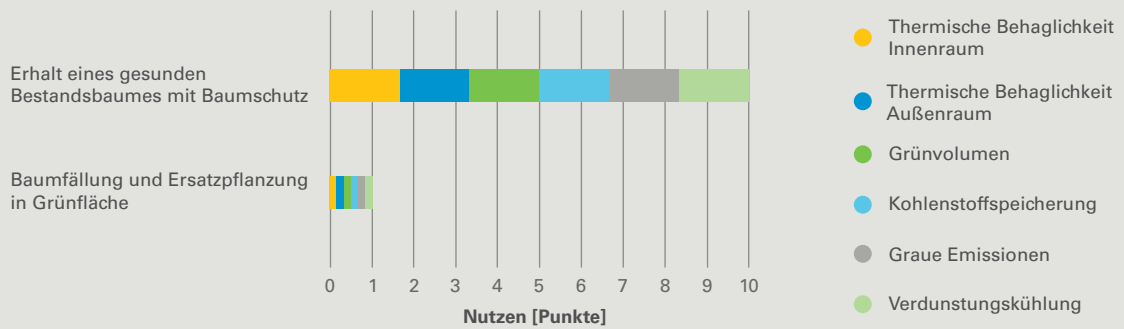


Abbildung 21: Kosten für Baumerhalt mit Baumschutz und Ersatzpflanzung anteilig pro Nutzenfaktor



Abbildung 22: Grünfläche mit altem Bestandsbaum

Nutzenermittlung: Auswirkung von vitalen Großbäumen auf die Aufenthaltsqualität im Freiraum am Beispiel Freising

Eine mikroklimatische Simulation für einen Hitzetag ($T_{\max} > 30\text{ °C}$) um 14 Uhr am Beispiel des Modellprojektes in Freising zeigt die Wirkung des Erhalts von Baumbestand auf die thermische Aufenthaltsqualität im Außenraum. Durch das städtebauliche Konzept einer verdichteten Wohnbebauung auf den Grundrissen der bestehenden Gebäudestruktur ohne Tiefgaragen ist der weitgehende Erhalt des Baumbestandes erst möglich. Für die Nutzenermittlung stand der Erhalt des gesunden Baumbestandes (Abbildung 23 (a)) der Fällung der Bestandsbäume auf dem Quartier (Abbildung 23 (b)) gegenüber.

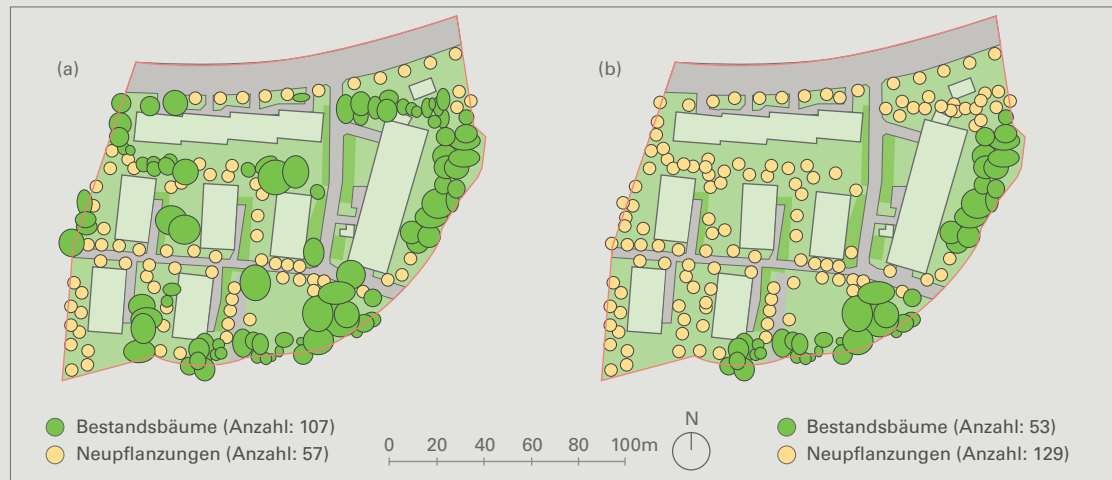


Abbildung 23: Szenarienbildung: Erhalt des gesunden Baumbestandes (a) und Fällung der Bestandsbäume (b)

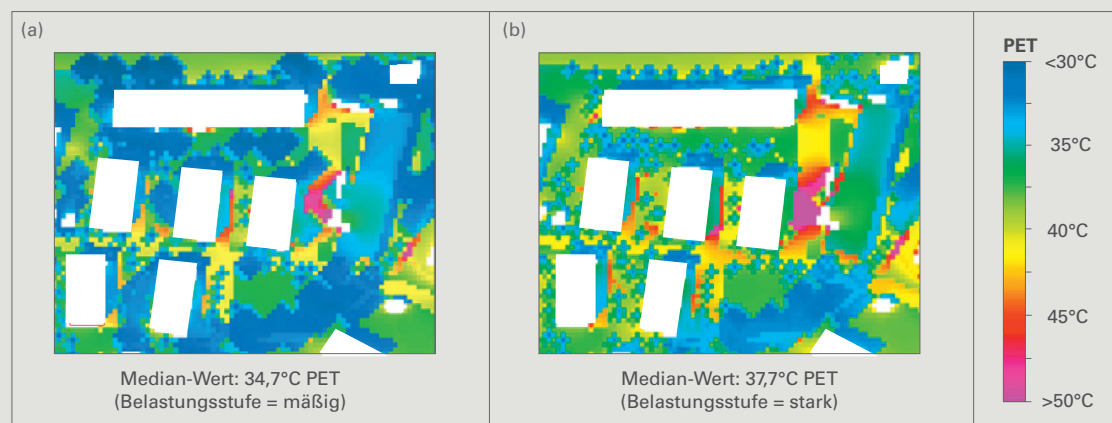


Abbildung 24: Untersuchung der Aufenthaltsqualität im Freien an einem Hitzetag um 14 Uhr - Erhalt des gesunden Baumbestandes (a) und Fällung der Bestandsbäume (b)

Wie Abbildung 24 illustriert, entstehen Wärmeinseln in Bereichen, in denen es keine Verschattung durch Gebäude oder Vegetation gibt. Dort steigen die gefühlten Temperaturen auf über 50 °C PET. Dies ist eine enorme thermische Belastung für den Menschen. Durch den Erhalt gesunder Bestandsbäume lassen sich diese Temperaturen um bis zu 20 °C senken. Die Planenden erreichen durch die Gebäudesetzung unter Beachtung des Baumbestandes (a) eine um 3 °C bessere Aufenthaltsqualität im Vergleich zur Fällung des Baumbestandes (b).

Um den menschlichen thermischen Komfort zu beschreiben, wird die physiologische äquivalente Temperatur (°C PET) einer Referenzperson genutzt.



Kosten-Nutzen des Baumerhalts

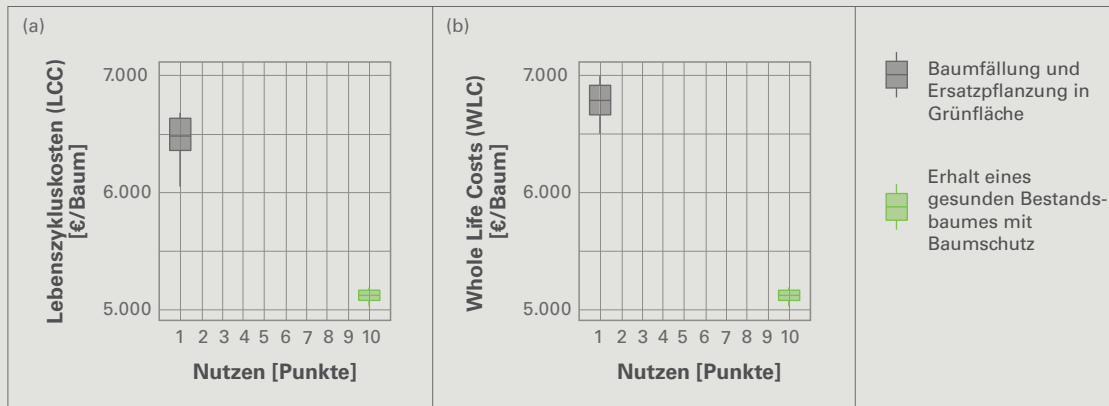


Abbildung 25: Kosten-Nutzen-Bewertung zum Baumerhalt – Lebenszykluskosten pro Baum (a), Whole Life Costs pro Baum (b)

Erhalt von Baumbestand lohnt sich

Beide Grafiken in Abbildung 25 zeigen: Der Erhalt des Baumbestands lohnt sich kostentechnisch und ökologisch. Diese Variante ist über den Lebenszyklus von fünfzig Jahren günstigster als die Baumfällung. Sind keine Baumschutzmaßnahmen notwendig, sind die Kosten noch geringer. Beim umweltbezogenen und sozialen Nutzen erzielt der Erhalt des Baumbestands die höchste Punktzahl. Der Erhalt von Bestandsbäumen im urbanen Umfeld trägt durch deren Verschattungs- und Verdunstungsleistung effektiv zur Kühlung von Quartieren bei, reguliert den lokalen Wasserhaushalt und hat einen spürbaren positiven Einfluss auf das Mikroklima.

Eine Ersatzpflanzung in einer Grünfläche benötigt Jahrzehnte, um die gleichen Leistungen zu erbringen. Abbildung 25 (b) illustriert zudem, dass durch die Baumfällung gesundheitsbezogene Kosten steigen, wenn die Außenraumtemperatur durch fehlende Verschattung und Kühlung durch Bäume steigt. Ökonomisch und ökologisch ist daher immer der Erhalt gesunder Bestandsbäume zu empfehlen. Ist der Baumbestand nur noch bedingt vital oder kann den zukünftigen Klimawandelfolgen nicht mehr standhalten, ist eine über Jahrzehnte dauernde, abschnittsweise Fällung und Ersatzpflanzung einer großflächigen Rodung vorzuziehen.

6.2 Baumpflanzung

Bei Baumpflanzungen sind die standortspezifische Wahl der Baumart und die Optimierung des Standorts entscheidend. Nur sie gewährleisten unter künftigen Klimabedingungen ein optimales Wachstum und den langfristigen Erhalt. Gut durchwurzelbares Substrat und ausreichend Wasserzufuhr müssen verfügbar sein. Wie viel Kühlung durch Verdunstung ein Baum in den Sommermonaten leistet, hängt stark vom Standort und dem Alter des Baumes ab. Versiegelungsgrad und verfügbarer Wurzelraum haben einen starken Einfluss auf das für den Baum verfügbare Wasser. Die Wasserverfügbarkeit beeinflusst, wie viel Wasser ein Baum verdunstet und somit wie viel Verdunstungskühlung er spendet.

Empfehlungen für klimaresistente Baumarten enthalten die Klima-Arten-Matrix [41] und die GALK-Straßenbaumliste [42]. Das ZSK-Teilprojekt 5 untersuchte den Einsatz gebietsfremder und heimischer Stadtklimabäume [43].

Hinweise zur Herstellung von Baumstandorten geben die FLL-Richtlinien [36, 44]. Diese erfüllen jedoch nur z. T. die Anforderungen für Pflanzungen in verdichteten Siedlungsbereichen mit Hitze- und Trockenstress. Dementsprechend hat die Landeshauptstadt München verbesserte Richtlinien zur Herstellung von Pflanzstandorten verfasst (ZTV-Vegtra-Mü) [45]. Wie die Berechnungen anhand der Modellprojekte zeigen, ist es unbedingt notwendig, die gültigen Regelwerke zur Herstellung von Baumstandorten mit Blick auf den Klimawandel zu verbessern.

Varianten der Baumpflanzung

Das Beispiel Winterlinde, eine der häufigsten Stadtbaumarten, verdeutlicht die Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Betrachtung. Wir vergleichen die Pflanzung in einer Grünfläche ohne Unterbau (z. B. Tiefgarage) (Variante 1) mit folgenden Varianten der Pflanzung auf teilversiegelter Fläche:

- Variante 2: Baumstandort nach aktuellem Minimumpflanzstandard [36]: Der Untersuchung zufolge bietet dieser Standort in Zukunft nicht ausreichend Wasser. Dieser Baum muss daher im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren einmal ersetzt werden und wächst nicht zu einem gesunden Großbaum heran. Hinweis: Diese Variante kann auch stellvertretend für eine Baumpflanzung der gängigen Praxis auf Tiefgaragen mit 0,60 bis 1,20 m Bodenaufbau interpretiert werden, da diese Bauweise kaum Entwicklungsmöglichkeiten zu einem gesunden Großbaum bietet.
- Variante 3: Baumstandort nach aktuellem Minimumpflanzstandard [36] mit manueller Bewässerung nach DIN 18919:2016-12 [46]: Die Bewässerung mit Trinkwasser kompensiert den Wassermangel in Variante 2. Sie gewährleistet aber nur ein Mindestmaß für die Vitalität, denn die optimale Versorgung eines Großbaumes durch Bewässerung übersteigt die umsetzbaren Wasser- und Personalressourcen. Mit der Bewässerung steigen die Unterhaltskosten inkl. Personalkosten für die Bewässerung.
- Variante 4: Optimierter Standort mit vergrößertem Wurzelraum für Großbäume nach ZTV-Vegtra-Mü [45] Standort mit deutlich mehr Substrat und der Zuleitung von Niederschlagswasser aus 50 m² angeschlossener, versiegelter Fläche.

BEWÄSSERUNG

Die Option Bewässerung mit Trinkwasser wurde beispielhaft berechnet. Allerdings ist zu beachten, dass diese Bewässerungsart keine gängige Praxis für klimagerechtes Bauen sein sollte, da Trinkwasser eine wertvolle Ressource und der personelle Aufwand beträchtlich ist. Es ist zu befürchten, dass dies nicht immer geleistet werden kann. Je nach Standort empfiehlt es sich, auf Regen- oder Grauwasser zurückzugreifen.



Kosten von Baumpflanzungen

Die Lebenszykluskosten inklusive Umwelt- und Gesundheitskosten für die untersuchten Varianten der Baumpflanzung zeigt Abbildung 26. Bei den Herstellungskosten ist der unterschiedliche Bedarf an Baums substrat ausschlaggebend. Bei Variante 1 erfolgt keine Standortoptimierung, dementsprechend ist diese am kostengünstigsten. Bei der Pflanzung nach Variante 2 ist davon auszugehen, dass die Bäume nicht genug wachsen, im Laufe der Zeit ausfallen und ersetzt werden müssen, was zu Wiederherstellungskosten führt. Dadurch steigt die Gesamtsumme. Hinzu kommt die Annahme, dass ein Baum in dieser Variante nicht zu einem Großbaum heranwachsen kann, der kühlt und Schatten spendet. Die Hitzebelastung steigt; gesundheitsbezogene Kosten fallen an. Im Vergleich zu den anderen Varianten verursacht die notwendig gewordene Gebäudekühlung zudem höhere Kosten für den Stromverbrauch. Bei Variante 3 ist bei den Unterhaltskosten der Bewässerungsbedarf maßgebend. Die Whole Life Costs von Variante 3 sind ggf. höher anzusetzen als Abbildung 26 in der Säule zeigt, da die Bewässerung nur ein Mindestmaß für die Vitalität erbringt. Daher können auch hier Wiederherstellungs-, Verwertungs- sowie Gesundheits- und Umweltkosten anfallen. Variante 4 ist durch den größten Substratbedarf in der Herstellung am teuersten.

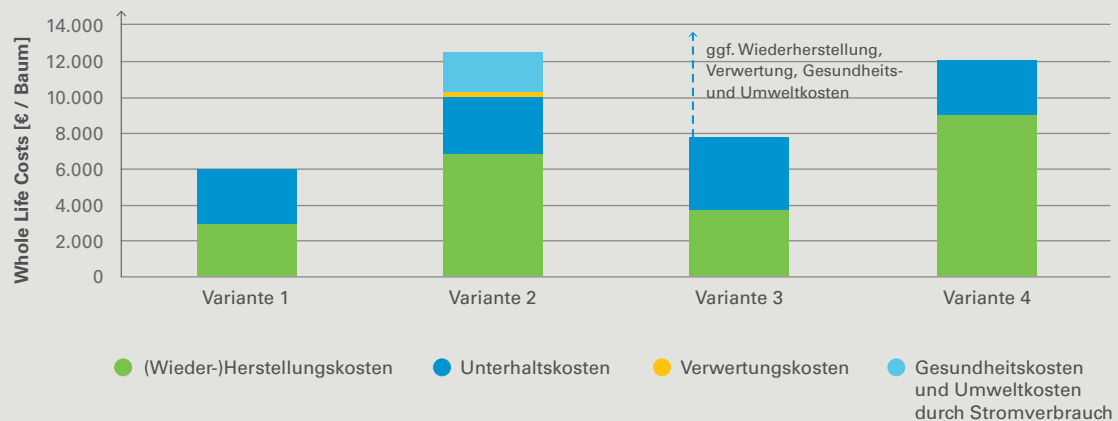


Abbildung 26: Kosten für Baumpflanzungen über den Lebenszyklus



Abbildung 27: Beispielhafte Darstellung von Baumpflanzungen



Nutzen von Baumpflanzungen

Den ermittelten Nutzen für die Varianten der Baumpflanzung über deren Lebenszyklus verdeutlicht Abbildung 28.

Variante 1 in der Grünfläche erbringt den höchsten Nutzen: Der Baum erbringt die besten Ökosystemdienstleistungen wie Kohlenstoffspeicherung, Grünvolumen und Verdunstungskühlung. Bei Variante 2 ist die Annahme, dass er aufgrund schlechter Versorgung nicht zu einem großen Baum heranwächst. Daher ist hier der Nutzen am geringsten. Die Bewässerung (Variante 3) leistet nur ein Minimum für den Erhalt der Vitalität; deshalb ist der Nutzen bei einer eventuell notwendigen Ersatzpflanzung niedriger als im Balken dargestellt. Im Vergleich dazu ist der Nutzen bei der Optimierung des Standortes (Variante 4) höher.

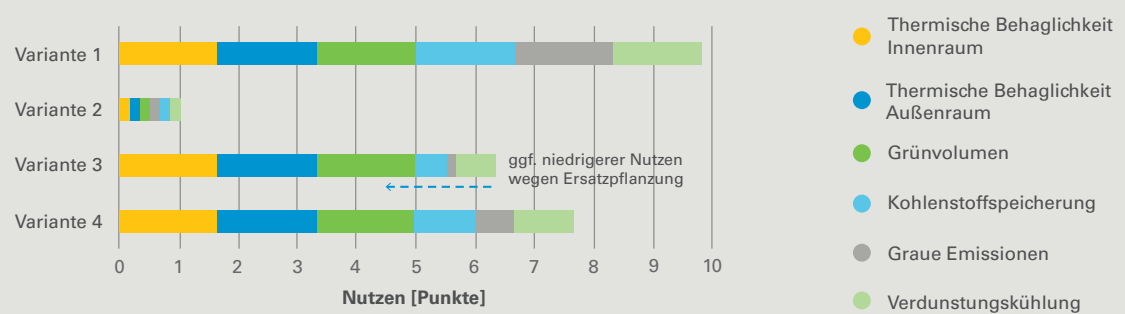


Abbildung 28: Nutzen für Baumpflanzungen anteilig pro Nutzenfaktor

Nutzenermittlung: Auswirkung der Standortbedingungen auf die Verdunstungskühlung von Bäumen am Beispiel Ingolstadt

Wie sich die Varianten der Baumstandorte auf die Verdunstungskühlung in Zukunft auswirken, haben wir am Beispiel Ingolstadt untersucht. Die Varianten sind beispielhaft im Lageplan (Abbildung 29) verortet. Abbildung 29 zeigt die Verdunstungskühlung in den Sommermonaten für 60 Jahre alte Bäume unter künftigen Klimabedingungen.

Variante 1 bietet mit Abstand am meisten Verdunstungskühlung, da der Baum über den größten Wurzelraum und somit am meisten Wasser verfügt. In Variante 3 ist, wie in Variante 2, die Verdunstungskühlung gering, da der Baum mittels Bewässerung nur für ein Mindestmaß versorgt wird. Variante 4 ist die beste Variante bezüglich der Verdunstungskühlung für eine Pflanzung in teilversiegelter Fläche.

Abbildung 29 zeigt zum Vergleich den Energieverbrauch einer Klimaanlage zur Kühlung eines 20 m² Zimmers. Die vereinfachte Annahme ist, dass die Klimaanlage in den Sommermonaten durchgehend läuft. Dieser Vergleich dient als Referenz. Grundsätzlich ist die Verdunstungskühlung von Bäumen ein natürlicher Prozess, der eine kühlende Wirkung auf die Umgebung hat. Deshalb ist dieser nicht direkt mit dem Energieverbrauch einer Klimaanlage vergleichbar.

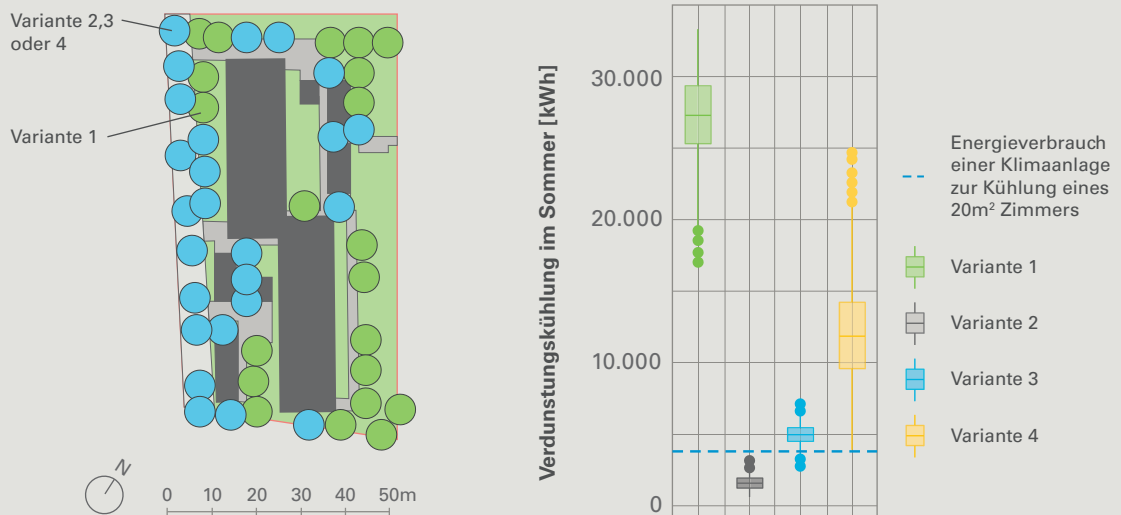


Abbildung 29: Modellprojekt Ingolstadt mit Varianten der Baumstandorte (links) und die Verdunstungskühlung von heute gepflanzten Bäumen in der Zukunft am Beispiel Standort Ingolstadt (60 Jahre alte Bäume unter zukünftigen Klimabedingungen). Annahme des Energieverbrauchs für die durchgehende Nutzung einer Klimaanlage für die Sommermonate für ein 20 m² großes Zimmer basierend auf [47]



Kosten-Nutzen Baumpflanzung

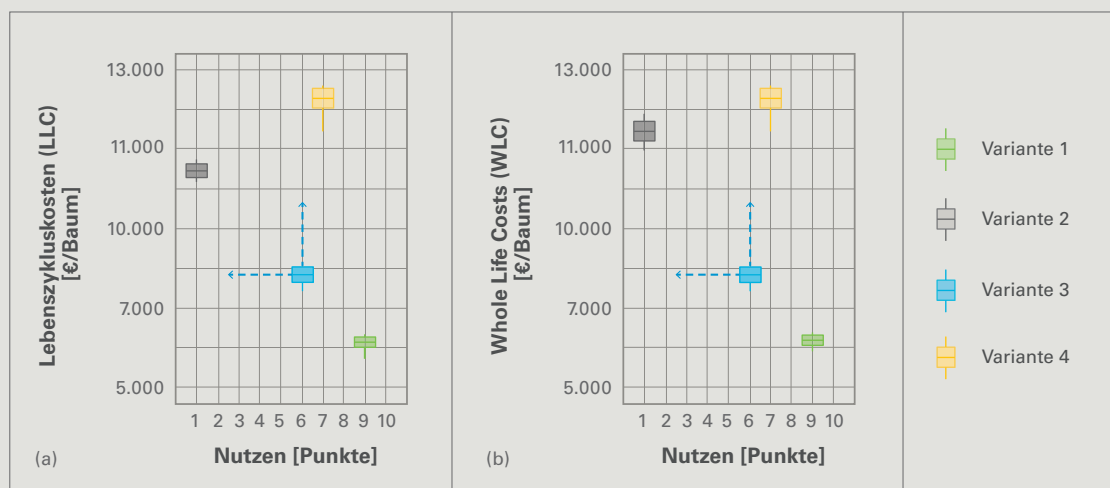


Abbildung 30: Kosten-Nutzen-Bewertung zu Baumpflanzung – Lebenszykluskosten pro Baum (a), Whole Life Costs pro Baum (b)

Standortvorteil in Grünfläche

Variante 1 in einer Grünfläche ist die beste Wahl für einen Baumstandort (Abbildung 30). Bei diesem fallen die geringsten Kosten an; gleichzeitig hat der Baum die besten Voraussetzungen, um zu einem gesunden Großbaum heranzuwachsen.

Einfluss von Standortbedingungen in teilversiegelten Flächen

Variante 2 hat den geringsten Nutzen; sie leistet kaum Kühlung und Verschattung. Durch die Ersatzpflanzung im Betrachtungszeitraum verdoppeln sich die (Wieder-)Herstellungskosten im Vergleich zu Variante 1.

Baumpflanzungen in versiegelten Flächen benötigen Maßnahmen, um ein vitales Wachstum zu ermöglichen. Abzuwägen sind eine unterirdische Optimierung des Standorts (Variante 4) oder eine Bewässerung (Variante 3). Eine Standort-Optimierung erhöht die Investitionskosten; eine manuelle Bewässerung hat rund 30 % höhere Bewirtschaftungskosten als der optimierte Standort. Zudem kann eine Bewässerung kaum eine optimale Versorgung eines Großbaumes aufgrund von umsetzbaren Wasser- und ggf. Personalressourcen leisten.

Variante 3 weist einen ähnlichen Nutzen auf wie Variante 4 (Abbildung 30). Jedoch erhält die angenommene Bewässerung die Vitalität nur im Mindestmaß. Da in den Simulationen, z. B. für die gefühlte Außenraumtemperatur, Variante 3 bezüglich Baumwachstum äquivalent zu Variante 4 angenommen wurde, gilt der ähnliche Nutzen unter Vorbehalt.

Auswirkung auf externe Kosten durch unzureichende Standortbedingungen

Die Kosten zwischen LCC-Betrachtung (Abbildung 30 (a)) und WLC-Betrachtung (Abbildung 30 (b)) unterscheiden sich in Variante 2. Bei dieser kann der Baum nicht zu einem Großbaum heranwachsen und ist zu ersetzen. An Hitzetagen mit Temperaturen über 30 °C können diese Pflanzungen nicht den thermischen Komfort im Außenraum gewährleisten; ihre Verschattungs-, Verdunstungs- und Kühlleistung ist eingeschränkt. Dies wirkt sich direkt auf die Gesundheit der Bevölkerung und somit auf die Gesundheitsausgaben aus [26]. Daher werden hier Gesundheitskosten als externe Kosten angerechnet. Zudem nimmt die Verschattung von Gebäuden ab. Dies erhöht den Kühlenergieaufwand und somit CO₂-Emissionen. Positive Effekte bleiben aus, dadurch steigen die externen Kosten (Abbildung 30 (b)).

Fazit: Die Pflanzung ist in unversiegelten Standorten am kostengünstigsten. Bäume erbringen dort auch die besten Leistungen. Pflanzungen nach minimalem Standard in teilversiegelten und unterbauten Flächen sind voraussichtlich in Zukunft zu ersetzen. Die fehlende Kühl- und Verschattungsleistung erzeugt zusätzliche externe Kosten, die die Gesellschaft zu tragen hat. Eine Optimierung des Standorts in beengten Stadträumen ist somit trotz erhöhter Kosten und ggf. räumlicher Einschränkungen zu empfehlen.

6.3 Bodenbeläge im Außenraum

Aufgrund zunehmender Starkregenereignisse steigt die Bedeutung der Beschaffenheit von Bodenbelägen in Siedlungsgebieten. Oft ist eine Befestigung von Flächen aufgrund funktionaler Anforderungen für Verkehrs- und Barrierefreiheit notwendig. Einige Bodenbeläge können aufgrund ihrer Materialeigenschaften und Fugenbeschaffenheit einen Teil des Niederschlagswassers speichern, verdunsten und versickern.

Durchlässige Flächenbeläge mit einer bauaufsichtlichen Zulassung des Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) können zudem Schadstoffe aus Niederschlagsabflüssen (z. B. von Verkehrsflächen) zurückhalten.

Helle Materialien mit hohem Albedowert minimieren das Aufheizen von Oberflächen. Materialien mit hoher Wärmespeicherfähigkeit wie Beton, Asphalt und Naturstein tragen hingegen massiv zum städtischen Wärmeinseleffekt bei und speichern die Wärme des Tages bis weit in die Nacht.

Die (Teil-)Entsiegelung und Begrünung asphaltierter oder gepflasterter Flächen ist für Freiräume das Instrument, um gegen Starkregenfälle und Überhitzung zu schützen.

Ist ein versickerungsfähiger Untergrund gegeben, hat die Wahl des Bodenbelags einen großen Einfluss auf den Wasserhaushalt. Produkte mit offenporigen Oberflächen haben den Nachteil, dass die Poren mit der Zeit durch oberflächlichen Schmutz und im Wasser gelösten Stoffen schließen. Ihre Durchlässigkeit verschwindet und sie müssen mit Spezialgeräten gereinigt werden. Darum ist die Versickerung über Fugen und Bettungsmaterial eine gängige, nachhaltige Lösung.

Mittlerweile bieten Betonsteinhersteller vielfältige Formen und Oberflächen von funktionalen Pflastersteinen an. Begrünte Fugen schaffen bedingt Lebensräume für Kleintiere. Wassergebundene Decken oder gar Schotterrasen bieten einen begrenzten Lebensraum für Tiere und Pflanzen.

Bodenbelagsvarianten

Referenz für eine unbefestigte Fläche ist in der Untersuchung eine Rasenfläche. Als Beispiel für befestigte Flächen dienten Asphalt, Pflaster (in ungebundener Bauweise) aus Beton und Naturstein sowie Rasenfugenstein.



Kosten der Bodenbeläge

Abbildung 31 stellt die Lebenszykluskosten für einen Quadratmeter Bodenbeläge dar. Die Herstellungskosten enthalten den Unterbau inklusive Aushub und Frostschuttkies und umfassen zudem die Kosten für die Entwässerung von 1 m² Bodenbelag unter Berücksichtigung des jeweiligen mittleren Abflussbeiwertes nach DIN 1986-100:2016-12 [48]. Hier wurde beispielhaft die Entwässerung über ein Mulden-Rigolen-Element mit Kunststofffüllkörper (vgl. Kapitel 6.4) gewählt. Die Wahl der Entwässerungsanlage ist standortspezifisch zu prüfen. Bei Asphalt, Rasenfugenstein und Pflaster aus Beton ist eine Erneuerung der Deckschicht nach 35 bis 40 Jahren enthalten. Das Pflaster aus Naturstein hat eine längere Nutzungsdauer und muss im Betrachtungszeitraum nicht erneuert werden [33]. Die aus den grauen Emissionen ermittelten Umweltkosten im Sinne der WLC sind vergleichsweise gering.

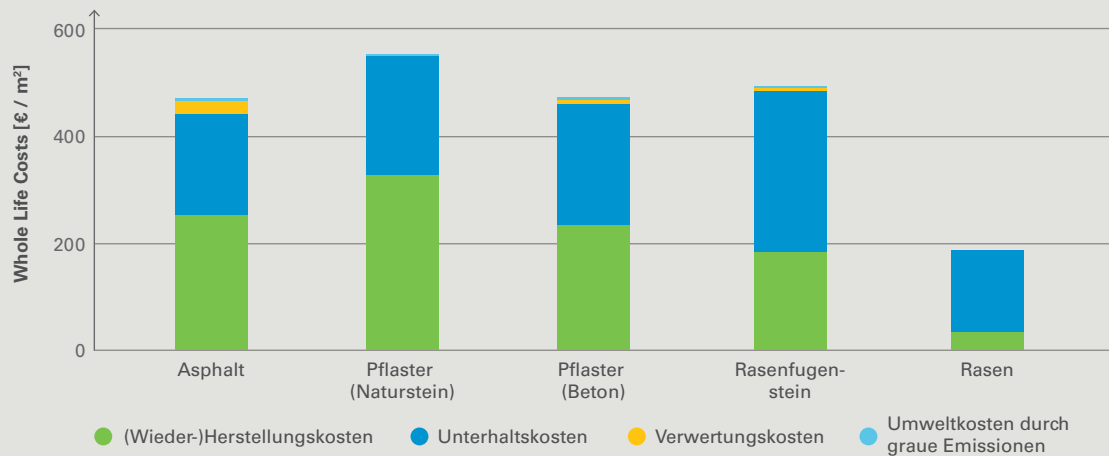


Abbildung 31: Kosten für Bodenbeläge pro m²

Der Grund für die hohen Kosten von Naturstein in dieser Abbildung ist der Betrachtungszeitraum von 50 Jahren. In einem Zeitraum von 100 Jahren oder mehr wären mehrfache Erneuerungen der Deckschichten von Asphalt, Betonpflaster oder Rasenfugensteinen notwendig, während ein Natursteinpflaster keinen weiteren Aufwand verursacht.



Nutzen der Bodenbeläge

Die Ergebnisse der Nutzenermittlung für Bodenbeläge im Außenraum illustriert Abbildung 32: Die Ergebnisse der grauen Emissionen weisen deutlich unterschiedlichen Nutzen auf. Der Pflasterstein aus Beton schneidet zum Beispiel schlechter ab als der Pflasterstein aus Naturstein u. a. aufgrund seiner Materialität.

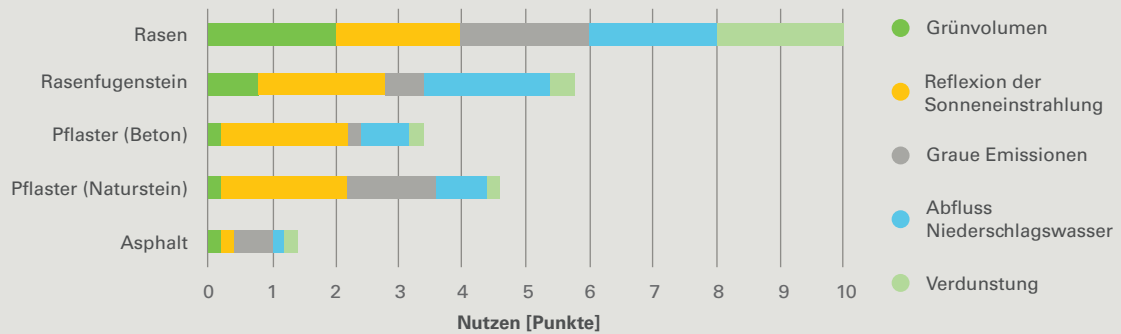


Abbildung 32: Nutzenermittlung für Bodenbelägen anteilig pro Nutzenfaktor

Nutzenermittlung: Vergleich des Treibhauspotenzials von Bodenbelägen mit einem Gebäudeneubau am Beispiel Regensburg

Abbildung 33 zeigt einen Lageplan des Modellprojektes Regensburg mit den zugehörigen Grundflächen für Gebäude und Bodenbeläge im Außenraum. Die Wahl der Bodenbeläge hat einen erheblichen Einfluss auf den Wasserhaushalt und erzeugt je nach System und verwendeten Materialien einen großen CO₂-Fußabdruck (graue Emissionen). Für das Projekt ergeben sich graue Emissionen von insgesamt 1.615 t CO₂-Äquiv. für Bau, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäude sowie 71,8 t CO₂-Äquiv. für den Freiraum. Spezifische Kennwerte pro m² können Abbildung 34 entnommen werden. Diese vergleicht die CO₂-Emissionen der Bodenbeläge im Außenraum mit denen des Gebäudeneubaus. Die Ergebnisse beziehen sich auf einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren.

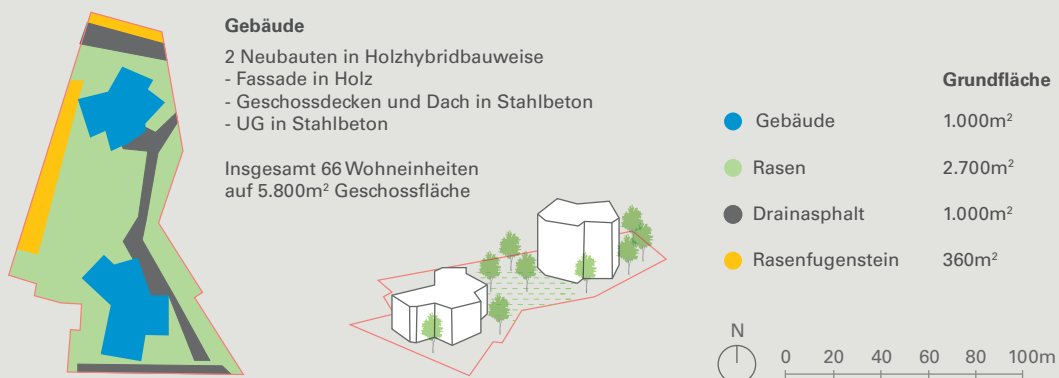


Abbildung 33: Modellprojekt Regensburg mit Grundflächen von Außenraum und Gebäude

Die Lebenszyklusanalyse, auch Ökobilanz bezeichnet, zielt darauf ab, Umweltauswirkungen wie Emissionen und Ressourcenverbrauch über die gesamte Nutzungsdauer eines Produktes zu bewerten: von der Herstellung über die Nutzung bis hin zur Entsorgung oder Wiederverwendung. Die Beurteilung der Auswirkung auf das Klima geschieht mit dem Indikator Global Warming Potential (GWP). Dieser Wert gibt das Treibhauspotenzial an, also wie viele Tonnen CO₂-Emissionen durch einen Prozess oder ein Produkt in die Atmosphäre gelangen.

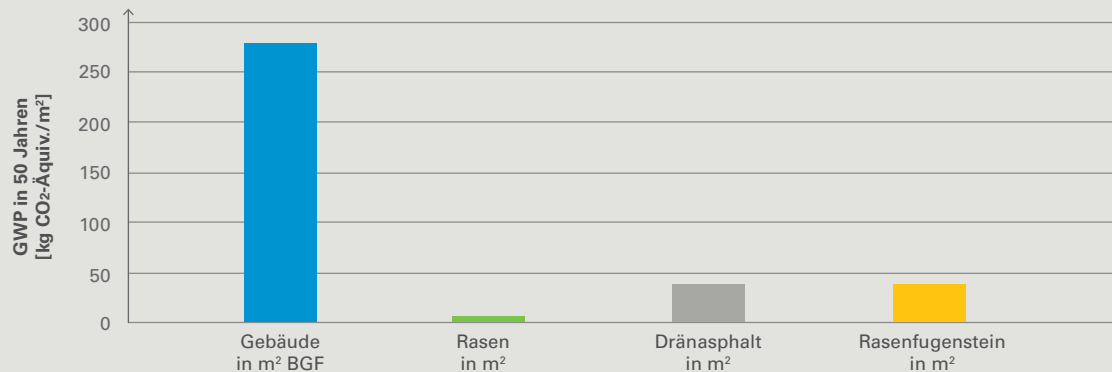


Abbildung 34: Vergleich GWP Gebäudegrundfläche vs. Beläge, pro m² Grundfläche

Abbildung 34 vergleicht die spezifischen Emissionen klimarelevanter Treibhausgase der verwendeten Beläge pro Quadratmeter. Als Vergleich werden die Emissionen dargestellt, die durch die Neubauten entstehen, bezogen auf 1 m² Bruttogrundfläche. Berücksichtigt sind alle Emissionen, die durch Herstellung, Instandhaltung, Rückbau und Entsorgung entstehen. Das Gebäude hat eine Fassade in Holzbauweise; Geschossdecken, Dach und Untergeschoss bestehen aus Stahlbeton. Der Abbildung liegt die Annahme zugrunde, dass nach 50 Jahren Gebäude und Freiflächen zurückgebaut und entfernt werden – auch die Rasenfläche. Nicht berücksichtigt sind Emissionen, die durch die Nutzung der Gebäude entstehen, z. B. der Strom- und Wärmebedarf.



Kosten-Nutzen unterschiedlicher Bodenbeläge im Außenraum

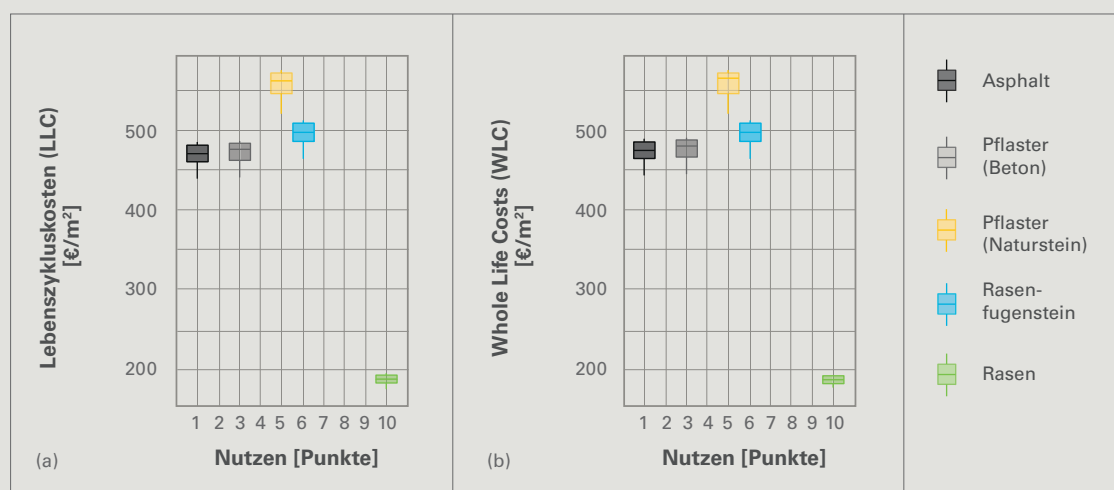


Abbildung 35: Kosten-Nutzen-Bewertung von Oberflächen im Außenraum – Lebenszykluskosten pro m² (a) und Whole Life Costs pro m² (b)

Aktuelle Umweltkosten bilden noch nicht den wahren ökologischen Kostenkennwert ab. Steigt der CO₂-Preis, steigt auch der Einfluss auf die Wirtschaftlichkeitsberechnung.

Unversiegelte und günstigste Oberfläche mit höchstem Nutzen

Rasen lohnt sich kostentechnisch und ökologisch: Diese Variante ist über den Lebenszyklus von fünfzig Jahren die kostengünstigste. Zurückzuführen ist dies auf einen kostengünstigen Einbau – kein Unterbau aus Kies ist notwendig – und geringe jährlichen Folgekosten trotz des hohen Mähaufwands. Noch mehr Nutzen bieten artenreiche Wiesen, die bei geringerem Pflegeaufwand mehr Artenvielfalt und Lebensraum für Insekten bieten. Der Schotterrasen ist eine begrünte Variante mit einem zu Unterhalts- und Rettungszwecken befahrbaren Aufbau mit Tragschichten. Dieser wurde in der Kosten-Nutzen-Bewertung nicht bewertet, bietet aber ähnliche Vorteile wie der Rasen bei höheren Herstellungskosten.

Kosten und Nutzen im Kontrast bei befestigten Flächen

Ist eine Befestigung nötig, lässt sich Rasen nicht verwenden. Bei befestigten Flächen unterscheiden sich Kosten und Nutzen stark. Wie Abbildung 35 (a) und (b) zeigen, steigen die Kosten, wenn auch der Nutzen steigt. Die Einsatzmöglichkeit verschiedener Belagsarten hängt zudem stark von den Rahmenbedingungen ab.

Befestigte Flächen: Abwägung von Kosten zu Nutzen

Für Straßen und Verkehrsflächen ist je nach Verkehrsaufkommen und Belastungskategorie nur eine Befestigung mit Asphalt oder Pflastersteinen möglich. Asphalt und Pflastersteine aus Beton sind über ihren Lebenszyklus in einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren die günstigste Ausführungsart für befestigte Flächen. Werden Hof-, Verkehrs- und Erschließungsflächen als teilversiegelter Bodenbelag ausgeführt, ist der Nutzen deutlich höher. Im Gegensatz zu Asphalt kann bei Pflastersteinen aus Beton Wasser versickern, was sich positiv auf den Wasserhaushalt auswirkt. Der Pflasterstein aus Naturstein ist aus wasserwirtschaftlicher Sicht äquivalent; im Vergleich zum Pflasterstein aus Beton ist allerdings sein CO₂-Fußabdruck geringer. Aufgrund seiner hohen Qualität muss er im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren nicht erneuert werden, seine Wirtschaftlichkeit steigt also, je länger er liegt. Dadurch ist der Gesamtnutzen (vgl. Abbildung 32) höher.

Rasenfugensteine sind aufgrund funktionaler Anforderungen für Verkehr und Barrierefreiheit nicht überall einsetzbar, bieten aber durch ihren vergleichsweise hohen Fugenanteil hohen Nutzen. Bauherr:innen müssen mit einem Betrag rechnen, der über den Lebenszyklus ca. 7 % teurer als Asphalt ist.

Ein teilversiegelter Bodenbelag muss also, je nach Ausführungsart, nicht zwingend mehr kosten als Asphalt. Das Material der Bodenbeläge hat einen großen Einfluss auf den ökologischen Fußabdruck und den Wasserhaushalt und ist daher mit den Kosten abzuwiegen. Ist eine Befestigung nicht zwingend notwendig, bietet Rasen eindeutig den höchsten Nutzen bei gleichzeitig geringsten Kosten.

Geringer Einfluss auf Umweltkosten

Die zwei Kosten-Nutzen-Grafiken in Abbildung 35 sind nahezu gleich. Die Umweltkosten für die Belagsvarianten fallen nicht ins Gewicht, da pro m² nur zwischen 27 kg (Asphalt) und 9 kg (Natursteinpflaster) CO₂ in der Herstellung ausgestoßen werden. Dadurch wirkten sich die externen Kosten nicht maßgebend auf die Kosten der Belagsvariante im Lebenszyklus (Abbildung 35 (b)) aus. Die Umweltkosten betragen im Durchschnitt rund 1 Prozent des Nettobarwerts der WLC.

6.4 Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser durch Versickerung

Im Fokus einer wasserbewussten Siedlungsplanung steht die dezentrale Bewirtschaftung von Niederschlagswasser. Den örtlichen Gegebenheiten entsprechend, soll es dem lokalen Wasserkreislauf wieder zugeführt und nicht abgeleitet werden. Hierzu ist das Niederschlagswasser vor Ort zu verdunsten (z. B. über Fassaden- und Dachbegrünung oder Bäume), zu nutzen (z. B. für Bewässerung) oder zu versickern. Die Einleitung in Anlagen zur Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser durch Versickerung ist in dieser Kaskade der letzte Schritt. Dementsprechend hängt die Dimensionierung dieser Systeme von der Menge des zu bewirtschaftenden Niederschlagswassers ab. Oberirdische Versickerungsanlagen sind unterirdischen vorzuziehen, da sie zusätzlich zur Versickerung auch Verdunstung ermöglichen und mehr zum Erhalt des natürlichen lokalen Wasserhaushalts beitragen. Begrünte Versickerungsanlagen bieten bedeutende Synergien in Bezug auf Hitzeprävention, Artenvielfalt, Verschönerung des Stadtbildes und Verbesserung der Aufenthaltsqualität. Eine solche naturnahe Regenwasserbewirtschaftung ist jedoch von Anfang an in die Gestaltung von Freiflächen zu integrieren. Versickerungsmulden erfordern eine geeignete Durchlässigkeit des Bodens und haben so andere Ausgangsbedingungen als Mulden-Rigolen-Elemente oder Rigolen-Elemente. Für die Versickerung von Niederschlagswasser sind verschiedene Anlagen in Bezug auf Flächenbedarf, Speicherkapazität, Versickerungs- und Reinigungsleistung zu unterscheiden. Unterirdische Anlagen wie Rigolen-Elemente oder Schächte sollten nur zum Einsatz kommen, wenn sich eine Versickerung über die bewachsene Bodenzone nicht umsetzen lässt.

Die Umsetzbarkeit einer Versickerungsanlage hängt von vielen Faktoren ab und ist den aktuell geltenden Regelwerken entsprechend zu bewerten (vgl. DWA-A 138:2005-04 [49]).

Versickerungsanlagen sind auf Bemessungsregen ausgelegt. Daher kann eine Versickerungsanlage keine umfassende Absicherung gegen seltene und außergewöhnliche Starkregenereignisse ermöglichen. Multifunktionale Flächen und Notwasserwege unterstützen, das Niederschlagswasser zu bewirtschaften.

Varianten der Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser durch Versickerung

Variante für eine Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser durch Versickerung bei gut durchlässigem Untergrund ist in der Untersuchung die Versickerungsmulde mit Grasbepflanzung. Ist die Untergrundbeschaffenheit dafür nicht ausreichend, sind andere Bewirtschaftungsarten zu nutzen. Hier wurden das Mulden-Rigolen-Element (Abbildung 36 (a)) und das Rigolen-Element (Abbildung 36 (b)) betrachtet – jeweils mit einer Kiesschüttung als Füllkörper und einem Kunststoff-Füllkörper.

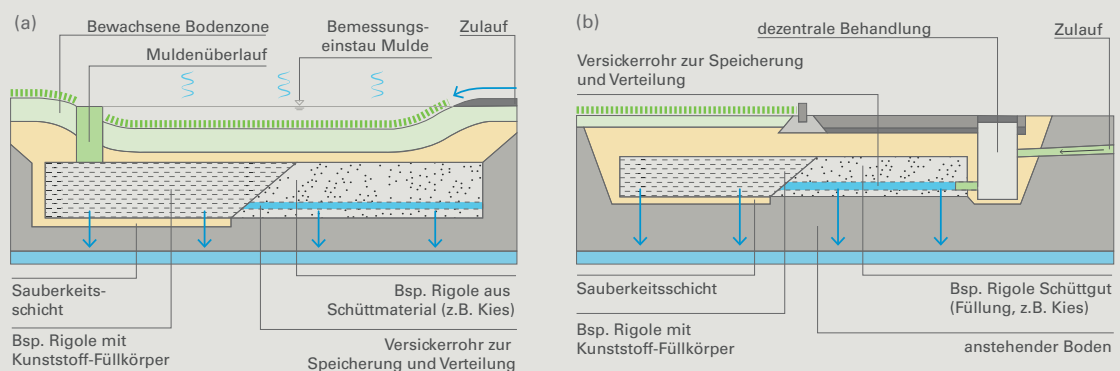


Abbildung 36: Schematische Darstellung von Mulden-Rigolen-Element (a) und Rigolen-Element (b) mit Kunststoff-Füllkörper oder Kiesschüttung als Füllkörper



Kosten für Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser durch Versickerung

Die lebenszyklusbasierten Kosten für die Varianten der Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser durch Versickerung pro m² angeschlossener Fläche zeigt Abbildung 37: Die Versickerungsmulde mit Grasbepflanzung ist das kostengünstigste System unter der Voraussetzung, dass gute Bodenverhältnisse vorliegen und kein Bodenaustausch notwendig ist. Die Summe aus Herstellungs- und Unterhaltskosten ist beim Mulden-Rigolen-Element und beim Rigolen-Element ähnlich. Bei den Varianten der Rigolen-Elemente fallen durch die schlechte Ökobilanz sehr hohe Umweltkosten in Sinne der WLC an. Grund dafür sind energieaufwändige Prozesse wie die Förderung, das Waschen und das Sortieren von Kies sowie mehr Bodenaushub.

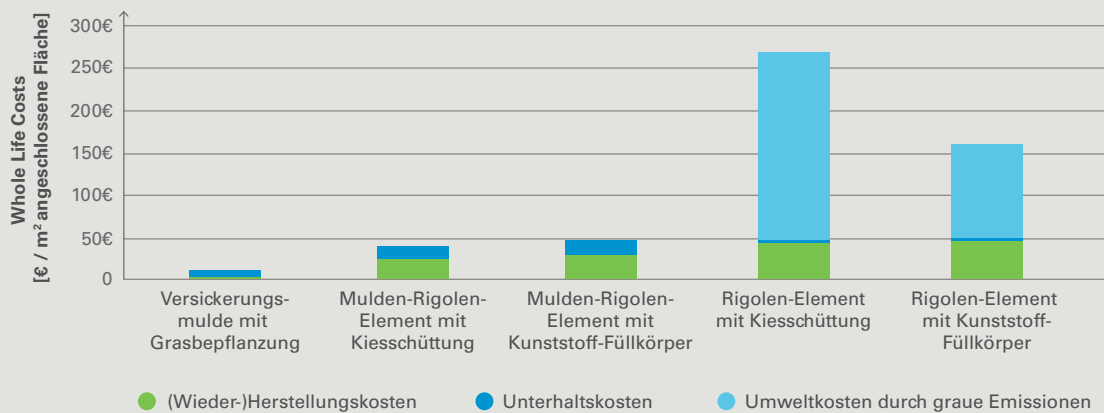


Abbildung 37: Kosten für die Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser durch Versickerung; Vergleich unterschiedlicher Varianten



Nutzen für Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser durch Versickerung

Den ermittelten Nutzen für die Varianten der Versickerungsanlagen zeigt Abbildung 38. Die drei oberirdischen Varianten leisten zusätzlich Verdunstung und haben daher aus wasserwirtschaftlicher Sicht einen höheren Nutzen. Auch in den Ergebnissen der grauen Emissionen schneiden sie deutlich besser ab als die Rigolen-Elemente.

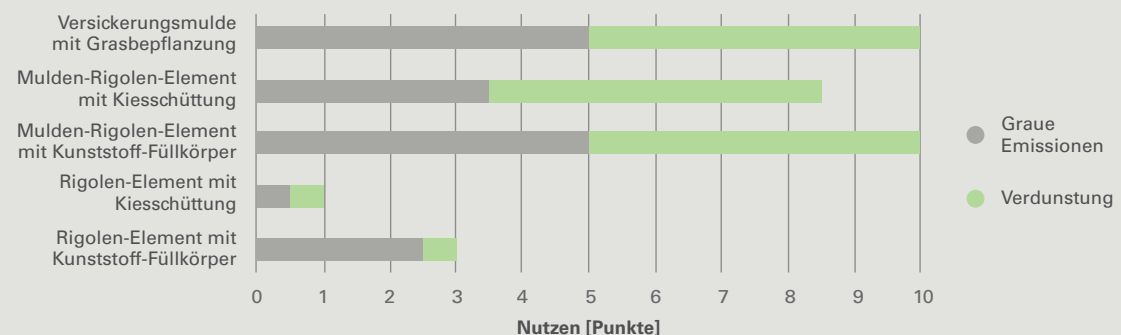


Abbildung 38: Anteilige Nutzen für Varianten der Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser durch Versickerung

Naturnaher lokaler Wasserhaushalt durch Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser am Beispiel Freising

Der naturnaher lokale Wasserhaushalt gilt als Zielzustand für den langjährigen Wasserhaushalt der geplanten Bebauung [14]. Er ist von lokalen klimatischen und geologischen Bedingungen, wie der Versickerungsfähigkeit des Bodens, abhängig. In Freising entspricht dieser Zielzustand einer Verdunstung von ca. zwei Drittel des Jahresniederschlages und ca. einem Drittel Grundwasserneubildung. Der Direktabfluss hat einen minimalen Anteil.

Der langjährige Wasserhaushalt wurde für Bestand und Entwurf des Modellprojekts Freising dem naturnahen Zielzustand gegenübergestellt. Abbildung 39 zeigt die Flächen von Bestand und Entwurf. Im Bestand werden unbegrünte Dachflächen und versiegelte Erschließungsflächen über die Kanalisation entwässert. Im Entwurf ist eine Entkoppelung von der Kanalisation vorgesehen. Annahme war eine ortsnahe Versickerung über Versickerungsmulden. Die begrünten Dächer und Fassaden sowie der Erhalt gesunder Bestandsbäume verbessern den Wasserhaushalt zudem.

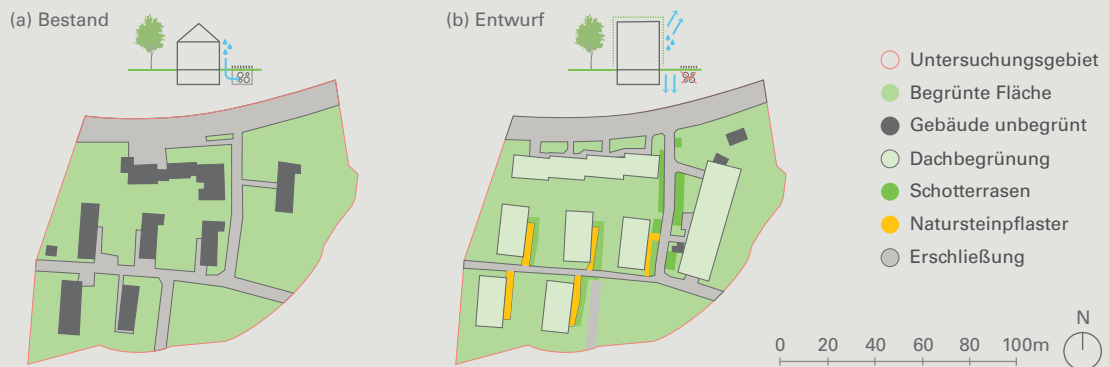


Abbildung 39: Bestand und Entwurf des Modellprojektes Freising

Wie sich die Wasserhaushaltskomponenten von Bestand und Entwurf unterscheiden, illustriert Abbildung 40. Der Entwurf kann eine starke Reduktion des Direktabflusses und eine starke Erhöhung der Grundwasserneubildung erzielen. Dies ermöglicht eine Annäherung an den naturnahen Zielzustand. Die Verdunstungskomponente ist bei beiden Zuständen sehr hoch, was zum Großteil auf gesunde Bestandsbäume zurückzuführen ist, die im Entwurf erhalten werden. Die Untersuchung zeigt: Der naturnaher Wasserhaushalt lässt sich trotz Nachverdichtung mit einer Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser und Begrünung erreichen. Dies unterstützt bei der Anpassung an die Folgen des Klimawandels.

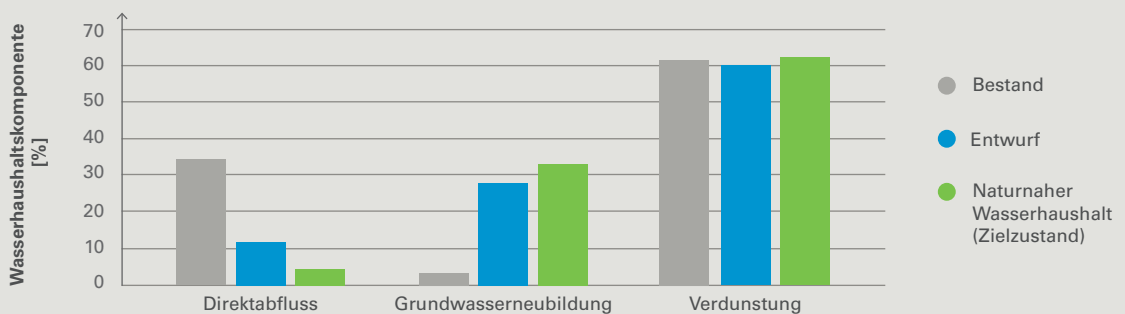


Abbildung 40: Wasserhaushalt für den naturnahen Zielzustand, Entwurf und Bestand im langjährigen Jahresmittel am Beispiel des Modellprojektes Freising



Kosten-Nutzen von Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser durch Versickerung

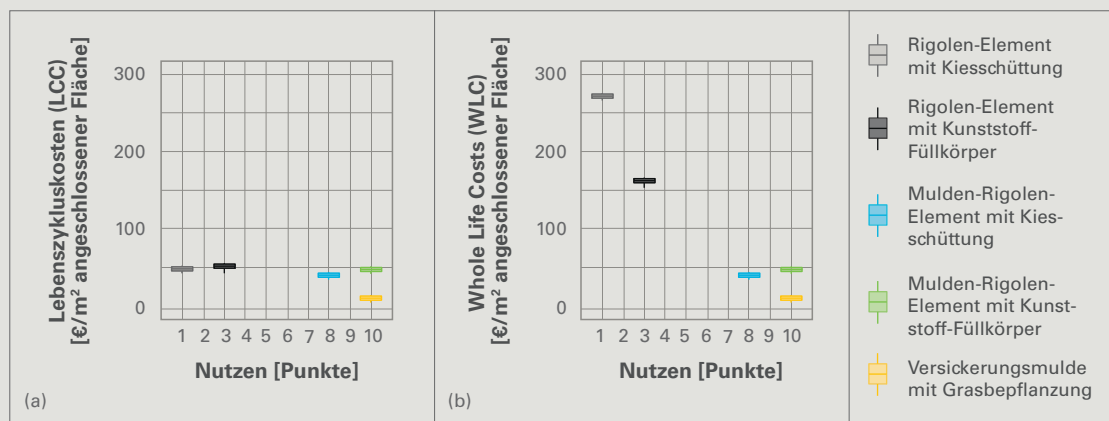


Abbildung 41: Kosten-Nutzen-Bewertung von Versickerungsanlagen – Lebenszykluskosten pro m² angeschlossener Fläche (a), Whole Life Costs pro m² angeschlossener Fläche (b). Hinweis: Versickerungsmulden haben andere Standortbedingungen als Mulden-Rigolen-Elemente oder Rigolen-Elemente

Versickerungsmulde mit Grasbepflanzung als günstigste Option

Die Versickerungsmulde mit Grasbepflanzung weist die geringsten Kosten auf, wie Abbildung 41 (a) und (b) verdeutlichen. Sie benötigt jedoch eine höhere Bodendurchlässigkeit als andere Systeme und ist folglich nicht überall einsetzbar. Im Sinne der WLC entstehen durch die Versickerungsmulde keine zusätzlichen Umweltkosten, da keine grauen Emissionen anfallen.

Varianten bei geringerer Bodendurchlässigkeit

Sind die Ausgangsbedingungen für eine Versickerungsmulde nicht gegeben, können Mulden-Rigolen-Elemente oder Rigolen-Elemente zum Einsatz kommen. Deren Kosten sind allerdings über den Lebenszyklus höher.

Unterschiedliche Nutzen bei ähnlichen Kosten für Bauherr:innen

Für Bauherr:innen sind die Kosten für beide Anlagentypen jeweils mit Kiesschüttung oder Kunststoff-Füllkörper pro m² angeschlossener Fläche etwa fünfmal so hoch wie die einer Versickerungsmulde. Im Vergleich zu Rigolen-Elementen ist der Nutzen von Mulden-Rigolen-Elementen durch die Verdunstungskomponente höher, da diese zum Erhalt des naturnahen lokalen Wasserhaushalts beitragen. Die Kiesschüttung ist im Nutzen geringer eingestuft als der Kunststoff-Füllkörper, da ihre Ökobilanz pro m² angeschlossener Fläche schlechter ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Abbau von Kies hohe CO₂-Emissionen bewirkt. Zudem weist die Kiesschüttung einen geringeren Hohlraumanteil auf, wodurch ein größeres Rigolenvolumen und damit mehr Erdaushub für die gleiche angeschlossene Fläche nötig sind. Die Auswirkungen der Kunststoff-Füllkörper in Bezug auf Ausbau, Recycling und Schadstoffe konnten in diesem Forschungsvorhaben nicht geprüft werden.

Höhere gesellschaftliche Kosten für Rigolen-Elemente

Der CO₂-Fußabdruck von Rigolen-Elementen ist höher als der von Mulden-Rigolen-Elementen, da mehr Erdaushub und Füllkörpermateriale benötigt werden. Bei Mulden-Rigolen-Elementen werden, genauso wie bei Versickerungsmulden, große Mengen von Substrat für Deckschichten verwendet. Diese verbessern die Ökobilanz der Maßnahmen. Abbildung 41 (b) zeigt, dass die gesellschaftlichen Kosten von Rigolen-Elementen in Form von Umweltkosten daher deutlich höher sind als die der anderen untersuchten Anlagen zur Vor-Ort-Versickerung. Die Kosten für das Rigolen-Element mit Kiesschüttung inklusive der gesellschaftlichen Kosten sind ca. fünfmal so hoch wie die reinen Lebenszykluskosten für Bauherr:innen. Beim Rigolen-Element mit Kunststoff-Füllkörper sind die Kosten ca. dreimal so hoch.

Folglich sind Mulden-Rigolen-Elemente bei schlecht versickerungsfähigem Untergrund im Vergleich zu Rigolen-Elementen aus CO₂-bilanzieller, gesellschaftlicher und wasserwirtschaftlicher Perspektive die bessere Option. Die Auswahl des Füllkörpertyps ist abzuwägen: Die Kiesschüttung weist in Bezug auf graue Emissionen eine schlechtere Bilanz auf. Im Vergleich sind die Auswirkungen der Kunststoff-Füllkörper auf die direkte Umwelt, z. B. in Bezug auf Ausbau und Recycling, allerdings nicht ausreichend bekannt. In diesem Forschungsvorhaben wurden diese unbekannten Umweltfolgen nicht geprüft.



Abbildung 42: Beispielhafte Darstellung einer Versickerungsmulde im Straßenraum

6.5 Dachbegrünung

Dächer bieten ein großes Flächenpotenzial zur Begrünung in dicht bebauten Städten. Extensive Dachbegrünungen haben einen Aufbau mit wenig Substrat und artenarmer, trockenresistenter Vegetation. Mit zunehmender Substratstärke nehmen Nutzen und auch Kosten einer Dachbegrünung zu. Im Vergleich zu einer extensiven Dachbegrünung kann eine intensive Begrünung mehr Wasser speichern und schafft eine höhere Vielfalt an Pflanzen und Tieren. Demgegenüber stehen höhere Kosten für materiellen und statischen Mehraufwand bei der Herstellung sowie ein höherer Pflegeaufwand. Begrünte Dächer können als Dachterrasse oder -garten genutzt werden und damit einen Beitrag zur Gemeinschaft leisten.

SUBSTRAT- UND MATERIALWAHL

Die Wahl des Substrats und das Material darunterliegender Schichten beeinflussen die Qualität des Niederschlagabflusses. Schadstoffe können in das Grundwasser gelangen. Daher sind auswaschreduzierte Materialien sowie wurzelfeste Dachabdichtungen zu wählen [50].

VERLÄNGERUNG DER LEBENSDAUER VON DACHABDICHTUNGEN

Die Begrünung schützt die Dachabdichtung vor Witterungseinflüssen, Temperaturextremen und UV-Strahlung: Gegenüber Bitumen- und Kiesdächern verlängert eine Dachbegrünung die Lebensdauer von Dachabdichtungen deutlich [51, 52].

Bei der Planung ist auch zu berücksichtigen, dass Dachflächen meist hohen Windlasten ausgesetzt sind. Flachdächer lassen sich mit geringerem technischem Aufwand begrünen und besser pflegen als geneigte Dächer.

Neben Regenrückhalt und der mikroklimatischen Wirkung binden Dachbegrünungen Luftschadstoffe. Als Dachlandschaften bieten sie urbane Lebensräume für Menschen und Tiere. Durch ihre Dämmwirkung sind Einsparung bei Heiz- und Kühlkosten möglich. Aufwand und Kosten, die für eine Regenwasserbewirtschaftung anfallen, lassen sich durch den Rückhalt von Niederschlagswasser verringern.

QUALITATIVER NUTZEN

Begrünte Dächer bieten weitgehend ungestörte Lebensräume für Tiere und Pflanzen [53]. Vor allem für fliegende und störungsempfindliche Arten bieten sie geschützte Rückzugsräume. Für das Spektrum potenziell vorkommender Varianten ist häufig die Substratstärke entscheidend. Ab 15 cm Substratstärke verbessern sich die Lebensraumbedingungen für viele Pflanzen; im Boden können Insekten überwintern. Mit der Modellierung des Dachsubstrates und der Wahl verschiedener Substrate und Pflanzen lässt sich das Artenpotenzial zusätzlich steigern [54]. Im größeren Zusammenhang betrachtet, sind begrünte Dächer Trittsteine im urbanen Biotopverbund.

Varianten der Dachbegrünung

Die konventionelle Bauweise eines Kiesflachdaches dient aufgrund ihrer einfachen Konstruktion als Referenz für verschiedene Dachsysteme. Betrachtet wurden Dächer mit und ohne Photovoltaik (PV). Als klimagerechte Maßnahmen untersuchten wir die extensive Dachbegrünung (8 cm Substrataufbau) mit und ohne PV sowie die intensive Dachbegrünung in einer wirtschaftlichen Variante mit 15 cm Aufbauhöhe.



Kosten einer Dachbegrünung

Die ermittelten Kosten für die untersuchten Varianten der Dachbegrünung zeigt Abbildung 43. Die Kosten beziehen sich auf die reinen Dachaufbauten ohne ggf. statischen Mehraufwand am Gebäude. Das Kiesdach ist in der Herstellung günstiger als das extensive Gründach. Es muss jedoch nach 25 Jahren erneuert werden, weshalb die Summe der (Wieder-)Herstellungskosten höher ist. Die Herstellungskosten für alle Dachvarianten enthalten die Kosten für eine Bewirtschaftung des abfließenden Niederschlagswassers von 1 m² Dachfläche in einem Mulden-Rigolen-Element mit Kunststofffüllkörper (vgl. Kapitel 6.4) unter Berücksichtigung des jeweiligen Abflussbeiwertes nach DIN 1986-100:2016-12 [48]. Die Unterhaltskosten der Varianten mit PV-Anlage sind negativ, da unter Annahme heutiger Randbedingungen die Nutzung oder Einspeisung des erzeugten Stroms zu Einsparungen oder Gewinnen führt. Diese können, je nach zu erwartender Einspeisevergütung, auch von der Darstellung abweichen.

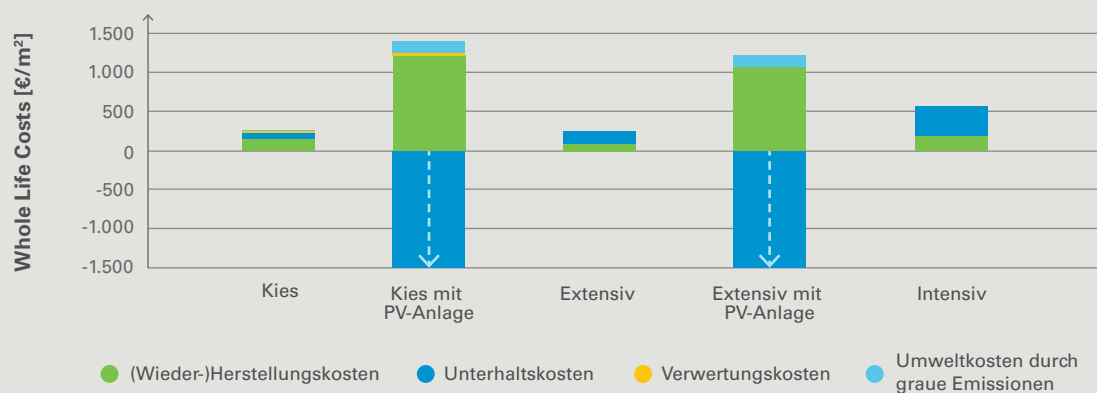


Abbildung 43: Kosten für Varianten der Dachbegrünung mit Kiesdach als Referenz ohne PV-Anlage und mit PV-Anlage



Nutzen der Dachbegrünung

Abbildung 44 verdeutlicht die ermittelten Nutzen für die Varianten der Dachbegrünung. Das intensive Gründach bietet den höchsten Nutzen, da es das meiste Grünvolumen bietet und am meisten Niederschlagswasser zurückhalten kann. Bezüglich der grauen Emissionen schneiden die beiden Varianten mit PV am besten ab, da Emissionseinsparungen gegengerechnet werden und der solare Gewinn somit einen positiven Effekt hat.

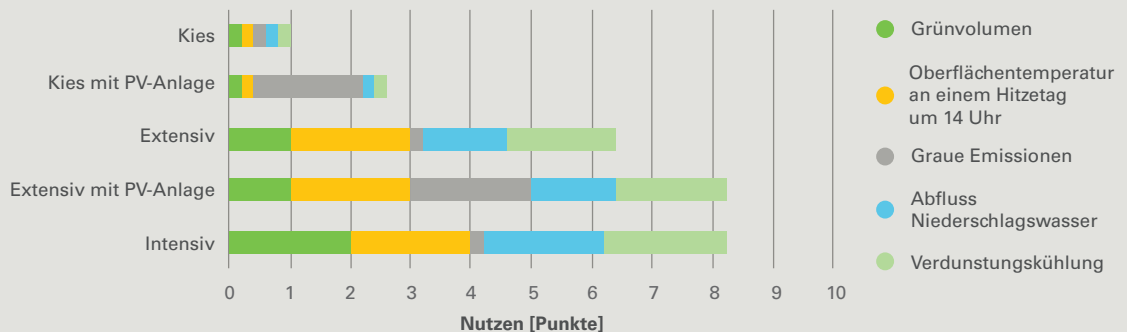


Abbildung 44: Nutzen von Dachbegrünung anteilig pro Nutzenfaktor

Reduzierung des Niederschlagswasserabflusses trotz Nachverdichtung am Beispiel Regensburg

Bestand und Entwurf für die Nachverdichtung des Modellprojektes Regensburg illustriert Abbildung 45. Beim Entwurf steigt die Grundfläche der Gebäude um 10 % im Vergleich zum Bestand (vgl. Abbildung 46 (a)). Die Anzahl der Wohnungseinheiten (WE) lässt sich mit einer Erhöhung der Gebäude von 32 WE im Bestand auf 66 WE im Entwurf verdoppeln. Gleichzeitig wird die abflusswirksame Fläche des gesamten Grundstücks um ca. 55 % verringert (vgl. Abbildung 46 (b)). Dies ist maßgeblich auf die Begrünung der Dachflächen zurückzuführen. Dazu tragen auch die teilversiegelten Erschließungsflächen im Vergleich zur davor asphaltierten Fläche bei (vgl. Kapitel 6.3).

ABFLUSSWIRKSAME FLÄCHEN

Um die abflusswirksame Fläche zu ermitteln, werden alle befestigten Flächen mit ihrem mittleren Abflussbeiwert nach [48] multipliziert. Je geringer die abflusswirksame Fläche, desto weniger Niederschlagswasser muss bewirtschaftet werden.

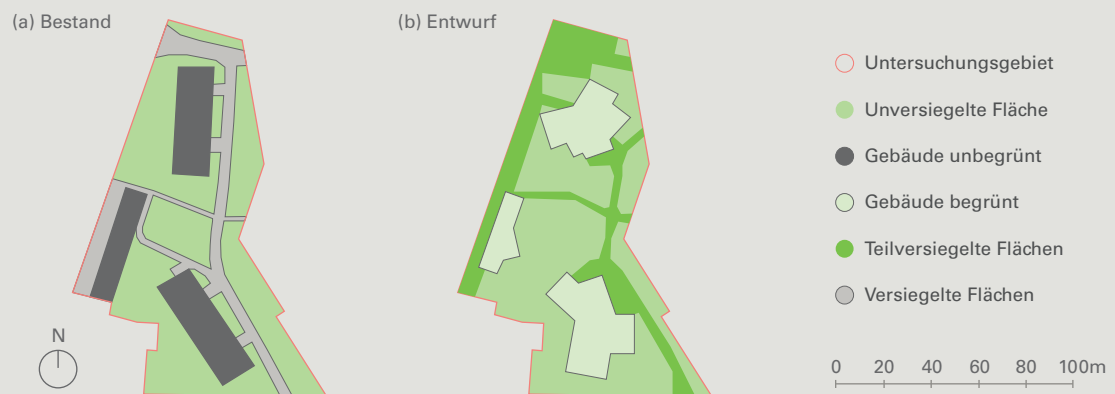


Abbildung 45: Bestand und Entwurf des Modellprojektes Regensburg

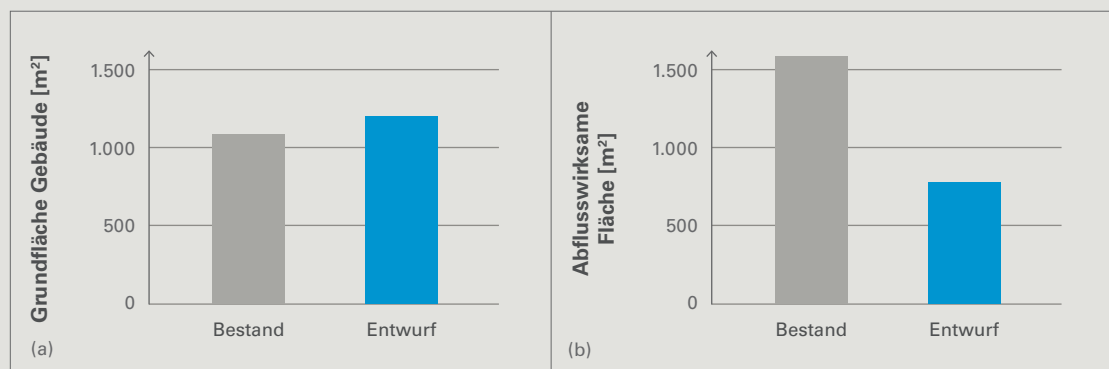


Abbildung 46: Erhöhung der Grundflächen der Gebäude ohne Erschließung (a), Veränderung der abflusswirksamen Flächen (mittlere Abflussbeiwerte nach [47]) (b) im Bestand (32 WE) und im Entwurf (66 WE)



Kosten-Nutzen der Dachbegrünung

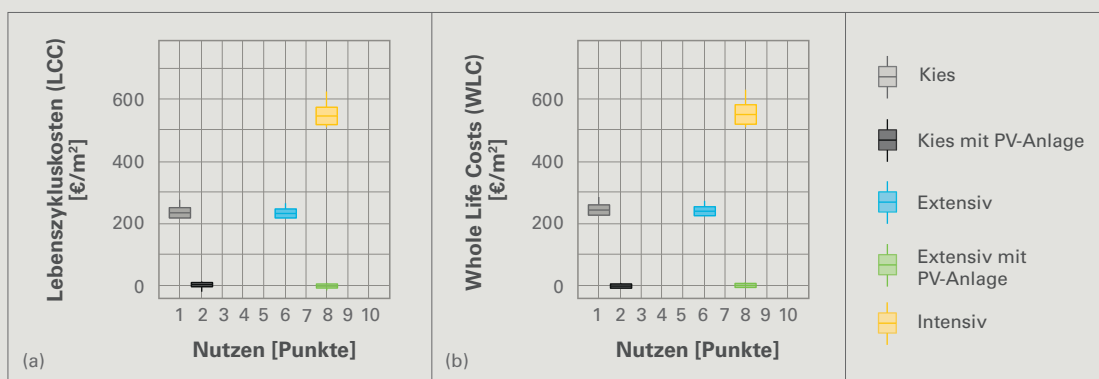


Abbildung 47: Kosten-Nutzen-Bewertung von Dachbegrünung – Lebenszykluskosten pro m² (a), Whole Life Costs pro m² (b)

Extensive Dachbegrünung mit PV als beste Option

Die Kosten-Nutzen Bewertung (vgl. Abbildung 47) ergibt: Eine extensive Dachbegrünung mit PV als klimagerechte Maßnahme lohnt sich im Vergleich zu einer konventionellen Maßnahme (Kiesdach ohne PV) wirtschaftlich, gesellschaftlich und ökologisch. Der Nutzen der Dachbegrünung ist deutlich höher als der unbegrünter Dächer. Durch die Stromerzeugung mit PV trägt sich diese Investition schon nach wenigen Jahren.

Rechnet man den PV erzeugten Strom in einen Geldwert um, sind Einnahmen über den Lebenszyklus zu verzeichnen. Die Lebenszykluskosten von extensiver Begrünung und Kiesdach sind in etwa gleich. Dabei ist zu beachten, dass Kiesdächer schon nach 25 Jahren erneuert werden müssen, Gründächer müssen im Betrachtungszeitraum nicht erneuert werden. Durch den höheren Nutzen der extensiven Dachbegrünung ist diese zu bevorzugen.

Intensive Dachbegrünung mit hohem Nutzen und hohen Kosten

Intensive Dachbegrünungen sind mit höheren Kosten und Anforderungen an das Tragwerk und die Pflege verbunden. Jedoch kann durch die Zunahme von Trocken- und Hitzeperioden die Wahl einer intensiven Dachbegrünung sinnvoll sein: Die dickere Substratschicht kann mehr Wasser für die Pflanzen speichern. Dies kann insbesondere in heißen und trockenen Sommern von Vorteil sein, um die Pflanzen ohne aufwändige Bewässerung vor dem Vertrocknen zu bewahren. Eine alternative Variante der Dachbegrünung sind sogenannte Retentionsdächer in Kombination mit Extensivbegrünung. Auch mit diesem lassen sich die Abflussmengen reduzieren und Kosten für Entwässerungsanlagen einsparen. Allerdings ist mit höheren Kosten und Anforderungen an das Tragwerk zu rechnen. Diese Variante wurde in der Kosten-Nutzen-Bewertung nicht bewertet.

Externe Kosten fallen nicht ins Gewicht

Abbildung 47 (a) und (b) unterscheiden sich kaum; die Umweltkosten haben also keine maßgebende Auswirkung. Die Umweltkosten resultieren aus der Berechnung der grauen Emissionen, deren Ergebnisse sich zwischen den untersuchten Varianten kaum unterscheiden. Der Grund dafür ist, dass der Dachaufbau der Varianten größtenteils identisch ist (Stahlbetonplatte, Dämmung, Abdichtung) und sie sich nur durch die Substrat- bzw. Kiesschicht unterscheiden.

6.6 Fassadenbegrünung

Vertikale Begrünungen sind vor allem in dicht bebauten Städten wirksam: Ohne großen Flächenbedarf am Boden kühlen sie Gebäude durch Verdunstung und Verschattung. Die Blätter wirken wie ein Staubfilter und verbessern die Luftqualität. Je nach Bauweise kann die Fassadenbegrünung einen technischen Sonnenschutz vor dem Fenster ersetzen oder ergänzen. Zudem schützen sie die Fassade vor der Witterung. Vertikale Begrünungen sind grob in zwei Kategorien zu unterteilen:

- Bodengebunden: Kletterpflanzen, die im Boden vor der Fassade wachsen und mit oder ohne Rankhilfe die Fassade selbstständig erklimmen.
- Wandgebunden (auch vertikale Gärten oder "Living Wall"): System aus Pflanzgefäßen an der Fassade, in denen Pflanzen jeglicher Form wachsen können [55].

Das richtige System ist in Abhängigkeit von den angestrebten Zielen sowie den finanziellen und technischen Rahmenbedingungen zu wählen. Bodengebundene Fassadenpflanzen verfügen über die Nährstoff- und Wasservorräte des anstehenden Bodens. Sie sind dadurch technisch relativ einfach und kostengünstiger realisierbar, wenngleich auch sie regelmäßig gepflegt werden müssen. Fassadengebundene Begrünungen sind statisch und technisch sehr aufwändig zu realisieren; die ständige Bewässerung und Pflege führen zu einem hohen Unterhaltsbedarf. Aufgrund der hohen Kosten fassadengebundener Systeme haben wir im Folgenden nur die bodengebundene Variante untersucht, da diese im geförderten Wohnungsbau leichter umsetzbar ist.

QUALITATIVER NUTZEN

Kombiniert mit Balkonen, Loggien und Laubengängen entstehen durch begrünte Fassaden vertikale Gärten, die die Aufenthaltsqualität erhöhen und sich positiv auf das Stadtbild auswirken [51]. Zudem leisten begrünte Fassaden einen wichtigen Beitrag zum Artenschutz, denn sie bieten Tieren Nist- bzw. Rückzugsmöglichkeiten und Nahrungsquellen. Die Bedürfnisse der Bewohner:innen und ökologische Ziele werden berücksichtigt, jedoch kann es auch Zielkonflikte mit den Bewohner:innen geben.

Varianten der Fassadenbegrünung

Grundsätzlich bezog sich die Untersuchung auf eine bodengebundene Begrünung der Süd- und Westfassade. Zum Vergleich standen folgende Varianten: eine Fassade ohne Begrünung, eine teilweise begrünte Fassade und eine großflächige Begrünung. Bei der teilweisen begrünten Fassade nahmen wir an, dass ca. die Hälfte der Fassade ohne Fensterbereiche begrünt ist. Bei der großflächigen Begrünung ist die gesamte Fassade ohne Fensterbereiche begrünt.

Die beiden Begrünungsvarianten analysierten wir mit unterschiedlichen Wurzelräumen für die bodengebundene Bepflanzung hinsichtlich der Bewässerung: Bei einem minimalen Wurzelraum von 1 m³ nach [37] (1 m² Fläche x 1 m Tiefe) liegt die Pflanze im versiegelten Raum und muss im Sommer zusätzlich bewässert werden. Annahme war hier eine manuelle Bewässerung mit Trinkwasser. Die Bewässerung bezieht sich auf ein Minimum, um die Vitalität der Bepflanzung zu erhalten.

Die Untersuchungen haben ergeben: Eine unversiegelte Fläche von ca. 8 m² pro Pflanze (entspricht 8 m³ Wurzelraum mit 1 m Tiefe) reicht für die untersuchten Standorte im Schnitt aus, um auch unter künftigen Klimabedingungen genügend Wasser zu haben. Die Bewässerung entfällt hier.

BEWÄSSERUNG

Die Option Bewässerung mit Trinkwasser wurde beispielhaft berechnet. Allerdings ist zu beachten, dass diese Art der Bewässerung keine gängige Praxis für klimagerechtes Bauen sein sollte, da Trinkwasser eine wertvolle Ressource ist. Je nach Standort ist auf Regen- oder Grauwasser zurückzugreifen.



Kosten der Fassadenbegrünung

Die Kosten für die untersuchten Varianten der Fassadenbegrünung pro m² Fassade verdeutlicht Abbildung 48. Hierbei ist eine Kletterpflanze mit Wurzelraum und Substrat sowie einer Rankhilfe kalkuliert. Bei einer Fassade ohne Begrünung fallen keine Herstellungs- und Nutzungskosten an; sie ist daher nicht abgebildet. Die Unterhaltskosten hängen stark vom verfügbaren Wurzelraum ab, da eine Bewässerung hohe laufende Kosten erzeugt. Ein Fachmann benötigt einen Hubsteiger für die Pflege. Die Umweltkosten sind bei allen Varianten verschwindend gering.

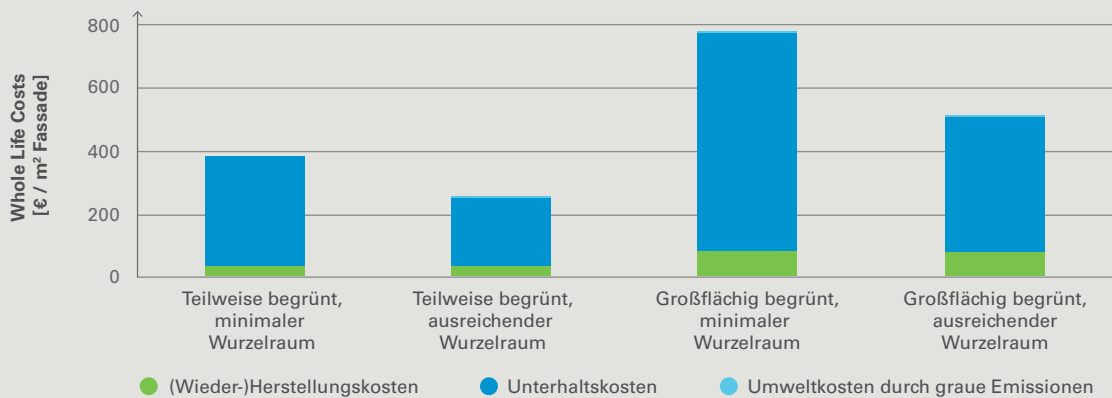


Abbildung 48: Kosten für Varianten der Fassadenbegrünung



Nutzen der Fassadenbegrünung

Die ermittelten Nutzen für die Varianten der Fassadenbegrünung illustriert Abbildung 49. Die Nutzen beziehen sich auf einen m² Fassade. Es zeigt sich, dass die Verdunstungskühlung stark vom verfügbaren Wurzelraum und damit der Wasserverfügbarkeit abhängt.

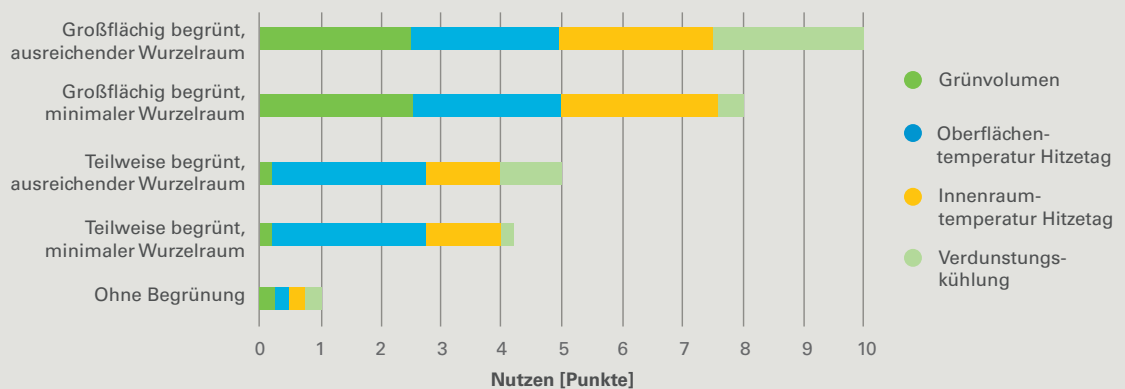


Abbildung 49: Nutzen für Varianten der Fassadenbegrünung

Fassadenbegrünung reduziert deutlich die Oberflächentemperatur

Abbildung 49 zeigt die stark variierenden Oberflächentemperaturen einer begrünten und einer nicht begrünten Fassade, nachgewiesen an der Süd-West-Fassade des Siegerentwurfs aus dem Modellprojekt in Nürnberg an einem Hitzetag ($T_{\max} > 30\text{ °C}$).

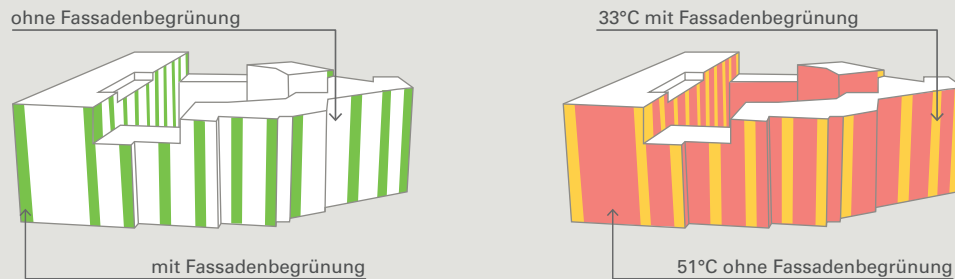


Abbildung 50: Auswirkungen der Fassadenbegrünung auf die Oberflächentemperatur an einem Hitzetag um 14 Uhr, Modellprojekt Nürnberg (abstrahierte Darstellung aus Simulation)

An einem Hitzetag um 14 Uhr beträgt in diesem Modellprojekt die Oberflächentemperatur der begrünten Fassade 33 °C; eine nichtbegrünte Fläche hingegen heizt sich auf 51 °C auf (Abbildung 50). Die Begrünung beeinflusst die Temperatur der Fassade während des Tages erheblich, indem sie deren Erwärmung durch Verschattung und Verdunstung reduziert. Die Unterschiede in den Oberflächentemperaturen haben Auswirkungen auf die Energieeffizienz wie die Kühlenergie von Gebäuden und das städtische Mikroklima. Begrünte Fassaden tragen dazu bei, die Aufheizung von Gebäuden an heißen Tagen zu reduzieren und so angenehmere Stadträume zu schaffen.



Kosten-Nutzen der Fassadenbegrünung

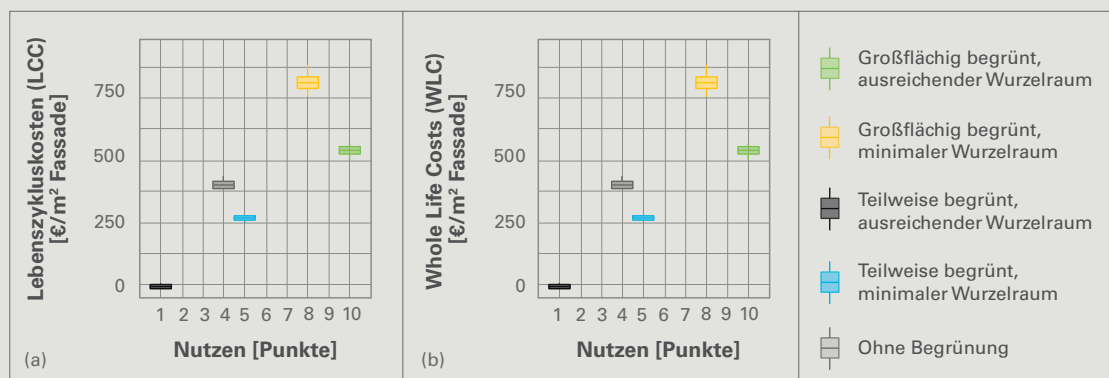


Abbildung 51: Kosten-Nutzen-Bewertung von Fassadenbegrünung – Lebenszykluskosten pro m² Fassade (a), Whole Life Costs pro m² Fassade (b)

Die notwendige Größe des Wurzelraums für Kletterpflanzen variiert je nach Standort, Bodengegebenheiten und Exposition. Bei nicht ausreichendem unversiegelten Wurzelraum fallen Kosten für die Bewässerung an.

Ausreichend Wurzelraum beachten

Die Größe des Wurzelraums wirkt sich erheblich auf die Kosten aus (vgl. Abbildung 51). Ist kein ausreichender Wurzelraum vorhanden, fallen hohe Kosten für die Bewässerung an. Wird ausreichend Wurzelraum und somit Wasserverfügbarkeit gewährleistet, führt dies zu einer Kostenersparnis von ca. einem Drittel. Im Neubau sollte die Fassadenbegrünung deshalb von Anfang an konzeptionell mitgeplant werden, um Rahmenbedingungen wie ausreichend Wurzelraum zu gewährleisten.

Mehr Begrünung führt zu mehr Nutzen

Die Kosten pro Quadratmeter Fassade für eine großflächige Fassadenbegrünung sind etwa doppelt so hoch wie bei einer teilweise begrünten Fassade. Zu beachten ist jedoch, dass der Nutzen steigt, je mehr Begrünung an einer Fassade vorhanden ist. Ein größeres Grünvolumen erhöht die Verdunstungskühlung, und abhängig von der Verfügbarkeit von Wasser sinkt die durchschnittliche Oberflächentemperatur.

Geringer Einfluss externer Kosten auf die Wirtschaftlichkeit

Abbildung 51 (a) und (b) sind nahezu gleich. Der CO₂-Fußabdruck der Fassadenbegrünungskonstruktion ist gering, daher haben Umweltkosten keine maßgebende Auswirkung auf die WLC (Abbildung 51 (b)). Eine Fassadenbegrünung liefert viele nicht monetarisierbare Nutzen wie eine erhöhte Aufenthaltsqualität und Lebensraum für Tiere und damit einen Beitrag zum Artenschutz.

Förderung prüfen

Fassadenbegrünungen stiften einen hohen gesellschaftlichen Nutzen in Bezug auf die Wohnqualität sowie ökologischen Nutzen. Bauherr:innen haben die Kosten im Einzelfall abzuwägen. Der Nutzen sollte das Interesse der Kommunen an Fassadenbegrünungen aufgrund der Steigerung der Artenvielfalt und der Reduktion des Wärmeinseleffekts in Städten wecken. Förderungen sind hier sinnvoll, um den Anreiz für Bauherr:innen zu erhöhen.



Abbildung 52: Beispielhafte Darstellung einer bodengebundenen Fassadenbegrünung

6.7 Sonnenschutzsysteme vor Fensterflächen

Ein Sonnenschutz vor dem Fenster reduziert solare Einträge in das Gebäude. Im Idealfall lässt er sich auch zur Lichtlenkung nutzen und verhindert Blendung. Gebäudeorientierung, Fensterflächenanteil und Sonnenschutz beeinflussen gemeinsam den Energiebedarf eines Gebäudes wesentlich. Grundsätzlich ist zwischen außenliegenden Sonnenschutzsystemen und innenliegender Verdunklung zu unterscheiden.

Varianten von Sonnenschutzsystemen

Für die Kosten-Nutzen-Betrachtung vergleichen wir den außenliegenden Sonnenschutz und die innenliegende Verdunklung mit Gebäuden ohne Sonnenschutz.

Außenliegender Sonnenschutz

Der Sonnenschutz liegt außerhalb der thermischen Hülle einige Zentimeter vor dem Fenster und besteht aus horizontalen oder vertikalen Lamellen. Hinsichtlich der Reduktion des Strahlungseintrags ist er deutlich effektiver als innenliegende Systeme. Da er jedoch der Witterung ausgesetzt ist, bestehen höhere konstruktive Anforderungen und damit höhere Investitions- und Wartungskosten als bei innenliegenden Systemen. Es wurde eine durchschnittliche Lebensdauer von 25 Jahren angenommen.



Abbildung 53: Beispielhafte Darstellung des untersuchten Sonnenschutzsystems

Innenliegende Verdunklung

Innenliegende Verdunklungen in Form von Vorhängen oder Jalousien sind eine gängige Lösung in Wohn- und Arbeitsräumen, um den Lichteintrag zu regulieren. Die Verdunklung befindet sich innerhalb der thermischen Hülle und soll vor allem Blendung vermeiden. Die Reduzierung solarer Wärmeeinträge ist deutlich geringer als bei außenliegenden Systemen. Innenliegende Systeme haben eine hohe Bedienungsfreundlichkeit und geringe Investitions- und Wartungskosten. Eine durchschnittliche Lebensdauer von 10 Jahren wurde angenommen.



Kosten von Sonnenschutzsysteme

Abbildung 54 zeigt die Kosten der untersuchten Sonnenschutzsysteme im Vergleich zu keinem Sonnenschutz vor dem Fenster über den Lebenszyklus. Die Kosten werden pro Fenster angegeben. Die Unterhaltskosten, die bei keinem Sonnenschutz anfallen, beziehen sich auf den Mehraufwand an Kühlenergiebedarf des Gebäudes im Vergleich zur Variante mit außenliegendem Sonnenschutz. Unterhaltskosten des außenliegenden Sonnenschutzes fallen für die Reinigung des Systems an. Die (Wieder-)Herstellungskosten der innenliegenden Verdunklung sind höher als beim außenliegenden Sonnenschutz, da sie im Betrachtungszeitraum häufiger zu ersetzen ist.

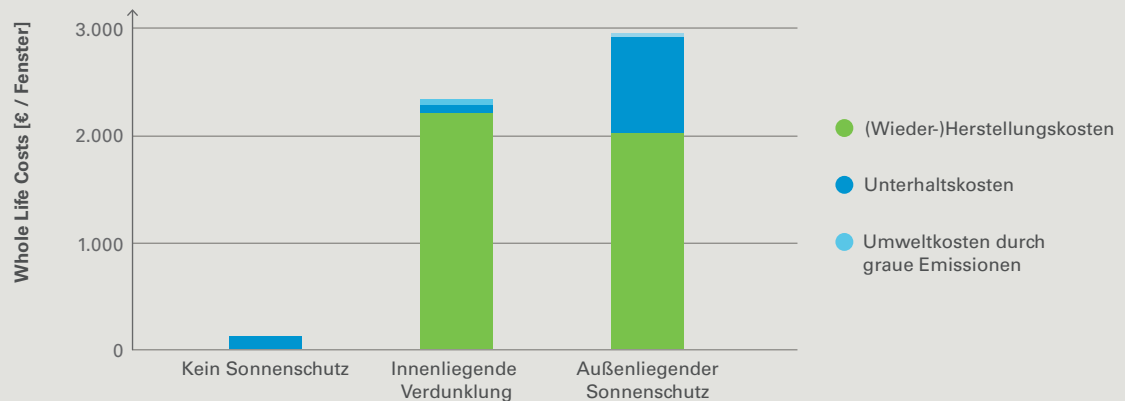


Abbildung 54: Kosten für Sonnenschutzsysteme



Nutzen der Sonnenschutzsysteme

Die ermittelten Nutzen für die Varianten der Sonnenschutzsysteme präsentiert Abbildung 55. Die innenliegende Verdunklung hat eine schlechtere Ökobilanz als der außenliegende Sonnenschutz, weil sie mehrfach im Betrachtungszeitraum auszutauschen ist. Daher erhält der außenliegende Sonnenschutz mehr Punkte in der Nutzenbewertung der grauen Emissionen.

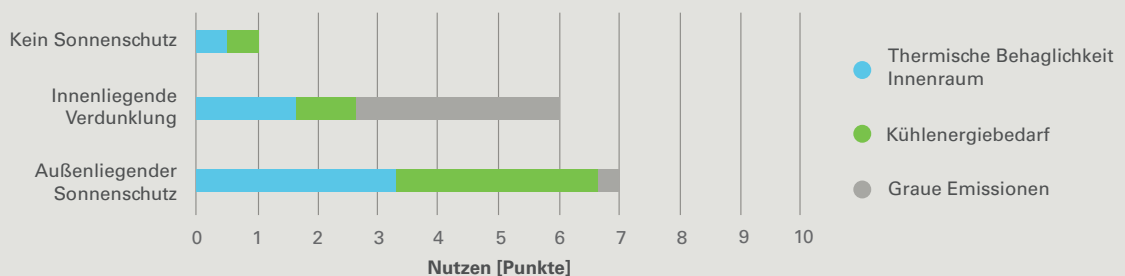


Abbildung 55: Nutzen der Sonnenschutzsysteme

Auswirkung von Sonnenschutzsystemen vor dem Fenster auf den Kühlenergiebedarf am Beispiel Schweinfurt

Die Auswirkung eines außenliegenden Sonnenschutzsystems auf den jährlichen spezifischen Kühlenergiebedarf von drei Wohngebäuden verdeutlicht Abbildung 56. Die Simulation erfolgte mit großen Bäumen und Neupflanzungen.

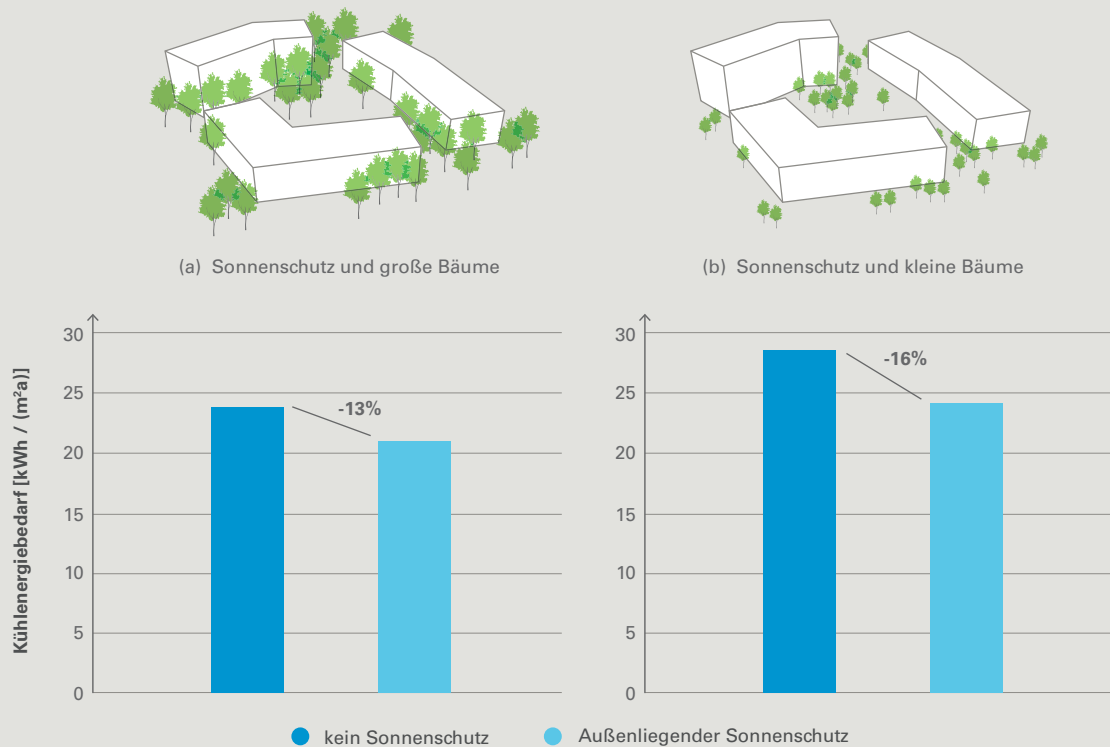


Abbildung 56: Einfluss von Sonnenschutz auf den jährlichen Kühlenergiebedarf von Wohngebäuden in Abhängigkeit der Verschattung durch Bäume, gezeigt am Modellprojekt in Schweinfurt

Verschattung durch Bäume ist die effektivste Maßnahme, um Kühllasten zu reduzieren. Wird zusätzlich ein außenliegender Sonnenschutz installiert, lassen sich die Kühllasten durch den Sonnenschutz um ca. 13 % senken (vgl. Abbildung 56 a). Besonders effektiv ist ein außenliegender Sonnenschutz dann, wenn es wenig Verschattung durch Bäume gibt. Hier sinkt die Kühllast durch den Sonnenschutz um 16 % (vgl. Abbildung 56 b).



Kosten-Nutzen der Sonnenschutzsysteme

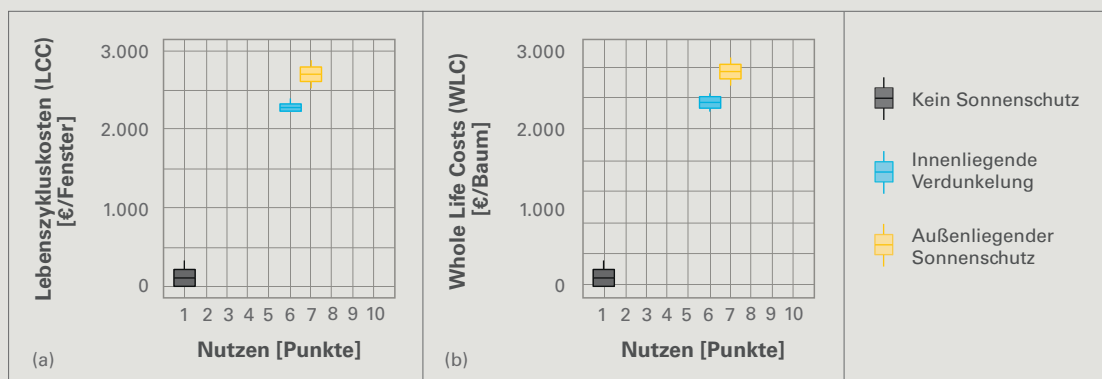


Abbildung 57: Kosten-Nutzen-Bewertung von Sonnenschutz – Lebenszykluskosten pro Fenster (a), Whole Life Costs pro Fenster (b)

Außenliegender Sonnenschutz vor dem Fenster: praxisbewährt trotz höherer Kosten

Außenliegende Sonnenschutzsysteme haben über den Lebenszyklus die höchsten Kosten (vgl. Abbildung 57). Die innenliegende Verdunkelung ist etwa 20 % günstiger, bietet jedoch auch einen deutlich geringeren Nutzen, da sie einfallende Solarstrahlung nicht reduziert. Der Einsatz außenliegender Sonnenschutzsysteme hat sich in der Baupraxis bewährt. Bauherr:innen sind bereit, höhere Kosten über den Lebenszyklus hinweg zu tragen, um Komfort im Innenraum zu gewährleisten und Kühllasten zu reduzieren.

Hoher Einfluss von Umweltkosten

Sonnenschutzsysteme können mit verhältnismäßig geringem finanziellem Aufwand zu einer deutlichen Absenkung von Raumtemperaturen und damit Kühllasten führen. Aufgrund kürzerer Austauschzyklen kosten innenliegende Systeme über ihren Lebenszyklus hinweg etwa gleich viel wie außenliegende Systeme. Die Umweltkosten betragen im Durchschnitt rund 1 % des Nettobarwerts der WLC bei außenliegenden Systemen und 3 % bei innenliegenden Systemen.

LITERATUR

- [1] Linke S, Putz A. Die Planung einer grünen Stadt der Zukunft. Handlungsmöglichkeiten und Instrumente [Broschüre 1]. Grüne Stadt der Zukunft. Freising; 2021
- [2] Bayerisches Landesamt für Umwelt. Bayerisches Klimainformationssystem. Im Internet: <https://klimainformationssystem.bayern.de/>; Stand: 18.09.2023
- [3] IPCC. IPCC AR6-WGI Atlas. Im Internet: <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>; Stand: 08.03.2023
- [4] Simon H. Modeling urban microclimate : development, implementation and evaluation of new and improved calculation methods for the urban microclimate model ENVI-met. doi:10.25358/openscience-4042
- [5] Bruse M, Fleer H. Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software* 1998; 13: 373–384. doi:10.1016/S1364-8152(98)00042-5
- [6] Matzarakis A, Mayer H, Iziomon MG. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *Int J Biometeorol* 1999; 43: 76–84. doi:10.1007/s004840050119
- [7] EnArgus. Predicted Mean Vote. Im Internet: https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d8872-2/*/*Predicted%20Mean%20Vote?search=Predicted%20Mean%20Vote&op=Wiki.getwiki
- [8] Rötzer T. City Tree 4.1.; 2023
- [9] Rötzer T, Rahman MA, Moser-Reischl A, et al. Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. *Science of the Total Environment* 2019; 676: 651–664. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.04.235
- [10] Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz. Rückstrahlung von Bau- und Gestaltungsmaterialien. Im Internet: www.klimaleitfaden-thueringen.de/rueckstrahlung-von-bau-und-gestaltungsmaterialien; Stand: 10.11.2023
- [11] Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (DIN EN ISO 14044:2021-02). Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [12] Umweltbundesamt. Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten. Dessau-Roßlau; 2019
- [13] Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. Teil 4: Wasserhaushaltsbilanz für die Bewirtschaftung des Niederschlagswassers (DWA-M 102-4/BWK-M 3-4). Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.; 2022 (2022)
- [14] Winklmayr C, Muthers S, Niemann H, et al. Heat-Related Mortality in Germany From 1992 to 2021. *Dtsch Arztebl Int* 2022; 119: 451–457. doi:10.3238/arztebl.m2022.0202
- [15] Institut für Weltwirtschaft, Hrsg. Kosten des Klimawandels. Die Wirkung steigender Temperaturen auf Gesundheit und Leistungsfähigkeit. Kiel; 2007
- [16] Österreicher D, Sattler S. Maintaining Comfortable Summertime Indoor Temperatures by Means of Passive Design Measures to Mitigate the Urban Heat Island Effect—A Sensitivity Analysis for Residential Buildings in the City of Vienna. *Urban Science* 2018; 2: 66. doi:10.3390/urbansci2030066
- [17] Umweltbundesamt. Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Dessau-Roßlau; 2019
- [18] United States Environmental Protection Agency. Learn About Heat Islands (28.08.2023). Im Internet: <https://www.epa.gov/heatislands/learn-about-heat-islands>; Stand: 06.02.2024
- [19] Deutscher Wetterdienst. Wetter- und Klimalexikon: Starkregen. Im Internet: www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar; Stand: 31.10.2023

- [20] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz. Wassersensible Siedlungsentwicklung. München; 2020
- [21] DGNB GmbH. DGNB System für biodiversitätsfördernde Außenräume. Im Internet: www.dgnb.de/de/zertifizierung/quartiere/biodiversitaetsfoerdernde-aussenraeume; Stand: 31.10.2023
- [22] ISO 15686-5:2017. Buildings and constructed assets. Service life planning (ISO 15686-5:2017). Vernier, Geneva, Switzerland: ISO copyright office
- [23] DIN 276:2018-12. Kosten im Bauwesen; ICS 91.010.20 (DIN 276:2018-12). Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [24] DGNB GmbH. Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus. ECO1.1. DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau 2018
- [25] Karlsson M, Ziebarth NR. Population health effects and health-related costs of extreme temperatures: Comprehensive evidence from Germany. *Journal of Environmental Economics and Management* 2018; 91: 93–117. doi:10.1016/j.jeem.2018.06.004
- [26] Umweltbundesamt. Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze. Stand 12/2020. Dessau-Roßlau; 2020
- [27] Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern. Baukosten Positionen Neubau 2023. Statistische Kostenkennwerte Teil 3. Stuttgart: BKI; 2023
- [28] Funke Kunststoffe GmbH. Preisliste Regenwasserbewirtschaftung 1/2023. Hamm-Uentrop; 2023
- [29] Vertiko GmbH. Kosten Bodengebundene Fassadenbegrünung; 2022 (10.10.2022)
- [30] Optigrün international AG. Kostenrichtwerte Retentionsdach, Rigole; 2020 (2020)
- [31] Rommel S, Huber M, Krüger S, et al. Dezentrale Behandlung von Verkehrsflächenabflüssen durch die Kombination von Absetz und Versickerungsschacht. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2022; 69: 671–678. doi:10.3242/kae2022.08.002
- [32] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Außenanlagen von Bundesliegenschaften; 2012
- [33] Baureferat Gartenbau, Landeshauptstadt München. Mehr Platz für Stadtbäume! 9. Symposium Stadtgrün. Berlin; 2019 (13.11.2019)
- [34] Berliner Regenwasseragentur. Ökonomische Analyse dezentraler Regenwasserbewirtschaftung in Berlin; 2023
- [35] FLL. Empfehlungen für Baumpflanzungen. Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen, Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate. 2. Aufl. Bonn: FLL; 2010
- [36] FLL. Fassadenbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadenbegrünungen. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V; 2018
- [37] Regierung von Oberbayern. Klimaschutz; Beantragung einer Förderung (01.02.2023). Im Internet: www.regierung.oberbayern.bayern.de/aufgaben/37198/37205/leistung/leistung_65241/index.html; Stand: 07.11.2023
- [38] Rötzer T, Reischl A, Rahman, Mohammad, Pretzsch, H., Pauleit S. Leitfaden zu Stadtbäumen in Bayern. Freising; 2021
- [39] Lang W, Pauleit S, Brasche J, Hausladen G, Maderspacher J, Schelle, R., Zölch, T. Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern: Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt am Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung. München: StMUV; 2020
- [40] Roloff A, Gillner S, Bonn S. Die KlimaArten-Matrix für Stadtbaumarten (KLAM-Stadt). 2009. Haymarket Media, Braunschweig: 10-14. Branchenbuch Baumschulwirtschaft 2009: 10–14

- [41] GALK e.V. GALK-Straßenbaumliste. Im Internet: <https://strassenbaumliste.galk.de/>; Stand: 07.07.2021
- [42] Böll S, Mahsberg D. Vorstudie: Klimaanpassung in den Städten Bayerns - Vergleichende Untersuchungen zum Einsatz gebietsfremder und heimischer Stadtklimabäume. Abschlussbericht zum Teilprojekt 5. Würzburg; 2019
- [43] FLL. Empfehlungen für Baumpflanzungen. Teil 1: Planung, Pflanzarbeiten, Pflege. In: FLL, Hrsg. Fokus Baum: Von Pflanzengüte bis Pflege und Ausschreibung. Beuth Verlag GmbH; 2019
- [44] Landeshauptstadt München. Zusätzliche Technische Vorschriften für die Herstellung und Anwendung verbesserter Vegetationstragschichten. München: Landeshauptstadt München, Baureferat Gartenbau; 2016
- [45] Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Instandhaltungsleistungen für die Entwicklung und Unterhaltung von Vegetation (Entwicklungs- und Unterhaltungspflege) (DIN 18919:2016-12). Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [46] ARD | Das Erste. Service: Die richtige Kühlung (19.07.2023). Im Internet: <https://www.daserste.de/information/politik-weltgeschehen/morgenmagazin/service/service-richtige-kuehlung100.html>; Stand: 07.11.2023
- [47] Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke. Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056 (DIN 1986-100:2016-12)
- [48] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser (DWA-A 138:2005-04). Hennef: DWA
- [49] Wicke D, Tatis-Muvdi R, Rouault P, Zerball-van Baar P, Dünnbier U, Rohr M, Burkhardt M. Bauen und Sanieren als Schadstoffquelle in der urbanen Umwelt. Abschlussbericht. Dessau-Roßlau; 2022
- [50] Pfoser N, Jenner N, Henrich J, Heusinger J, Weber S. Gebäude Begrünung Energie. Darmstadt; 2013
- [51] Freie und Hansestadt Hamburg. Dachbegrünung. Leitfaden zur Planung. Hamburg; 2018
- [52] Brenneisen S. The Benefits of Biodiversity from Green Roofs - Key Design Consequences. Conference on greening rooftops for sustainable communities; 2003
- [53] Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr. Werkzeugkasten Artenvielfalt – Leitfaden für mehr Grün an öffentlichen Gebäuden. München; 2020
- [54] Raji B, Tenpierik MJ, van den Dobbelsteen A. The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015; 45: 610–623. doi:10.1016/j.rser.2015.02.011
- [55] MaRo Steg-Platten GmbH & Co. KG. Raffstore / Aussenjalousie Z90 Konfigurator. Im Internet: www.steg-platten.de/raffstore/-/aussenjalousie-z90#; Stand: 27.12.2022
- [56] Linke, S.; Zölch, T.; Bechtel, D.; Moseler, E. M.; Rehfeldt, K.; Feder, S., Pauleit, S., Lang, W., Erlwein, S., Wirth, V., Schiffer, M., und Möbius, S.: Anleitung für städtebaulich-/ landschaftsplanerische Wettbewerbe. Eine Anleitung für alle Wettbewerbsbeteiligten. Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen, Technische Universität München, 2023

ABBILDUNGEN

Titelbild:	NUWELA Büro für Städtebau und Landschaftsarchitektur mit Püschel Zickert Architekt:innen
Abbildung 1:	Karte Modellprojekte
Abbildung 2:	Schematische Darstellung der Themenfelder des Projektes
Abbildung 3:	Akteursbezogene Handlungsempfehlungen
Abbildung 4:	Beispielhafte Darstellung für Wohnungsbau an einem Fließgewässer, Calado - stock.adobe.com
Abbildung 5:	Das vernetzte, integrierte Planen zwischen "grau-grün-blau" kombiniert und verknüpft drei Infrastrukturtypen in urbanen und ländlichen Gebieten, um eine nachhaltige, widerstandsfähige Umwelt für Mensch, Tier und Natur zu schaffen
Abbildung 6:	Integration von klimagerechten Maßnahmen in Projekt- und Planungsprozesse
Abbildung 7:	Beispielhafte Ziele, Kriterien und Maßnahmen
Abbildung 8:	Ziele, Kriterien und untersuchte Maßnahmen zum klimagerechten Bauen. Die Kriterien konzentrieren sich vor allem auf Hitzetage und Tropennächte sowie Starkregen. Sie gelten neben der Planung von Gebäuden auch für den Außenraum.
Abbildung 9:	Beispielbild für einen begrünten Straßenraum, victorgrow – stock.adobe. com
Abbildung 10:	Überblick der ermittelten quantitativen Nutzenfaktoren für die betrachteten Maßnahmen
Abbildung 11:	Beispielbild für Abkühlung im Außenraum an einem Hitzetag, Yury and Tanya – stock.adobe.com
Abbildung 12:	Überflutete Fläche nach einem Starkregenereignis, soupstock – stock. adobe.com
Abbildung 13:	Beispielbild für Pflanzenvielfalt vor Gebäuden, René Notenbomer – stock. adobe.com
Abbildung 14:	Beeinflussbarkeit und Höhe der Herstellungs- und Folgekosten
Abbildung 15:	LCC der Dachvarianten pro m ² (Brutto, NBW für das Jahr 2023)
Abbildung 16:	Beispielbild für artenreiche Begrünung im Straßenraum, Andreas Gruhl – stock.adobe.com
Abbildung 17:	Dachbegrünung mit PV-Anlagen, René Notenbomer – stock.adobe.com
Abbildung 18:	Begrünte Fassade eines Gebäudes, shootingtheworld – stock.adobe.com
Abbildung 19:	Schematische Darstellung der Kosten-Nutzen-Analyse, Lebenszykluskosten (a), Whole Life Costs (b)
Abbildung 20:	Kosten für Baumerhalt mit Baumschutz und Ersatzpflanzung über den Lebenszyklus
Abbildung 21:	Kosten für Baumerhalt mit Baumschutz und Ersatzpflanzung anteilig pro Nutzenfaktor
Abbildung 22:	Grünfläche mit altem Bestandsbaum, santiago silver – stock.adobe.com
Abbildung 23:	Szenarienbildung: Erhalt des gesunden Baumbestandes (a) und Fällung der Bestandsbäume (b)
Abbildung 24:	Untersuchung der Aufenthaltsqualität im Freien an einem Hitzetag um 14 Uhr: Erhalt des gesunden Baumbestandes (a) und Fällung der Bestandsbäume (b)
Abbildung 25:	Kosten-Nutzen-Bewertung zu Baumerhalt – Lebenszykluskosten pro Baum (a), Whole Life Costs pro Baum (b)
Abbildung 26:	Kosten für Baumpflanzungen über den Lebenszyklus
Abbildung 27:	Beispielhafte Darstellung von Baumpflanzungen, ah_fotobox – stock.adobe.com

Abbildung 28:	Nutzen für Baumpflanzungen anteilig pro Nutzenfaktor
Abbildung 29:	Modellprojekt Ingolstadt mit Varianten der Baumstandorte (links) und die Verdunstungskühlung von heute gepflanzten Bäumen in der Zukunft am Beispiel Standort Ingolstadt (60 Jahre alte Bäume unter zukünftigen Klimabedingungen). Annahme des Energieverbrauchs für die durchgehende Nutzung einer Klimaanlage für die Sommermonate für ein 20 m ² großes Zimmer basierend auf [47]
Abbildung 30:	Kosten-Nutzen-Bewertung zu Baumpflanzung – Lebenszykluskosten pro Baum (a), Whole Life Costs pro Baum (b)
Abbildung 31:	Kosten für Bodenbeläge pro m ²
Abbildung 32:	Nutzenermittlung für Bodenbelägen anteilig pro Nutzenfaktor
Abbildung 33:	Modellprojekt Regensburg mit Grundflächen von Außenraum und Gebäude
Abbildung 34:	Vergleich GWP Gebäudegrundfläche vs. Beläge, pro m ²
Abbildung 35:	Kosten-Nutzen-Bewertung von Oberflächen im Außenraum- Lebenszykluskosten pro m ² a) und Whole Life Costs pro m ² (b)
Abbildung 36:	Schematische Darstellung von Mulden-Rigolen-Element (a) und Rigolen-Element (b) mit Kunststoff-Füllkörper oder Kiesschüttung als Füllkörper
Abbildung 37:	Kosten für die Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser durch Versickerung; Vergleich unterschiedlicher Varianten
Abbildung 38:	Anteilige Nutzen für Varianten der Vor-Ort-Bewirtschaftung von Niederschlagswasser durch Versickerung
Abbildung 39:	Bestand und Entwurf des Modellprojektes Freising
Abbildung 40:	Wasserhaushalt für den naturnahen Zielzustand, Entwurf und Bestand im langjährigen Jahresmittel am Beispiel des Modellprojektes Freising
Abbildung 41:	Kosten-Nutzen-Bewertung von Versickerungsanlagen – Lebenszykluskosten pro m ² angeschlossener Fläche (a), Whole Life Costs pro m ² angeschlossener Fläche (b). Hinweis: Versickerungsmulden haben andere Standortbedingungen als Mulden-Rigolen-Elemente oder Rigolen-Elemente
Abbildung 42:	Beispielhafte Darstellung einer Versickerungsmulde im Straßenraum, Aufnahme von Patrizia Eben
Abbildung 43:	Kosten für Varianten der Dachbegrünung mit Kiesflachdach als Referenz ohne PV-Anlage und mit PV-Anlage
Abbildung 44:	Nutzen von Dachbegrünung anteilig pro Nutzenfaktor
Abbildung 45:	Bestand und Entwurf des Modellprojektes Regensburg
Abbildung 46:	Erhöhung der Grundflächen der Gebäude ohne Erschließung (a), Veränderung der abflusswirksamen Flächen (mittlere Abflussbeiwerte nach [42]) (b) im Bestand (32 WE) und im Entwurf (66 WE)
Abbildung 47:	Kosten-Nutzen-Bewertung von Dachbegrünung – Lebenszykluskosten pro m ² (a), Whole Life Costs pro m ² (b)
Abbildung 48:	Kosten für Varianten der Fassadenbegrünung
Abbildung 49:	Nutzen für Varianten der Fassadenbegrünung
Abbildung 50:	Auswirkungen der Oberflächentemperatur durch Fassadenbegrünung an einem Hitzetag um 14 Uhr, Modellprojekt Nürnberg (abstrahierte Darstellung aus Simulation)
Abbildung 51:	Kosten-Nutzen-Bewertung von Fassadenbegrünung – Lebenszykluskosten pro m ² Fassade (a), Whole Life Costs pro m ² Fassade (b)
Abbildung 52:	Beispielhafte Darstellung einer bodengebundenen Fassadenbegrünung, Marktl Robert - stock.adobe.com
Abbildung 53:	Beispielhafte Darstellung des untersuchten Sonnenschutzsystems, U. J. Alexander – stock.adobe.com

- Abbildung 54: Kosten für Sonnenschutzsysteme
 Abbildung 55: Nutzen der Sonnenschutzsysteme
 Abbildung 56: Einfluss von Sonnenschutz auf den jährlichen Kühlenergiebedarf von Wohngebäuden in Abhängigkeit der Verschattung durch Bäume, gezeigt am Modellprojekt in Schweinfurt
 Abbildung 57: Kosten-Nutzen-Bewertung von Sonnenschutz – Lebenszykluskosten pro Fenster (a), Whole Life Costs pro Fenster (b)
 Abbildung 58: Beispielhafte Darstellung für eine städtische grüne Oase, René Notenbomer - stock.adobe.com

Zitiervorschlag

Bechtel, D.; Kleeberger, M.; Rosenberger, L.; Kuhlwein, H.; Schelle, R.; Amberger, R.; Bienert, S.; Helmreich, B.; Lang, W.: Broschüre: Bezahlbar klimagerecht bauen: Kosten-Nutzen-Bewertung von Maßnahmen im Lebenszyklus, Hrsg.: Zentrum für Stadtnatur und Klimaanpassung: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV), Zentrum für Stadtnatur und Klimaanpassung (München), 2024



Abbildung 58: Beispielhafte Darstellung für eine städtische grüne Oase



Partner:



Zentrum Stadtnatur
und Klimaanpassung



Technische Universität München



INSTITUT FÜR
IMMOBILIENÖKONOMIE

Eine Initiative des
Bayerischen
Umweltministeriums



Herausgeber:

Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV)
Rosenkavalierplatz 2, 81925 München
poststelle@stmuv.bayern.de
<https://www.stmuv.bayern.de/>
[linkedin.com/company/stmuv](https://www.linkedin.com/company/stmuv)
[instagram.com/umweltministerium_bayern](https://www.instagram.com/umweltministerium_bayern)
[facebook.com/lebensministerium](https://www.facebook.com/lebensministerium)
twitter.com/STMUV_Bayern
[youtube.com/user/umweltgesundheit](https://www.youtube.com/user/umweltgesundheit)

Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung,
Technische Universität München
<https://www.zsk.tum.de>

Grundlage für Begleitforschung:

Modellvorhaben „Klimaanpassung im
Wohnungsbau“ des Experimentellen
Wohnungsbaus im Bayerischen Staatsministerium
für Wohnen, Bau und Verkehr (StMB)
Franz-Josef-Strauß-Ring 4, 80539 München
poststelle@stmb.bayern.de
<https://www.stmb.bayern.de/>
[linkedin.com/company/wirbauenbayern/](https://www.linkedin.com/company/wirbauenbayern/)
[instagram.com/lebenbauenbewegen](https://www.instagram.com/lebenbauenbewegen)
[facebook.com/lebenbauenbewegen](https://www.facebook.com/lebenbauenbewegen)
twitter.com/bauenbewegen
[tiktok.com/@wirbauenbayern](https://www.tiktok.com/@wirbauenbayern)
[youtube.com/user/Bayern](https://www.youtube.com/user/Bayern)

Redaktion:

Technische Universität München
Arcisstraße 21, 80333 München

Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges
Planen und Bauen

Prof. Dr.-Ing. Werner Lang
M. Sc. Doris Bechtel
M. Sc. Markus Kleeberger
Dipl. Ing. Rupert Schelle

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
Prof. Dr. rer. nat. habil. Brigitte Helmreich
M. Sc. Lea Rosenberger

Institut für Immobilienökonomie GmbH (IIÖ)
Prof. Dr. Sven Bienert, MRICS REV
M. Sc. Rebecca Amberger
M. Sc. Hunter Kuhlwein

Gesamtkonzept:

StMUV und StMB

Gestaltung und Layout:

Marion Schiffer, Ugo Furlani

Illustrationen:

Marion Schiffer, Lea Rosenberger, Markus Kleeberger,
Rupert Schelle

Druck:

Druckerei StMUV
Klimaneutraler Druck auf 100% Altpapier oder
PEFC-zertifiziertem Papier PEFC/00-00-0000

März 2024

© StMUV und StMB alle Rechte vorbehalten

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt. Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.



Kommunen, Bauherr:innen und Planende müssen sich auf künftig zunehmende Extremwetterereignisse vorbereiten.

Dies unterstreicht die essenzielle Bedeutung von klimagerechtem Bauen. Zur Sicherstellung von bezahlbarem Wohnraum ist eine differenzierte Kostenanalyse über den Lebenszyklus nötig, welche die verschiedenen Akteure einbezieht.

Entscheidend ist ein interdisziplinärer Ansatz und eine frühzeitige Planung, die standortspezifische Risiken über die gesamte Nutzungsphase berücksichtigt.

Klimagerechte Maßnahmen können durch ihren umweltbezogenen und gesellschaftlichen Nutzen die Folgen des Klimawandels abmildern. Gleichzeitig bieten sie eine Chance zur Transformation der gebauten Umwelt. Frühzeitige Investitionen dienen als präventive Maßnahme und bieten Schutz vor zukünftigen Risiken.

