



Mikroskalige **U**ntersuchung und Aktivierung der
technischen und planerischen **A**npassungskapazität
der Stadt **B**onn zur **R**eduzierung des Hitzestresses

Abschlussbericht

Projektlaufzeit 2021-2023

**STADT.
CITY.
VILLE.
BONN.**

berchtoldkrass space&options
Raumplaner, Stadtplaner. Partnerschaft



Impressum

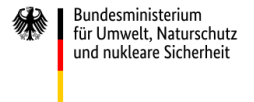
MUTABOR - **M**ikroskalige **U**ntersuchung und Aktivierung der **t**echnischen und **p**lanerischen **A**npassungskapazität der Stadt **B**onn zur **R**eduzierung des Hitzestresses

Projektförderung

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

gefördert im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie „Kommunale Leuchtturmvorhaben“

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektkoordination

Bundestadt Bonn - Amt für Umwelt und Stadtgrün, Abteilung Umweltvorsorge und -planung, Klimaanpassung und -vorsorge

Jessica Löffler (jessica.loeffler@bonn.de)

Lea Gockel (lea.gockel@bonn.de)

**STADT.
CITY.
VILLE.
BONN.**

Projektpartner

berchtoldkrass space & options Raumplaner, Stadtplaner. Partnerschaft

Prof. Dr. Martin Berchtold (mb@berchtoldkrass.de)

Sarah Zwanzger (sz@berchtoldkrass.de)

berchtoldkrass space&options
Raumplaner, Stadtplaner. Partnerschaft

Geo-Net Umweltconsulting GmbH

Björn Büter (bueter@geo-net.de)

Melanie Schneider (schneider@geo-net.de)



Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit unter dem Förderkennzeichen 67DAS180A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Bonn, Juli 2023

Inhalt

1	Einführung – Ziel des Projekts	8
2	Maßnahmenkatalog zur Hitzeanpassung	9
2.1	Gesamtkatalog	9
2.2	Maßnahmen der Potenzialermittlung	10
2.3	Add-On-Maßnahmen	15
3	Methodik der Potenzialermittlung und Klimawirkungsanalyse	20
3.1	Basiswissen zur Methodik der Potenzialermittlung	20
3.2	Basiswissen zur Methodik der Klimawirkungsanalyse	22
4	Szenarien der Hitzeanpassung 2035	26
4.1	Ergebnisse der Referenzrechnung	27
4.1.1	Grundannahmen der Klimawirkungsanalyse	27
4.1.2	Temperaturergebnisse	27
4.2	Szenario Weiter wie bisher 2035	32
4.2.1	Grundannahmen der Klimawirkungsanalyse	32
4.2.2	Grundannahmen der Potenzialermittlung	32
4.2.3	Nutzungsänderungen/ Stärke des Maßnahmenpotenzials	32
4.2.4	Temperaturergebnisse	33
4.3	Szenario des Technisch Machbaren 2035	37
4.3.1	Grundannahmen der Klimawirkungsanalyse	37
4.3.2	Grundannahmen der Potenzialermittlung	37
4.3.3	Nutzungsänderungen	41
4.3.4	Temperaturergebnisse	43
4.3.5	Add-On Transformationsgebiete	47
4.4	Exkurs Rückwärts-Modell (Neuronales Netzwerk)	56
5	Wesentliche Erkenntnisse für die Hitzevorsorge in Bonn	58
5.1	Was ist durch Hitzevorsorge möglich?	58
5.2	Wo sind die großen Stellschrauben?	63
5.3	Einflussmöglichkeiten der verschiedenen Akteur*innen	66
6	Handlungsorientierte Empfehlungen	67
6.1	... zur Definition von und Orientierung an quantitativen Zielen zur Hitzevorsorge	67
6.2	... für die Bestandsentwicklung	68
6.3	... für Neubau und Nachverdichtung	70
6.4	... für die Entwicklung grün-blauer Infrastruktur	74
6.5	Planungshinweiskarte als zentrales Steuerungsinstrument für die gesamtstädtische Hitzevorsorge	79
7	Laufende Projekte der Stadt Bonn mit Bezug zur Hitzevorsorge	80
8	Good Practice	82
9	Ausblick	84

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Maßnahmenübersicht nach Wirkungspfaden	9
Abbildung 2: Grundidee Methodik Potenzialermittlung und Klimawirkungsanalyse	20
Abbildung 3: Ausschnitt Charakterisierung durch Stadtstrukturtypen (links) und Hitzebelastungstypen (rechts)	22
Abbildung 4: Prinzip der Stadtklimamodellierungen mit FITNAH und Auswertungsschritte	23
Abbildung 5: Oberflächentemperatur im Tagesverlauf	24
Abbildung 6: Übersicht MUTABOR Szenarien	26
Abbildung 7: Im Projekt verwendete FITNAH-Landnutzungsklassen	27
Abbildung 8: Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) um 14 Uhr in 1,1 m über Grund für eine hochsommerliche Wetter-lage im Jahr 2035, unter Annahme des starken Klimawandels laut RCP-Szenario 8.5	28
Abbildung 9: Bioklimatische Situation von Siedlungsflächen am Tage unter Annahme des starken Klimawandels in der Referenzrechnung 2035	29
Abbildung 10: Lufttemperatur um 4 Uhr in 2 m über Grund für eine hochsommerliche Wetterlage im Jahr 2035, unter Annahme des starken Klimawandels laut RCP-Szenario 8.5	30
Abbildung 11: Bioklimatische Situation von Siedlungsflächen in der Nacht unter Annahme des starken Klimawandels in der Referenzrechnung 2035	31
Abbildung 12: Differenz der Physiologisch Äquivalenten Temperatur um 14 Uhr des Szenarios <i>Weiter wie bisher</i> und der Referenz-Modellierung 2035	33
Abbildung 13: Bioklimatische Situation von Siedlungsflächen am Tage im Szenario <i>Weiter wie bisher</i>	34
Abbildung 14: Differenz der bodennahen Lufttemperatur um 4 Uhr des Szenarios <i>Weiter wie bisher</i> und der Referenz-Modellierung 2035	35
Abbildung 15: Bioklimatische Situation von Siedlungsflächen in der Nacht im Szenario <i>Weiter wie bisher</i>	36
Abbildung 16: Beispielhaftes Zielbild für einen Straßenraum im <i>Szenario des Technisch Machbaren</i>	38
Abbildung 17: Standardisierte Querschnitte für den fließenden Verkehr im <i>Szenario des Technisch Machbaren</i>	38
Abbildung 18: Methodik zur Ermittlung des Potenzialraums im Straßenraum	39
Abbildung 19: Beispielhaftes Zielbild für ein Flurstück im <i>Szenario des Technisch Machbaren</i>	40
Abbildung 20: Automatisierter Rückbau versiegelter Fläche auf einem Schulgelände ermöglicht Potenzialraum zur Verschattung der Gebäude und des Freiraums	40
Abbildung 21: Durchschnittliche Flächennutzungsanteile in % in Straßenräumen im Ist-Zustand und im <i>Szenario des Technisch Machbaren</i> im Vergleich	42
Abbildung 22: Durchschnittliche Flächennutzungsanteile in % auf den Flurstücken im Ist-Zustand und im <i>Szenario des Technisch Machbaren</i> im Vergleich	43
Abbildung 23: Differenz der Physiologisch Äquivalenten Temperatur um 14 Uhr des Szenarios Technisch machbar und der Referenz-Modellierung 2035	44
Abbildung 24: Bioklimatische Situation von Siedlungsflächen am Tage im Szenario Technisch machbar	44
Abbildung 25: Differenz der bodennahen Lufttemperatur um 4 Uhr des Szenarios Technisch machbar und der Referenz-Modellierung 2035	45
Abbildung 26: Bioklimatische Situation von Siedlungsflächen in der Nacht im Szenario Technisch machbar	46
Abbildung 27: Konzeptskizze Klimaoptimierte Siedlungsstruktur im Typ Gewerbe	48
Abbildung 28: Differenz der Physiologisch Äquivalenten Temperatur um 14 Uhr des Add Ons Transformationsgebiete und der Referenz-Modellierung 2035 (Typ Gewerbegebiet)	48
Abbildung 29: Differenz der bodennahen Lufttemperatur um 4 Uhr des Add Ons Transformationsgebiete und der Referenz-Modellierung 2035 (Typ Gewerbegebiet)	49
Abbildung 30: Konzeptskizze Klimaoptimierte Siedlungsstruktur im Typ Wohnen	50

Abbildung 31: Differenz der Physiologisch Äquivalenten Temperatur um 14 Uhr des Add Ons Transformationsgebiete und der Referenz-Modellierung 2035 (Typ Wohngebiet)	51
Abbildung 32: Differenz der bodennahen Lufttemperatur um 4 Uhr des Add Ons Transformationsgebiete und der Referenz-Modellierung 2035 (Typ Wohngebiet)	52
Abbildung 33: Differenz des Kaltluftvolumenstroms um 4 Uhr des Add Ons Transformationsgebiete und der Referenz-Modellierung 2035 (Typ Wohngebiet)	52
Abbildung 34: Konzeptskizze Klimaoptimierte Siedlungsstruktur im Typ Zentrum	53
Abbildung 35: Differenz der Physiologisch Äquivalenten Temperatur um 14 Uhr des Add Ons Transformationsgebiete und der Referenz-Modellierung 2035 (Typ Zentrum)	54
Abbildung 36: Differenz der bodennahen Lufttemperatur um 4 Uhr des Add Ons Transformationsgebiete und der Referenz-Modellierung 2035 (Typ Zentrum)	55
Abbildung 37: Differenz des Kaltluftvolumenstroms um 4 Uhr des Add Ons Transformationsgebiete und der Referenz-Modellierung 2035 (Typ Zentrum)	55
Abbildung 38: Systematik Klassisches Verfahren und Rückwärts-Modell.....	56
Abbildung 39: Funktionsweise des Rückwärtsnetzwerks.	57
Abbildung 40: Siedlungsgebiete mit Hitzebelastung am Tag in der Referenz 2035 (links, in orange); Siedlungsgebiete mit Hitzebelastung am Tag im <i>Szenario des Technisch Machbaren</i> (rechts, in orange).	59
Abbildung 41: Prozentuale Verteilung der Bewertungsklassen am Tage für die Siedlungs- und Verkehrsflächen der Referenz-Modellierung 2035 (links) und dem Szenario des Technisch Machbaren 2035 (rechts).....	59
Abbildung 42: Siedlungsgebiete mit Hitzebelastung in der Nacht in der Referenz 2035 (links, in rot); Siedlungsgebiete mit Hitzebelastung in der Nacht im <i>Szenario des Technisch Machbaren</i> (rechts, in rot).	60
Abbildung 43: Prozentuale Verteilung der Bewertungsklassen in der Nacht für die Siedlungs- und Verkehrsflächen der Referenz-Modellierung 2035 (links) und dem Szenario des Technisch Machbaren 2035 (rechts).....	60
Abbildung 44: Siedlungsgebiete mit Hitzebelastung am Tag in der Referenz 2035 (links, in orange); Siedlungsgebiete mit Hitzebelastung am Tag im Szenario <i>Weiter wie bisher</i> (rechts, in rot).....	61
Abbildung 45: Prozentuale Verteilung der Bewertungsklassen in der Nacht für die Siedlungs- und Verkehrsflächen der Referenz-Modellierung 2035 (links oben), dem Szenario des Technisch Machbaren 2035 (rechts oben) und dem Szenario <i>Weiter wie bisher</i> 2035 (links unten).....	62
Abbildung 46: Prozentuale Verteilung der Bewertungsklassen am Tage für die Siedlungs- und Verkehrsflächen der Referenz-Modellierung 2035 (links oben), dem Szenario des Technisch Machbaren 2035 (rechts oben) und dem Szenario <i>Weiter wie bisher</i> 2035 (links unten).....	62
Abbildung 47: Differenz der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) am Tage am Beispiel der Innenstadt mit punktuell eingesetzten Maßnahmen (links) und am Beispiel des Bundesviertels mit Einsatz flächendeckender Maßnahmen (rechts) im Szenario <i>Weiter wie bisher</i> 2035	63
Abbildung 48: Die „Champions“ der Hitzevorsorge	63
Abbildung 49: Neu organisierte Straßenquerschnitte mit Verkehrsberuhigung bieten in Wohnstraßen reichlich Potenzialraum für grün-blaue Maßnahmen	64
Abbildung 50: Durchschnittlicher Potenzialraum für Hitzeminderungsmaßnahmen und klimagerechten Parkraum in Metern im Straßenraum im <i>Szenario des technisch Machbaren</i> ...65	65
Abbildung 51: Temperaturdifferenzen im <i>Szenario des Technisch Machbaren</i> nach Clustern in Siedlungsflächen.....	68
Abbildung 52: Differenz der nächtlichen Lufttemperatur und der gefühlten Temperatur am Tage am Beispiel eines Schulgeländes bei der Umsetzung von Teilentsiegelungen und Neupflanzung von Bäumen	69
Abbildung 53: Aufstockungen und Erweiterungsbauten (links, orange umrandet) sind bei Nacht (Mitte) und am Tag (rechts) durch grün-blaue Maßnahmen ausgleichbar (Temperaturdifferenz abgebildet)	70
Abbildung 54: Durchschnittliche Nutzungsänderung im Cluster Gewerbestrukturen zwischen der Ist-Nutzung (Referenz 2035) und der Nutzung im <i>Szenario des Technisch Machbaren</i>	71
Abbildung 55: Transformationskonzept für ein exemplarisches Gewerbegebiet	71

Abbildung 56: Gedrehte oder ersetzte Gebäude (in dunkelgrau) in einem Bestandswohngebiet unter Kaltluftereinfluss	72
Abbildung 57: Differenz der nächtlichen Lufttemperatur (links) und des Kaltluftvolumenstroms (rechts) nach Optimierung der Gebäudekörperstellung und Gebäudeabstände	73
Abbildung 58: Differenz der nächtlichen Lufttemperatur (mitte) und des Kaltluftvolumenstroms (rechts) nach Öffnung geschlossener Baustrukturen in Strömungsrichtung	73
Abbildung 59: Temperaturdifferenzen im <i>Szenario des Technisch Machbaren</i> nach Clustern im Straßenraum	74
Abbildung 60: Durchschnittliche Flächennutzungsanteile im Cluster „Belastete Straßen mit viel Potenzialraum/ Maßnahmen“ in der Ist-Situation und im <i>Szenario des Technisch Machbaren</i> ..	75
Abbildung 61: Die Gestaltung des Marktplatzes heute (links) und erzielte Temperaturdifferenzen unter dem <i>Szenario des Technisch Machbaren</i> in der Nacht (Mitte) und am Tag (rechts).....	76
Abbildung 62: Skizze der neugestalteten Fußgängerzone in einem Zentrumsbereich und Darstellung einer möglichen Gestaltung mit Bäumen und wassergebundenem Bodenbelag	76
Abbildung 63: Differenz der Physiologisch Äquivalenten Temperatur am Tag (links) und der nächtlichen Lufttemperatur (rechts) im Bereich der neu gestalteten Fußgängerzone in Bezug auf die Referenz-Modellierung 2035.....	76
Abbildung 64: Lockere Wohnsiedlung in Bonn heute (links) und erzielte Temperaturdifferenzen im <i>Szenario des Technisch Machbaren</i> in der Nacht (Mitte) und am Tag (rechts).	77
Abbildung 65: Begrünungsmaßnahme am Budafok-Park (3).....	81
Abbildung 66: Trinkbrunnen "Brunnhilde", Wiener Wasser/Zinner.....	82
Abbildung 67: Broschüre zum Citizen's Coolkit, Collaborative for Advanced Landscapae Planning	82
Abbildung 68: Die Fassade des Ruta N-Gebäude, Elke Mertens	83

1 Einführung – Ziel des Projekts

Steigende Temperaturen sind eine in den letzten Jahren zunehmend beobachtete Klimaentwicklung geworden. In Bonn sind die Folgen des Klimawandels bereits heute spürbar. 2022 wurde mit 12,2 °C die höchste Jahresmitteltemperatur seit Beginn der Messungen 1881 verzeichnet (Klimaatlas NRW). Auch mit der Anzahl der heißen Tage, die eine Temperatur von mehr als 30 °C aufweisen, lag das Jahr 2022 mit 19,5 nur knapp unter dem Hitzesommer 2003 (Klimaatlas NRW). Die zunehmende Häufigkeit der Hitzesommer gerade in den letzten zehn Jahren verdeutlicht, dass eine ausreichende Hitzevorsorge durch Kommunen immer drängender wird.

Die Stadt Bonn hat 2018 eine Stadtklimaanalyse im Rahmen des geförderten Projekts ZURES (Zukunftsorientierte Vulnerabilitäts- und Risikoanalysen als Instrument zur Förderung der Resilienz von Städten und urbanen Infrastrukturen) durchführen lassen, in der die Handlungsprioritäten im Bereich Hitze in hoher Auflösung dargestellt wurden. Basierend auf dieser Analyse, wurde eine Planungshinweiskarte erstellt, aus der eine Bewertung der Hitzebelastung in den Siedlungsräumen sowie der Klimafunktion der Grün- und Freiflächen ablesbar ist. Zudem gibt die Karte planerisch relevante Hinweise, z.B. zur Verbesserung der Durchlüftung oder zur Erhöhung des Vegetationsanteils.

Mit den ermittelten Handlungsprioritäten konnte identifiziert werden, welche Orte in Bonn besonders stark von Hitzeentwicklungen betroffen sind. Welches Anpassungspotenzial in den jeweiligen Bereichen steckt, konnte durch die Stadtklimaanalyse allerdings nicht ermittelt werden. Um die Möglichkeiten zur Umsetzung von Maßnahmen der Hitzevorsorge innerhalb des Stadtgebiet Bonns zu erfassen, wurde daher anschließend an ZURES das Folgeprojekt MUTABOR (Mikroskalige Untersuchung und Aktivierung der technischen und planerischen Anpassungskapazität der Stadt Bonn zur Reduktion des Hitzestresses) im Rahmen des DAS-Förderprogramms des Bundesumweltministeriums durchgeführt. Mit einer möglichst genauen Ermittlung des Anpassungspotenzials wurde ein Maßnahmenkatalog erstellt, welcher geeignete Maßnahmen aus unterschiedlichen Bereichen der Hitzevorsorge gliedert. In einem weiteren Schritt wurde aufbauend auf der Potenzialermittlung eine gesamtstädtische mikroskalige Modellierung des möglichen Kühleffekts bei Realisierung der identifizierten Maßnahmen berechnet.

Der vorliegende Abschlussbericht gliedert sich in den Maßnahmenkatalog (Kap. 2), eine kurze Zusammenfassung der Methodik (Kap.3) und die ausführliche Darstellung der Szenarien mit ihren Potenzialermittlungen und Klimamodellierungsergebnissen (Kap. 4).

Aus den ermittelten Ergebnissen konnten aussagekräftige Erkenntnisse zu besonders effektiven Maßnahmenkombinationen, Handlungsmöglichkeiten aber auch -begrenzungen und zu den Einflussmöglichkeiten verschiedener Akteur*innen gewonnen werden (Kap. 5). Ein umfassender Katalog zu handlungsorientierten Empfehlungen aus den Bereichen der Bestandsentwicklung, des Neubaus und der Nachverdichtung, als auch zur Stärkung von grün-blauer Infrastruktur lässt sich nicht nur auf das Gebiet der Stadt Bonn beziehen, sondern in ihrer Kernaussage auch auf andere Kommunen ableiten (Kap. 6).

Wichtig ist jedoch, dass die Erkenntnisse für die Hitzevorsorge auch in die Umsetzung kommen. Hierzu führt die Stadt Bonn selbst bereits einige Projekte durch (Kap. 7), doch auch international finden sich vielseitige Good-Practice-Beispiele, die im Kontext einer hitzeresilienten Stadt agieren (Kap. 8).

Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus MUTABOR werden im Rahmen der Erstellung eines integrierten Klimaanpassungskonzepts für Bonn aufgenommen und weiterentwickelt.

2 Maßnahmenkatalog zur Hitzeanpassung

2.1 Gesamtkatalog

Die Anpassung an den Klimawandel mit Fokus auf Hitzereduktion kann über lokale Anpassungsmaßnahmen erfolgen. Die Maßnahmen reduzieren die Hitzebelastung über fünf verschiedene Wirkungspfade (Abbildung 1): Verschattung reduziert die Sonneneinstrahlung und die Aufnahme von Wärmeenergie. Die Erhöhung des Grünvolumens, der Wasserspeicherung und Verdunstung ermöglicht der Stadt sich aus sich selbst heraus zu kühlen. Eine verbesserte Durchlüftung der Stadt vermindert Wärmestau und ermöglicht eine nächtliche Abkühlung durch Kaltluftprozesse. Ausgewählte Materialien reduzieren die Aufnahme von Wärmeenergie und somit auch die nächtliche Wärmeabgabe. Zudem gilt es anthropogene Wärmeeinträge möglichst zu reduzieren. In der Klimaanpassung sind auch strategische und strukturelle Maßnahmen (bspw. ein Hitzeaktionsplan der Gesundheitsvorsorge) von Nöten, spielen in diesem Projekt allerdings keine Rolle.



Abbildung 1: Maßnahmenübersicht nach Wirkungspfaden

Die Wirkungspfade mit ihren untergeordneten Maßnahmenkategorien werden in Maßnahmenbausteine aufgeteilt. Diese werden nach drei Kategorien aufgeteilt: Eine Vielzahl der Maßnahmenbausteine wirkt sich direkt auf die Außentemperatur aus, welche jeweils bodennah für die Nacht und als gefühlte Temperatur für den Tag modelliert wird. Sind diese Maßnahmenbausteine geeignet für die hier durchgeführte halbautomatisierte Potenzialermittlung, werden sie in die Forschungsszenarien integriert (Kap. 2.2). Ist eine Potenzialermittlung aufgrund eingeschränkter Datenverfügbarkeit nicht möglich, werden sie nur im Maßnahmenkatalog als Add-On-Maßnahme gelistet. Ebenso gibt es zahlreiche sinnvolle Maßnahmen, die allerdings keine Auswirkung auf die hier modellierten Klimaparameter besitzen; auch diese werden als Add-On-Maßnahmen aufgenommen (Kap. 2.3) und ihre Einsatzmöglichkeiten nur qualitativ beschrieben.

Erläuterung Maßnahmensteckbriefe: Die kurzen Steckbriefe geben zur Systematisierung den Wirkungspfad und die Umsetzungsgruppe (Grüne / Blaue / Gebäudebezogene / Materialienbezogene / Mobilitäts-Maßnahme) an. Die Kühlwirkung (Tag und / oder Nacht) wird über zwei Piktogramme dargestellt. Die Verwendung innerhalb des Forschungsprojektes wird unterschieden nach „modellierbar“ (Maßnahme fließt in Potenzialermittlung und Klimamodellierung ein) und „Add-On“ (die Möglichkeiten der Maßnahme werden nur beschrieben).

2.2 Maßnahmen der Potenzialermittlung

Der folgende Maßnahmenkatalog beschreibt alle Maßnahmen, die in die Potenzialermittlung der Szenarien eingeflossen sind.¹



Grüne Maßnahme

Verschattung durch Vegetation

Stadtbäume

Was ist damit gemeint?
 Stadtbäume sind die mitunter wirksamste Maßnahme am Tag. Durch Schattenwurf und Evapotranspiration sind sie eine effektive Maßnahme zur Luftkühlung sowie zur Verringerung der Überhitzung von Straßen- und Wegeflächen, Plätzen und Grünräumen.

Kühlwirkung insbesondere




modellierbar / Add-On






Beschattete Wohnstraße in Basel (1)



Gebäudebezogene Maßnahme
Grüne Maßnahme

Begrünung

Dachbegrünung

Was ist damit gemeint?
 Dachbegrünung kann eine Entlastungsfunktion übernehmen, indem die Wärmeaufnahme der Dachflächen gemindert und die Wasserspeicherkapazität erhöht wird. Die entlastende Wirkung kommt v.a. bei intensiver Begrünung bis hin zu Urban Wetlands und Nutzung des Dachs als Aufenthaltsfläche zum Tragen.

Kühlwirkung insbesondere




modellierbar / Add-On






Kleinteilige Dachbegrünung auf Wohngebäuden (Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e.V)

¹ Bildquellen entsprechend Abbildungsunterschrift (1) berchtoldkrass space&options, (2) GEO-NET, (3) Stadt Bonn, anderweitige direkt angeben.



Gebäudebezogene
Maßnahme

Grüne Maßnahme

Begrünung

Fassadenbegrünung

Was ist damit gemeint?
Das schattenwerfende Blattwerk, die Luftschicht zwischen Vegetation und Hauswand sowie Evapotranspiration verringern die Wärmeaufnahme und die Oberflächentemperatur der Gebäudehülle. Dies erhöht den thermischen Komfort im angrenzenden Außenbereich und Gebäudeinneren.

Kühlwirkung insbesondere




modellierbar / Add-On






Fassadenbegrünung eines Parkhauses (Quelle: Bundesverband GebäudeGrün e.V)



Grüne Maßnahme

Begrünung

Klimawirksame Begrünung von Freiflächen

Was ist damit gemeint?
Eine optimal klimawirksam begrünte Freifläche stellt tagsüber schattige kühle Aufenthaltsbereiche zur Verfügung und ermöglicht gleichzeitig nachts eine maximale Produktion von Kaltluft, die wiederum in die angrenzenden Siedlungsbereiche eindringen kann.

Kühlwirkung insbesondere




modellierbar / Add-On






Beispiel einer mikroklimatisch vielfältigen Grünfläche in Baden-Baden (1)



Blaue Maßnahme

Grüne Maßnahme

Speicherung Regenwasser und Bewässerungssysteme

Versickerungs- / Verdunstungsflächen

Was ist damit gemeint?
Dezentrale Entwässerungssysteme bieten die Möglichkeit, das anfallende Regenwasser zu sammeln, kontrolliert zwischenspeichern, zu versickern und über die Vegetation zu verdunsten. In Trockenphasen ist eine multifunktionale Nutzung als Grünanlage möglich.

Kühlwirkung insbesondere




modellierbar / Add-On






Muldenversickerung in einem Wohngebiet in Karlsruhe (1)



Entsiegelung

(Halb-)durchlässige Bodenoberflächen

Was ist damit gemeint?
 (Halb-)durchlässige Bodenoberflächen eignen sich dort, wo eine vollständige Entsiegelung nicht möglich aber Vollversiegelung nicht nötig ist. Sie erhöhen die Fähigkeit zur Versickerung oder Zwischenspeicherung mit anschließender Verdunstung von Regenwasser sowie eine mögliche Evapotranspiration bei Teilbegrünung.

Kühlwirkung insbesondere **modellierbar / Add-On**









Wassergebundener Schotterbelag, Baden-Baden und Rasengittersteine, Freising (1)



Entsiegelung

Entsiegelung

Was ist damit gemeint?
 Die Entsiegelung von Oberflächen schafft Raum für Begrünung. Diese bewirkt sowohl durch die Verdunstung von Bodenfeuchtigkeit als auch durch die Transpiration der Pflanzen eine Kühlung der Luft. Zudem verbessern entsiegelte Flächen die Wasserspeicherkapazität der Böden.

Kühlwirkung insbesondere **modellierbar / Add-On**








Entsiegelung und Begrünung innerstädtischer Platzflächen, Mainz (1)



Speicherung Regenwasser und Bewässerungssysteme

Speicherung von Regenwasser und Nutzung zur Bewässerung

Was ist damit gemeint?
 Durch integrierte Bewässerungssysteme lässt sich Regenwasser von Dächern und Straßen sammeln und speichern und steht in Trockenphasen zur Bewässerung der Vegetation zur Verfügung. Eine ausreichende Wasserversorgung der Vegetation ist entscheidend für die Entfaltung ihrer bioklimatischen Kühlwirkung.

Kühlwirkung insbesondere **modellierbar / Add-On**








Prinzipskizze der Regenwassernutzung zur Bewässerung (1)



Reduktion / Anpassung Mobilität

Reduktion Parkplätze

Was ist damit gemeint?
Die Reduktion von Parkplatzflächen wirkt doppelt positiv: zum einen durch sich weniger erhaltenden ruhenden Verkehr im Straßenraum, zum anderen durch die Möglichkeit versiegelte Flächen in begrünte klimaaktive Bereiche mit Aufenthaltsqualität umzubauen.

Kühlwirkung insbesondere **modellierbar / Add-On**






Mobilitätsmaßnahme



Reduktion von Parkplätzen in Erlangen; idealerweise Pflanzung von Bäumen auf Rasen (1)



Reduktion / Anpassung Mobilität

Reduktion Fahrspuren

Was ist damit gemeint?
Die Reduktion von Fahrspuren wirkt doppelt positiv: zum einen durch die Reduktion des motorisierten Individualverkehrs, zum anderen durch die Möglichkeit des Umbaus versiegelter Flächen in begrünte Bereiche oder Fahrspuren für den Langsamverkehr.

Kühlwirkung insbesondere **modellierbar / Add-On**






Mobilitätsmaßnahme



Flächensparende Wohnstraßenerschießung in Karlsruhe (1)



Reduktion / Anpassung Mobilität

Zukunftstaugliche Anpassung Mobilitätsmix

Was ist damit gemeint?
Veränderung von Menge, Geschwindigkeit und Zusammensetzung der Mobilitätsanteile zu Gunsten platzsparender und umweltfreundlicher Alternativen sowie Verkehrsarten mit geringerer Wärmeemission.

Kühlwirkung insbesondere **modellierbar / Add-On**



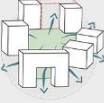



Mobilitätsmaßnahme



Verkehrsberuhigung ermöglicht platzsparende Straßengestaltung in Karlsruhe (1)

Die folgenden Maßnahmen wurden ausschließlich in das Zusatzszenario „Transformationsgebiete“ integriert (weitere Infos dazu siehe Kap. 4.3.4).




Gebäudebezogene
Maßnahme

Optimierung der Gebäudetypologie / -stellung für Luftaustausch



Optimale Ausrichtung der Gebäudestellung

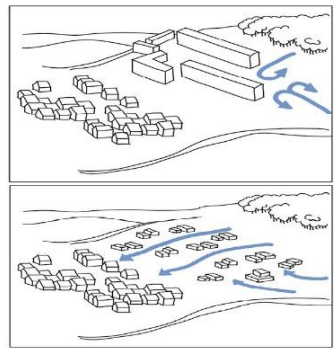
Was ist damit gemeint?
Die Übergänge zwischen (innerstädtischen) Freiflächen und umliegender Bebauung sollten möglichst offen gestaltet sein. Ebenso muss die Gebäudestellung am Siedlungsrand den Kaltluftaustausch fördern.

Kühlwirkung insbesondere

modellierbar / Add-On



Durchströmbare Gebäudekubaturen ermöglichen Kaltluftabfluss in Siedlungskörper (1)



Gebäudebezogene
Maßnahme

Optimierung der Gebäudetypologie / -stellung für Luftaustausch

Verwendung klimaaktiver Gebäudetypologie

Was ist damit gemeint?
Ein reduzierter Gebäude-Footprint, innovative strömungsdurchlässige Baukubaturen sowie ein erhöhter Anteil an Durchgrünung ermöglichen bessere Kaltluftaustauschprozesse im Siedlungsbestand.

Kühlwirkung insbesondere




modellierbar / Add-On






Prinzipische Skizze klimaaktive Gebäudetypologie (1)



Blaue Maßnahme

Bewegte Wasserelemente

Entwicklung von Teichen / Entdolung von Bächen

Was ist damit gemeint?
Wasser, insbesondere bewegtes, entzieht tagsüber der umgebenden Luft Wärmeenergie bei Verdunstung, kühlt diese ab und verbessert dadurch das Mikroklima. Eine zusätzliche Wirkung entfalten zugängliche städtische Wasserflächen durch ihre Nutzbarkeit als Entlastungsraum.

Kühlwirkung insbesondere




modellierbar / Add-On






Urbaner Teich am Potsdamer Platz, Berlin (2)

2.3 Add-On-Maßnahmen

Der folgende Maßnahmenkatalog beschreibt zum einen Maßnahmen, die trotz Wirkung auf die Außentemperatur nicht in die Potenzialermittlung der Szenarien eingeflossen sind. Dies hat in der Regel zwei Gründe: Das verwendete Modell der Klimaanalyse kann die Maßnahme nicht hinreichend abbilden (bspw. Verschattung durch Sonnensegel im Außenbereich) oder es besteht keine ausreichende Geodatengrundlage zur Potenzialermittlung einer Maßnahme (bspw. fehlt zur Potenzialermittlung der Albedo bei Fassadenmaterialien die Referenzwerte der Ist-Situation).

In den Kapiteln zu Erkenntnissen (Kap. 5) und Empfehlungen (Kap. 6) werden die hier genannten Maßnahmen nochmals aufgegriffen und ihr sinnvoller Einsatz aufgezeigt.



Verschattung durch Vegetation

Begrünte Pergolen

Was ist damit gemeint?
Pergolen sind bewachsene Rankgerüste. Sie kombinieren die Vorteile der technischen Verschattung mit dem zusätzlichen Kühleffekt durch Vegetation. Vorteilhaft sind sie besonders dort, wo Baumpflanzungen bspw. wegen geringer Bodentiefe nicht möglich sind (z.B. Dachgarten, Tiefgarage).

Kühlwirkung insbesondere **modellierbar / Add-On**






Grüne Maßnahme



Verschattung durch Pergolen, MFO Park in Zürich (1)



Technische Verschattung

Sonnensegel / Markisen

Was ist damit gemeint?
Techn. Verschattung ist besonders geeignet, wenn eine Verschattung durch Vegetation bspw. aus Platzgründen nicht möglich ist. An Gebäuden reduziert sie den Wärmeeintrag ins Innere. Im Außenbereich reduziert sie die Aufheizung der Aufenthaltsbereiche und Oberflächen.

Kühlwirkung insbesondere **modellierbar / Add-On**







Gebäudebezogene Maßnahme



Technische Verschattung im Freiraum in Basel (1)



Grüne Maßnahme

Begrünung

Klimawirksame Begrünung von landwirtsch. Flächen


Was ist damit gemeint?
 Die Kaltluftproduktionsrate einer Freifläche ist maßgeblich von ihrer Vegetationsbedeckung abhängig. So führen Weiden und in den Sommermonaten mit grüner Biomasse bestellte Ackerflächen am Siedlungsrand zu einer vermehrten Abkühlung als bspw. abgeerntete trockene Getreideäcker.

Kühlwirkung insbesondere



modellierbar / Add-On





Geringere Erwärmung am Tag auf Streuobstwiese als auf Stoppelfeld (1)



Materialienbezogene Maßnahme

Entsiegelung

Innovative Materialien für Straßenbeläge

Was ist damit gemeint?
 Innovative Straßenbeläge weisen neben verbesserten Albedowerten auch eine Speicher- und Versickerungsfähigkeit auf - bei gleichzeitiger hoher Nutzungsqualität für den Verkehr. Diese Maßnahme ist v.a. an Orten geeignet, für die keine teilentsiegelten Bodenoberflächen in Frage kommen.

Kühlwirkung insbesondere



modellierbar / Add-On





Prinzipskizze versickerungsfähiger Bodenbelag mit hoher Albedo (1)



Blaue Maßnahme

Bewegte Wasserelemente

Sprühnebel / Vertikale Wasserläufe / kl. Wasseranlagen

Was ist damit gemeint?
 Bewegtes Wasser entzieht aufgrund der großen verdunstungsfähigen Oberfläche der umgebenden Luft Wärmeenergie und kühlt sie dabei ab. Dies steigert die Entlastungsfunktion öffentlicher Plätze, bspw. durch klassische Brunnen oder Vernebelungsanlagen, die an vielen Orten einsetzbar sind (z.B. Haltestellen).

Kühlwirkung insbesondere



modellierbar / Add-On





Bewegtes Wasserspiel in Parkanlage, Kaiserslautern (1)



Gebäudebezogene
Maßnahme

Verschattung durch Baukörper

Optimierung der Baukörper für Schattenwurf

Was ist damit gemeint?
 Unter Berücksichtigung ausreichender Lichtverhältnisse in den Wintermonaten können Freiräume durch eine gezielte Ausrichtung oder Konstruktion der Gebäude verschattet werden und die Aufenthaltsqualität in den Mittags- und Abendstunden erhöht werden.
 Bsp.: Dachkonstruktion über Kita-Außengelände

Kühlwirkung insbesondere **modellierbar / Add-On**








Prinzipialskizze Verschattung durch Gebäude (1)



Materialienbezogene
Maßnahme

Verwendung von Materialien mit hoher Albedo / geringer Wärmespeicherkapazität

Hohe Albedo bei Bodenbelägen

Was ist damit gemeint?
 Materialien mit hohem Rückstrahlungsvermögen (Albedo) speichern in deutlich geringerem Maße die Energie aus der Sonneneinstrahlung und geben somit weniger langwellige Wärmestrahlung an die umgebende Luft ab.
 Bsp.: helle Bodenmaterialien/ helle Anstriche für Fahrbahnen

Kühlwirkung insbesondere **modellierbar / Add-On**








Helle Bodenmaterialien auf begehbarem Dach in Oslo (1)



Gebäudebezogene
Maßnahme

Verwendung von Materialien mit hoher Albedo / geringer Wärmespeicherkapazität

Hohe Albedo bei Dachmaterialien

Was ist damit gemeint?
 Materialien mit hohem Rückstrahlungsvermögen (Albedo) wirken positiv auf die Wärmeaufnahme des Materials und die umliegende Lufttemperatur. Hierbei sind helle Dachmaterialien, aber auch Dachbegrünungen und PV-Anlagen einfachen dunklen Dachbedeckungen vorzuziehen.

Kühlwirkung insbesondere **modellierbar / Add-On**








Hohe Albedo durch weißes Dach an einem Gebäude in Ulm (2)



Gebäudebezogene
Maßnahme

Verwendung von Materialien mit hoher Albedo / geringer Wärmespeicherkapazität

Hohe Albedo bei Fassadenmaterialien

Was ist damit gemeint?
 Materialien mit hoher Albedo (Rückstrahlvermögen) wirken positiv auf die Wärmeaufnahme des Materials und die umliegende Lufttemperatur. Geeignete Fassadenmaterialien speichern weniger Energie und geben insbesondere nachts weniger Wärme an die Umgebung und das Gebäudeinnere ab.

Kühlwirkung insbesondere





modellierbar / Add-On






Weiße Fassade am Haus der Bildung in Bonn (3)





Gebäudebezogene
Maßnahme

Gebäudekühlung / Gebäudeisolation / Nutzung von Prozessabwärme



Technisch effiziente Gebäudekühlung

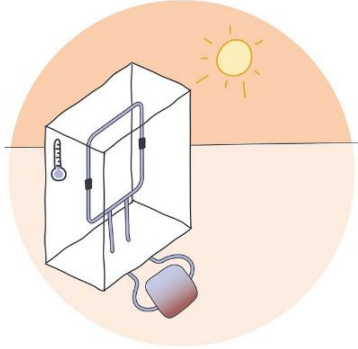
Was ist damit gemeint?
 Technisch effiziente Gebäudekühlung dient der ressourcenschonenden Reduktion der Wärmebelastung in Innenräumen, in denen passive Maßnahmen nicht ausreichend angewandt werden können.
 Bsp.: Erdkältenutzung, adiabate Abluftkühlung sowie Adsorptionskältemaschinen

Kühlwirkung insbesondere

modellierbar / Add-On



Prinzipskizze Gebäudekühlung über Erdkältenutzung (1)



Gebäudebezogene
Maßnahme

Gebäudekühlung / Gebäudeisolation / Nutzung von Prozessabwärme

Energetische Sanierung und Dämmung

Was ist damit gemeint?
 Die energetische Gebäudesanierung dient in erster Linie der Reduktion des (Heiz-)Energiebedarfs. Allerdings führen die gängigen Dämmmaterialien auch zu einer Reduktion des Wärmedurchgangs von außen nach innen.
 Bsp.: Dämmung Außenwand, Dach, Fenstersanierung

Kühlwirkung insbesondere

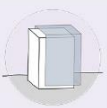



modellierbar / Add-On






Dämmung und Aufstockung eines Zeilengebäudes in Karlsruhe (1)



Gebäudekühlung / Gebäudeisolation / Nutzung von Prozessabwärme

Nutzung von Prozessabwärme

Was ist damit gemeint?

Entstehende anthropogene Prozessabwärme kann effizient für vorhandene Wärmebedarfe genutzt werden und dadurch in geringerem Maße zur Erwärmung der Umgebungstemperatur beitragen.

Bsp.: Abwärme IT-Technik für Warmwasseraufbereitung

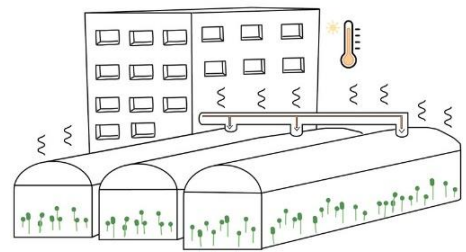
Kühlwirkung insbesondere



modellierbar / Add-On



Gebäudebezogene
Maßnahme



Prinzipialskizze IT-Abwärme-Nutzung für Gartenbau unter Glas (1)

3 Methodik der Potenzialermittlung und Klimawirkungsanalyse

Methodischer Grundbaustein von MUTABOR ist es, das gesamtstädtische Potenzial an Maßnahmen zur Hitzereduktion im Siedlungsbestand zu ermitteln, die Maßnahmen lokal zu verorten und für das daraus resultierende Szenario eine Klimawirkungsanalyse durchzuführen. Somit kann die Wirkung der Maßnahmen auf die Hitzeminderung direkt prognostiziert werden. Dieser methodische Dreiklang aus Potentialermittlung, Verortung und Klimamodellierung wird für zwei unterschiedliche gesamtstädtische Szenarien und ein weiteres teilräumliches Szenario durchgeführt (siehe Kap. 4).

3.1 Basiswissen zur Methodik der Potenzialermittlung

Der gesamtstädtische und gleichzeitig Flurstücks-scharfe Ansatz der Potentialermittlung und Verortung fordert eine teilautomatisierte und geodatenbasierte Herangehensweise. Es findet keine klassische «analoge» Potenzialkartierung statt, bei der individuell die Bedingungen auf jedem Flurstück betrachtet werden. Das individuelle analoge Vorgehen wird durch sogenannte Denkalgorithmen und deren geodatenbasierte Umsetzung ersetzt. Denkalgorithmen übersetzten Ansätze der Stadtentwicklung in eine geodatenbasierte Sprache, sodass über Entscheidungspfade die Potenzialermittlung teilautomatisiert umgesetzt werden kann. Dies ist ein gänzlich neuer Untersuchungsansatz.

Ziel der Methodik ist es, dass für jeden räumlichen Baustein der Stadt Bonn, aufgegliedert nach dem Gebäudebestand, den Flurstücken und separat den Straßenräumen, individuell das Hitzeminderungspotenzial für ein spezifisches Szenario ermittelt wird. Über die Klimamodellierung kann die Wirkung des Maßnahmenmix räumlich detailliert ermittelt werden. Größere Neubautentwicklungen stehen nicht im Fokus, von Interesse ist die Anpassung des Siedlungsbestandes an den Klimawandel.

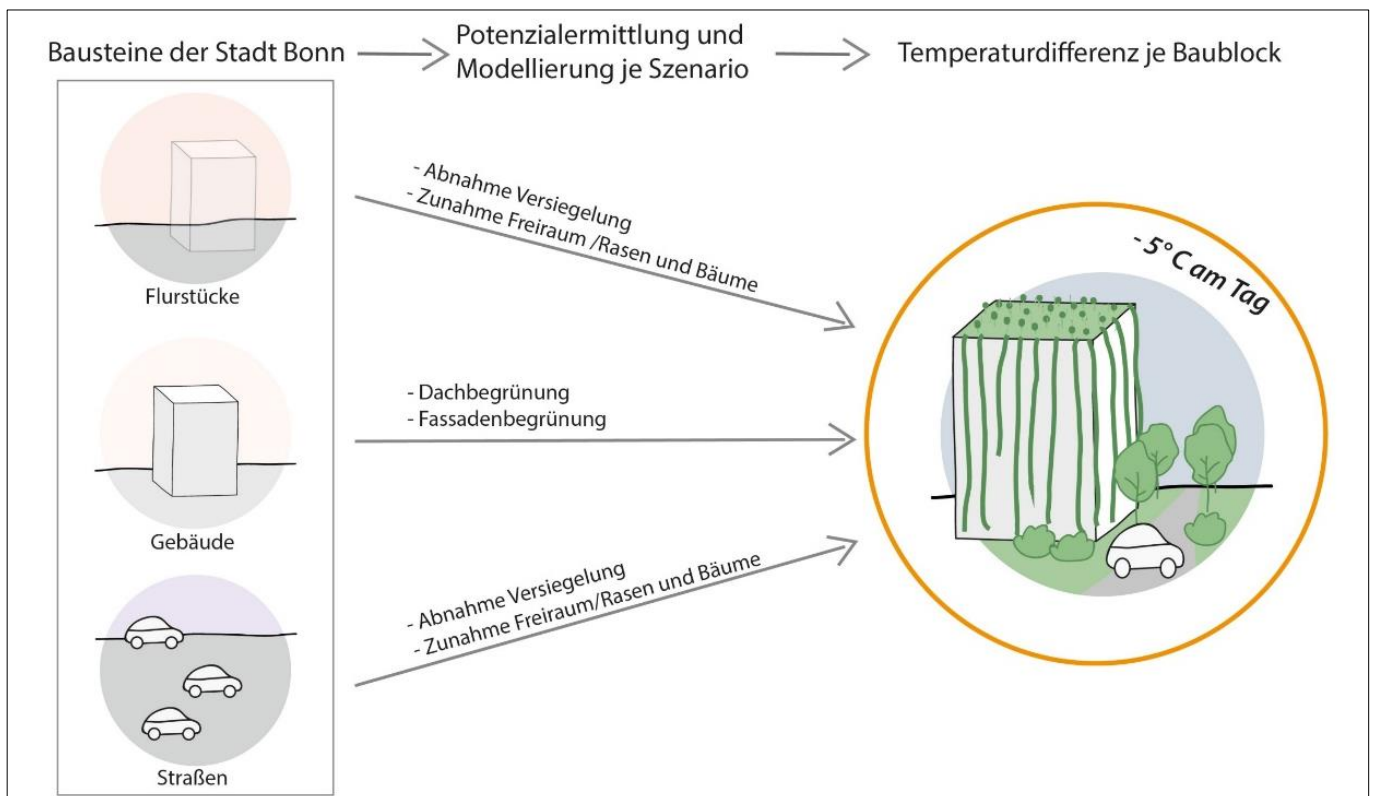


Abbildung 2: Grundidee Methodik Potenzialermittlung und Klimawirkungsanalyse

Die Methodik der Potenzialermittlung durch Denkalgorithmen ist in erster Linie durch die Verfügbarkeit und Qualität von Geodaten zur aktuellen Nutzung des Raumes beschränkt. Je mehr die Qualität der Geodaten einem «Digitalen Zwilling» entspricht, desto genauere Ergebnisse können die Denkalgorithmen liefern. Bspw. ist die Geoinformation über derzeitige Versiegelung auf Wohngrundstücken Voraussetzung zur Ermittlung des Entsiegelungspotenzials oder die Information über Parkplätze im Straßenraum für die Ermittlung eines Reduktionspotenzials. Da nur eine gesamtstädtische Potenzialermittlung zielführend für die Klimawirkungsanalyse ist, wird auf Denkalgorithmen verzichtet, die zwar sehr detaillierte Ergebnisse liefern könnten, dies aber aufgrund der Geodatenverfügbarkeit oder Notwendigkeit von vorab händischer Kartierung bestimmter Nutzungen nur für kleinräumige Teilbereiche der Stadt Bonn umsetzbar wäre. Trotz des Flurstückscharfen Ansatzes handelt es sich bei der Potentialermittlung nicht um ein „Freiraumplanungstool“, welches auf den Quadratmeter genaue geeignete Standorte für bspw. eine Baumpflanzung ermittelt. Dies wäre zum einen im gesamtstädtischen Maßstab eine enorme Herausforderung, zum anderen ist für die Rasterauflösung der Klimawirkungsanalyse von 5 x 5 Metern die Menge an Maßnahmen je Flurstück relevanter als der ganz konkrete Standort.

Die Auswahl der Hitzeminderungsmaßnahmen zur Integration in die Potenzialermittlung ist demnach eine fachlich-methodische Entscheidung. Wo und in welcher Menge diese Maßnahmen in einem bestimmten Szenario umgesetzt werden, ist eine planerisch-politische Entscheidung. Denn die Frage nach bspw. der notwendigen Anzahl an Parkplätzen in einem bestimmten Straßenabschnitt ist eine politische Entscheidung, keine technische und abhängig vom politischen Willen zur Mobilitätswende.

Es ist nicht möglich für jede Maßnahme eine isolierte Potenzialermittlung für gute Orte in der gesamten Stadt durchzuführen. Denn an einem bestimmten Ort sind oft mehrere Anpassungsmaßnahmen möglich und durch ihre herbeigeführten Wirkungen auch sinnvoll. Die Maßnahmen konkurrieren in gewisser Maße untereinander um die möglichen Orte der Umsetzung. Gleichzeitig konkurrieren die Klimaanpassungsmaßnahmen auch noch mit Maßnahmen der Innenentwicklung und des Klimaschutzes um den Raumbedarf. Das bedeutet, es müssen alle Klimaanpassungsmaßnahmen gemeinsam betrachtet und dabei eine gute Priorisierung zwischen den Maßnahmen gefunden werden.

Die Maßnahmen werden wie folgt gruppiert. Für jede Gruppe wird eine spezifische Methodik der Potenzialermittlung angewendet:

- Gebäudegebundene Maßnahmen (Dach- und Fassadenbegrünung): keine Konkurrenz untereinander und zu anderen Maßnahmen der Potenzialermittlung
- Potenzialraum-schaffende Maßnahmen (Entsiegelung, Reduktion Parkplätze und Fahrspuren; Anpassung Mobilität): diese Maßnahmen schaffen Potenzialraum für nachfolgende Maßnahmen wie Rasen- / Wasserflächen oder Bäume
- Potenzialraum-nutzende Maßnahmen (bspw. Bäume, Rasenflächen, Versickerungsflächen): diese Maßnahmen nutzen bestehende Freiräume sowie neu geschaffene Potenzialräume
- Stadtentwicklungsmaßnahmen (bspw. Gebäudetypologie, Ausrichtung): diese Maßnahmen werden nur teilräumlich im Szenario „Transformationsgebiete“ umgesetzt, da sie einen Eingriff in die Bestandsituation bedeuten.

Grundlegende Siedlungscharakterisierung:

Die teilautomatisierte Methodik der Denkalgorithmen arbeitet mit Siedlungscharakterisierung. Es wird die Annahme getroffen, dass in Gebieten mit ähnlichen Eigenschaften auf eine ähnliche Weise Klimaanpassungsmaßnahmen umgesetzt werden können.

- Stadtstrukturtypen: Die Typisierung beruht auf der Nutzung und der Kubatur der Gebäude, ihrer Anordnung zueinander und zum Straßenraum sowie auf der gebäudebezogenen Freiraumversorgung. Bsp.: Blockrandbebauung, Aufgelockerte Bebauung, institutionelle Einrichtungen, Gewerbe

- Straßenraumtypen: Die Typisierung beruht auf der Straßenhierarchie, der Lage und dem Vorhandensein von Bus oder Tram im Straßenraum. Bsp.: Zentrumsstraße, Wohnstraße ohne ÖPNV, Kreisstraße
- Hitzebelastungstyp: Die Typisierung beruht auf der Bewertung einer aktuellen Klimawirkungsanalyse. Aus der Kombination von drei Belastungsstufen am Tag (sehr hoch / hoch/ mittel) und drei Belastungsstufen in der Nacht ergeben sich durch Kombination 9 Belastungsstufen für die Siedlungsgebiete. Abhängig der spezifischen Belastung am Tag und in der Nacht sind unterschiedliche Klimaanpassungsmaßnahmen sinnvoll.
- Entlastungsfokus: Eine optimale Verbesserung der Nachtsituation kann unter bestimmten Bedingungen nicht zusammen mit einer optimalen Verbesserung der Tagsituation erreicht werden. Um eine für die jeweilige Nutzung des Flurstücks optimale Verbesserung zu erzielen, wird der Raum nach seiner Hauptnutzung unterteilt in „Entlastungsfokus Tag“ (bspw. Schulen, Gewerbeflächen) und „Entlastungsfokus Tag und Nacht“ (bspw. Wohnen). Diese Einteilung erscheint zielführend, obwohl durch Nutzungsmischung, Homeoffice und flexibles Arbeiten eine klare Trennung der Nutzungen nicht zeitgemäß wirkt. Auch den Straßenräumen wird abhängig ihrer Frequentierung und Bedeutung für die Belüftung angrenzender Wohnräume ein Entlastungsfokus zugeordnet.

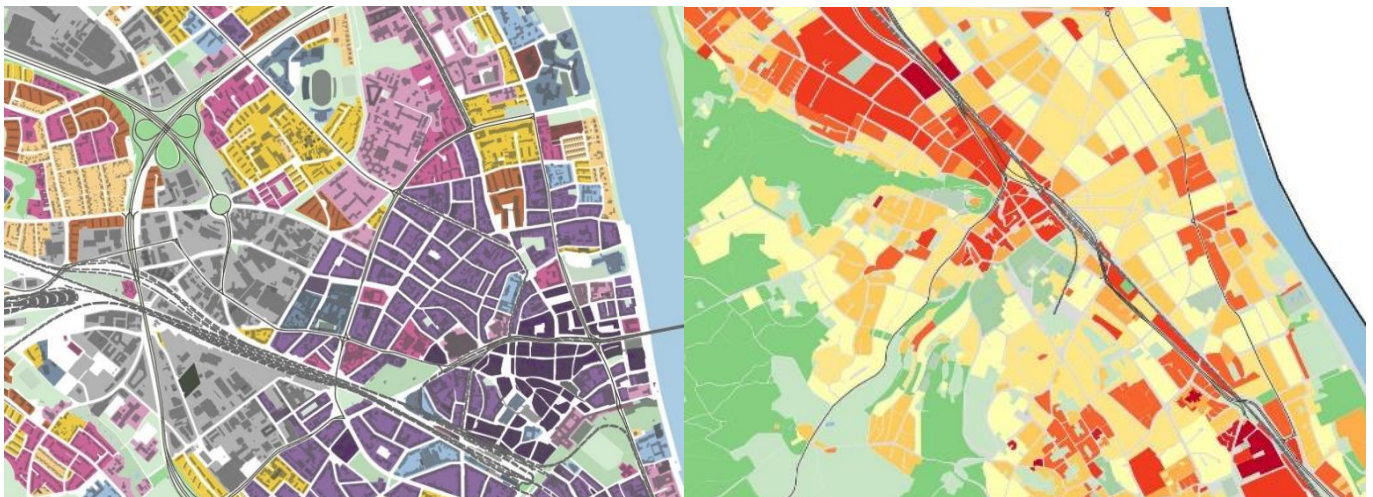


Abbildung 3: Ausschnitt Charakterisierung durch Stadtstrukturtypen (links) und Hitzebelastungstypen (rechts)

3.2 Basiswissen zur Methodik der Klimawirkungsanalyse

Für die Untersuchung der zukünftigen stadtklimatischen Situation in Bonn wird das Klimamodell FITNAH-3D (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources) verwendet. Das Untersuchungsgebiet deckt Bonn und angrenzendes Umland ab und ist in ein regelmäßiges Gitter aufgeteilt, mit einer Rasterzellengröße von jeweils 5 x 5 Meter. Für jede Rasterzelle liegen dabei Informationen über Geländehöhe, Oberflächennutzung und Versiegelungsgrad vor. Für Bäume und Baustrukturen fließt außerdem die jeweilige Höhe ein.

Den Modellrechnungen liegt ein warmer, windschwacher Sommertag mit wolkenlosem Himmel als meteorologische Rahmenbedingung zugrunde. Typischerweise führen die hohe Einstrahlung und der geringe Luftaustausch in Teilbereichen der Stadt zu hohen thermischen Belastungen. Während einer solchen Wetterlage prägen sich die lokalklimatischen Besonderheiten in Bonn besonders gut aus. Die Strömung wird durch die Ergebnisse einer überregionalen Modellierung angetrieben (Nesting).

Als Projektionszeitraum für die Referenz-Modellierung dient die Periode 2021-2050, mit 2035 als Bezugsjahr. Das Klimaänderungssignal wird entsprechend dem RCP Szenario 8.5 der vom Weltklimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) veröffentlichten Klimawandel-Sze-

Parameter simuliert. Neben den Parametern des nächtlichen Kaltlufthaushalts wie bodennahe Lufttemperatur und Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft wird für die Tagsituation auch die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) berechnet. Dieser Temperaturwert wird vor allem über die Sonneneinstrahlung beeinflusst und repräsentiert gut das Wärmeempfinden des Menschen an Tagen mit starker solarer Strahlung.

Die für jede Rasterzelle berechneten Modellergebnisse werden per räumlicher Statistik auf die verschiedenen Flächen der Siedlungsstrukturen sowie Freiräume, Plätze und Straßen übertragen. Anschließend werden diese Flächen hinsichtlich ihrer Hitze- / Wärmebelastung bewertet.

Abbildung 5 zeigt für verschiedene Oberflächennutzungen exemplarisch den Tagesgang der Lufttemperatur während hochsommerlicher Strahlungswetterlagen, als Ergebnis der Modellsimulation. Zum Vergleich stehen hier niedrige Vegetation, also natürlicher, bewachsener Boden, der unbebauten, versiegelten Fläche, beispielsweise asphaltierter Parkplätze oder Straßenoberfläche, gegenüber. Beide Klassen werden jeweils mit und ohne Baum ausgewertet.

Alle vier ausgewählten Nutzungsklassen zeigen grundsätzliche Minimalwerte in den (frühen) Nachtstunden sowie Temperaturhöchstwerte um den Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes.

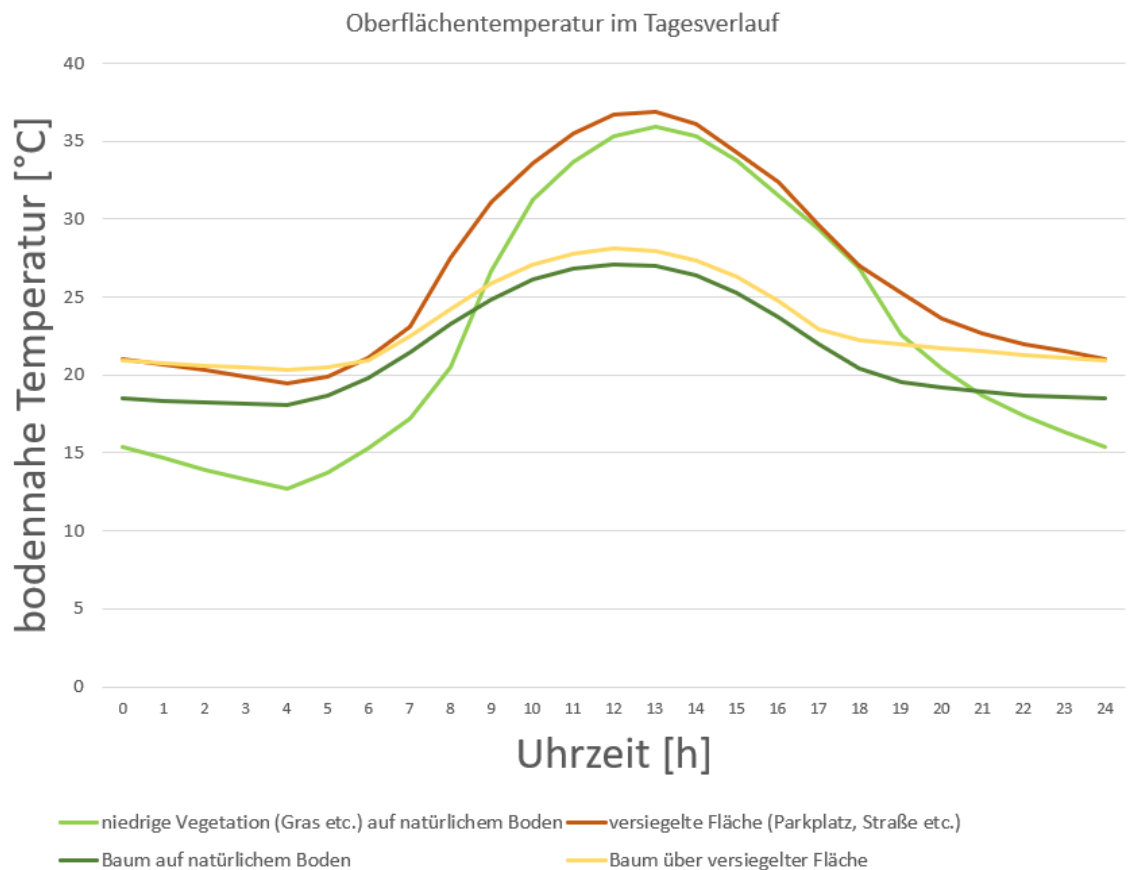


Abbildung 5: Oberflächentemperatur im Tagesverlauf

Die höchsten Oberflächentemperaturen treten im Tagesgang durchgängig an versiegelten, unbeschatteten Oberflächen auf. Materialien wie Asphalt und Beton haben die größte Wärmespeicherkapazität der hier ausgewählten Strukturen. Auf den unversiegelten Grünflächen sind die Temperaturwerte aufgrund ungehinderter Sonneneinstrahlung am Nachmittag ähnlich hoch wie über versiegelten Flächen. Tagsüber zeigen sich die niedrigsten Temperaturen an den Bodenoberflächen unter dem Baum – sowohl über Asphalt als auch über der unversiegelten Grünfläche.

Die relative Temperaturabsenkung ist insbesondere auf die verschattende Wirkung des Baumes sowie die Verdunstungskühlung zurückzuführen.

Die geringsten Oberflächentemperaturen in der Nacht werden für die niedrige Vegetation um 4:00 morgens, also kurz vor Sonnenaufgang, modelliert. Hier zeigt sich die Wirkung einer ungehinder- ten nächtlichen Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel. Nachts reduziert die Baumkrone aller- dings die Ausstrahlung und damit die Abkühlung der Oberfläche, so dass die Temperatur unter Bäumen auf versiegelter Fläche mehrere Grad über denen der grünen Freifläche und nur wenige Grad unter der unbebaut versiegelten Oberfläche liegt.

Diese idealtypischen Muster werden im gesamtstädtischen Kontext durch komplexe lokal-klima- tische Effekte (nachbarschaftliche Wirkungen, horizontale und vertikale Strömungsprozesse) überprägt und können sich somit im konkreten räumlichen Fall auch (ganz) anders darstellen. Dennoch sind die skizzierten Phänomene grundlegend für das Verständnis des Modells und sei- ner Ergebnisse.

4 Szenarien der Hitzeanpassung 2035

Die Stadt Bonn kann sich bis zum Jahr 2035 und darüber hinaus in unterschiedlichem Maße an den Klimawandel anpassen. Diese Möglichkeitsspanne soll durch mehrere Szenarien abgedeckt werden. Die Potenzialermittlung legt die Art der Hitzeanpassung fest, die Klimawirkungsanalyse prognostiziert die Auswirkungen auf die thermische Situation. Der Prognosezeitraum ist das Jahr 2035. Bezogen auf diesen Zeitpunkt werden je Szenario die drei entscheidenden Parameter der Modellierung festgelegt:

- Stadtstruktur: Die Stadtstruktur entspricht in der Referenz dem aktuellen Gebäudebestand plus aktuell in Bau befindliche Projekte. Der Fokus des Projektes liegt auf dem Bestand, nicht auf dem Neubau.
- Klimasignal: Es wird für Referenz und Szenarien ein einheitliches starkes Klimasignal (RCP 8.5) mit mittelfristigem Zeithorizont (Klimaperiode 2021-2050) gewählt.
- Maßnahmensignal: Hitzeanpassungsmaßnahmen werden je Szenario in unterschiedlichem Maße integriert.

Die Abbildung 6 gibt eine Übersicht über die entwickelten Szenarien. Um Aussagen über die Wirkung der Maßnahmen treffen zu können, werden zwei Referenzszenarien modelliert: die aktuelle Situation im Jahr 2022 und die Referenz für das Jahr 2035. Zwei weitere Szenarien plus eine teilräumliche Ergänzung (Add-On) werden Aussagen über die Wirkung der Maßnahmen erlauben.

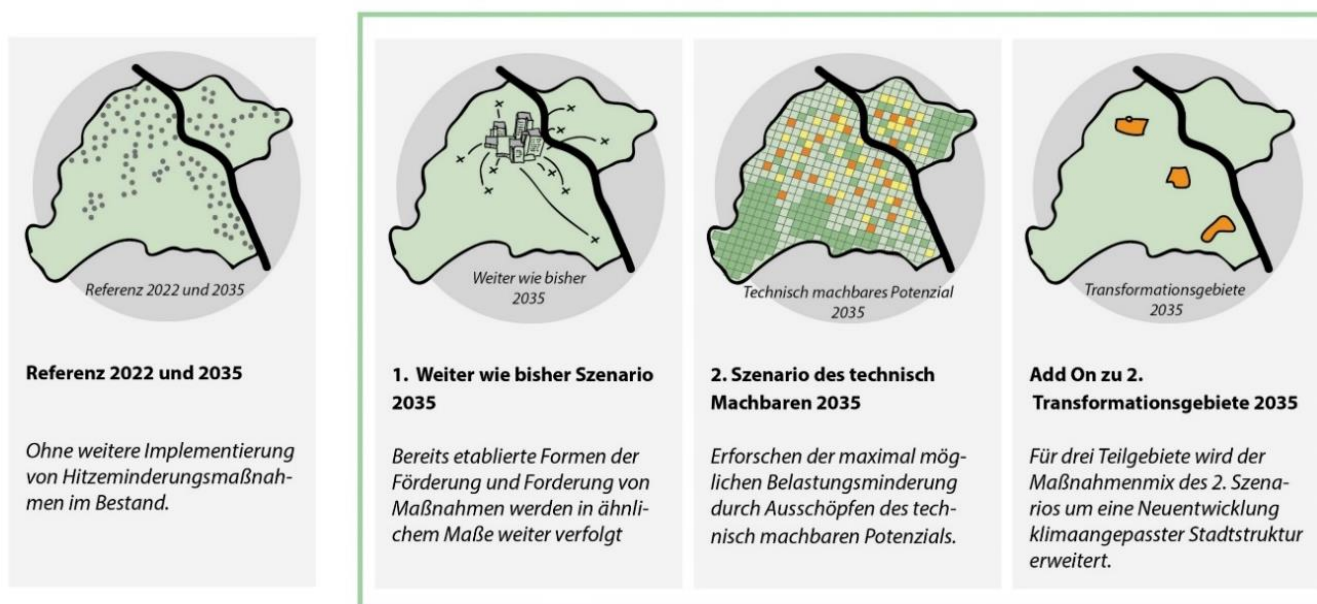


Abbildung 6: Übersicht MUTABOR Szenarien

Stadtstruktur und Klimasignal bleiben über alle Szenarien konstant. Das Maßnahmensignal unterscheidet sich je nach Szenario. Die Potenzialermittlung für das Maßnahmensignal prognostiziert im „Weiter wie bisher“-Szenario bereits etablierte Formen der Förderung und Forderung von Maßnahmen auf den Zeithorizont 2035 und integriert diese in das Stadtgebiet (Kap. 4.2). Im „Szenario des Technisch Machbaren“ erforscht die Potenzialermittlung die maximal mögliche Belastungsminderung durch Ausschöpfen eines technisch machbaren Potenzials (Kap. 4.3). In diesem Szenario werden Maßnahmen nur in den Siedlungsbestand integriert. Um die Auswirkungen klimaangepasster Stadtstrukturen zu untersuchen, wird der Maßnahmenmix des zweiten Szenarios für drei ausgewählte Teilgebiete um eine Transformation des Siedlungsbestandes erweitert (Kap. 4.3.4)

4.1 Ergebnisse der Referenzrechnung

Für die Analysen im vorliegenden Projekt wurde eine horizontale Modellauflösung von 5 m gewählt. Mit dieser Auflösung lassen sich alle für gesamtstädtische und quartiersbezogene Fragestellungen relevanten Aussagen ableiten. Mit Blick auf die benötigten Eingangsdaten besteht bei der gewählten hohen Auflösung die größte Herausforderung in der Erzeugung des Landnutzungsrasters. Im Modell können dabei die in Abbildung 7 gezeigten Realnutzungsklassen unterschieden werden. Für Bäume besteht die Besonderheit, dass ihnen zusätzlich noch ein Attribut für den Untergrund, auf dem sie stehen, zugewiesen wird. Auf diese Weise können beispielsweise die Wirkungen von Parkbäumen über Rasenflächen von Effekten unterschieden werden, die sich unter Alleen im Straßenraum ergeben. Jede Nutzungsklasse ist im Modell mit diversen Eigenschaften (u.a. Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit) verbunden, auf deren Basis die notwendigen physikalischen Gleichungen gelöst werden. Die Referenz-Modellierung 2035 zeigt auf, wie hoch die bioklimatische Belastung des Siedlungskörpers im Jahr 2035 sein wird, wenn die Stadt Bonn keine weiteren Maßnahmen umsetzt.

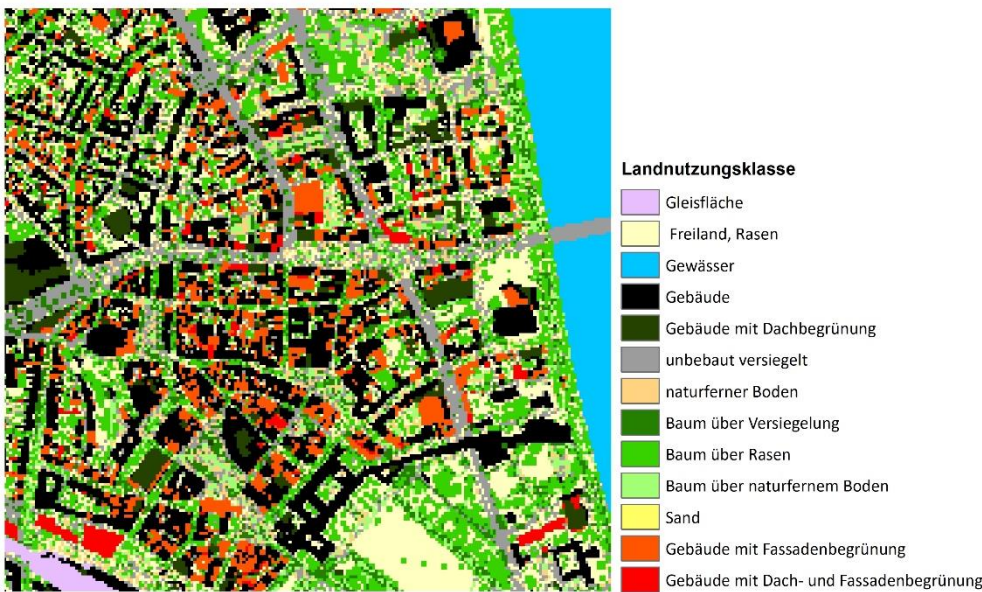


Abbildung 7: Im Projekt verwendete FITNAH-Landnutzungsklassen

4.1.1 Grundannahmen der Klimawirkungsanalyse

Folgende Annahmen und Modellparameter wurden bei der Stadtklimamodellierung der Bonner Referenzrechnung umgesetzt:

- Betrachtung der Klimaperiode 2021-2050 mit Zielhorizont 2035
- Klimaänderungssignal beträgt + 2,0 °C gegenüber der Referenzperiode 1971-2000 (entspricht dem 85. Perzentil des RCP 8.5, also eines starken Klimawandelszenarios)
- Gegenwärtige Stadtstruktur (2021/2022)
- Sommerliche Hochdruckwetterlage mit geringem Luftaustausch
- Regionalwindantrieb aus Deutschlandrechnung in 250 m Auflösung
- Bodenfeuchte liegt unter dem Welkepunkt für ebenerdiges Grün
- Ausfall von Stadtbäumen (*Betula pendula*, *Acer pseudoplatanus*)
- Reduktion des Kronendurchmessers der übrigen Stadtbäume um 7 %

4.1.2 Temperaturegebnisse

Das Modell liefert Ergebnisse für die Parameter Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Kaltluftvolumenstrom und Kaltluftproduktion (Nacht-Situation) sowie Wärmebelastung am Tag. Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms (Kaltluftströmung über die komplette untere Luftschicht) gelten sie für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nacht (maximale Abkühlung) bzw. 14:00 Uhr für den Tag (maximale Einstrahlung). Im

Folgenden werden ausschließlich die Ergebnisse der Wärmebelastung am Tag sowie der nächtlichen Lufttemperatur abgebildet.

Die Situation am Tage

Die Wärmebelastung am Tage wird durch den PET-Index verdeutlicht. Die Abkürzung PET steht hier für Physiologisch Äquivalente Temperatur. Die Berechnung dieses Indexes basiert auf der Wärmebilanzgleichung des menschlichen Körpers und kann als die tatsächlich wahrgenommene Umgebungstemperatur verstanden werden. Wärmehaushaltsmodelle berücksichtigen hierbei Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen. Eine Bewertung dieser Größen ist subjektiv und von der Tageskonstitution des einzelnen Menschen abhängig. Je nach Umgebungsbedingungen kann die PET deutlich höher ausfallen als die Lufttemperatur. Für die PET besteht eine absolute Bewertungsskala (VDI 2004²), die das Wärmeempfinden und die physiologischen Belastungsstufen beschreibt (z. B. Starke Wärmebelastung ab PET 35 °C)

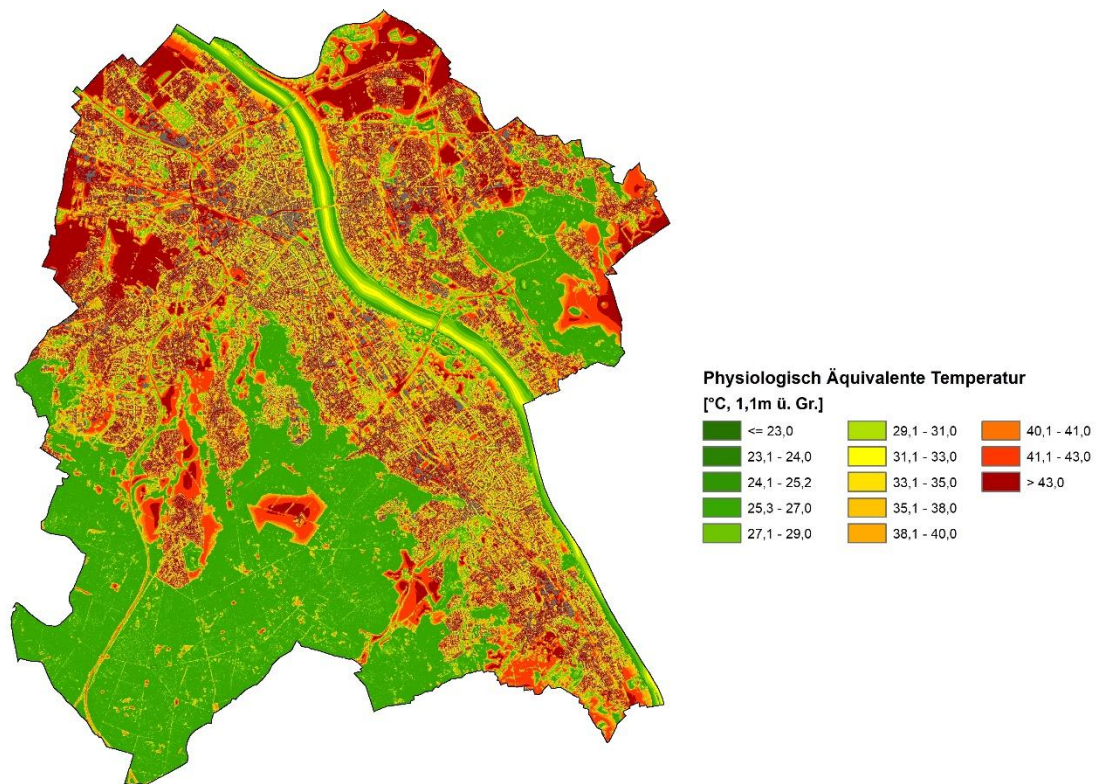


Abbildung 8: Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) um 14 Uhr in 1,1 m über Grund für eine hochsommerliche Wetterlage im Jahr 2035, unter Annahme des starken Klimawandels laut RCP-Szenario 8.5

Die PET weist mit einer Spannbreite von ca. 28 °C große Unterschiede im Stadtgebiet von Bonn auf. Unter den gegebenen Annahmen eines austauscharmen Sommertags ohne Bewölkung sind die geringsten Werte in den Waldgebieten zu finden, die tagsüber mit Werten von meist um die 26 °C eine kühlende Wirkung auf ihre Umgebung haben. Auch unter größeren Baumgruppen sowie an den baumbestandenen Ufern des Rheins herrschen meist PET Werte von unter 27 °C vor. Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder und Baumbestände allgemein als Rückzugsorte dienen können. Gewässerflächen entfalten durch die Verdunstung ebenfalls tagsüber eine kühlende Wirkung. Die PET in 1,1 m über der Wasseroberfläche des Rheins beträgt bei einer angenommenen Wassertemperatur von 22,1 °C etwa 26 bis 31 °C. Der Siedlungsraum, vor

² VDI (2004): Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9. Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen.

allem Flächen ohne Baumbestand, ist dagegen größtenteils von einer starken Wärmebelastung betroffen. Die höchsten Werte sind mit über 41 °C über versiegelten Gewerbegebieten und dem Straßenraum zu finden. Besonders hohe Werte werden unter anderem auf dem Marktplatz sowie auf großen Straßen wie der Oxfordstraße erreicht. Außerhalb der bebauten Kernstadt, auf den unverschatteten Grünflächen und landwirtschaftlichen Flächen des Umlands, erreicht die thermische Belastung teilweise ähnlich hohe Werte wie in der Innenstadt.

Bewertung der Klimafunktion am Tage

Zur Darstellung und Einordnung der stadtklimatischen Gegebenheiten und Prozesse werden Siedlungsbereiche als Wirkräume entsprechend ihrer bioklimatischen Situation bewertet. Grundlage der Bewertung ist der PET-Index. Für die Siedlungsbereiche ist die bioklimatische Situation sowohl im direkten Nahbereich der Gebäude als auch im Straßenraum und auf Plätzen von Bedeutung, da sie die Aufenthaltsqualität von Fahrradfahrer*innen, Fußgänger*innen und Pendler*innen beeinflusst. Per statistischem Verfahren (z-Transformation) werden die relativen Unterschiede im Stadtgebiet zugrunde gelegt. Der Bewertungsmaßstab basiert somit auf der Abweichung der PET-Werte von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum. Die verwendeten statistischen Werte für die Klasseneinteilung beziehen sich auf die Modellergebnisse für die heutige Situation und die der Referenzrechnung 2035.

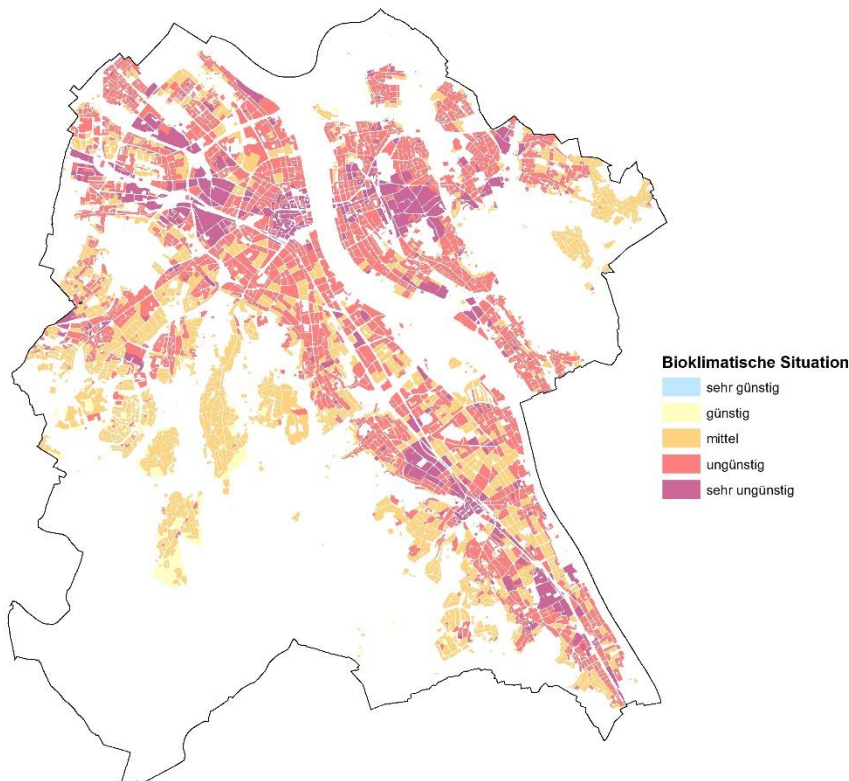


Abbildung 9: Bioklimatische Situation von Siedlungsflächen am Tage unter Annahme des starken Klimawandels in der Referenzrechnung 2035

In Bonn wird in der Referenz-Modellierung nur ein kleiner Teil (5 %) der Siedlungsfläche (7 % der Straßen und Plätze) mit sehr ungünstiger bioklimatischer Situation am Tage bewertet. Dabei handelt es sich meist um stark versiegelte Flächen in Gewerbegebieten. Mehr als die Hälfte der Siedlungsflächen (55 %) fällt in die Kategorie ungünstiger bioklimatischer Bedeutung (45 % Verkehrsflächen). Dies betrifft sowohl Gewerbegebiete als auch Wohnquartiere wie beispielsweise in Beuel-Mitte oder Ippendorf. Knapp ein Drittel der Flächen (sowohl Siedlungsflächen mit 37 % als auch Verkehrsflächen mit 32 %) befinden sich in der mittleren Kategorie mit einer weniger günstigen bioklimatischen Situation. Nur vereinzelt treten in den Siedlungsflächen günstige oder sehr günstige bioklimatische Situationen auf (3 %), denen meist eine hohe Durchgrünung vor allem in

den äußeren Bereichen des Stadtgebietes zugrunde liegt. In diesen beiden Kategorien schneiden die Verkehrsflächen deutlich besser ab (16 %).

Die Situation in der Nacht

Die bodennahe Lufttemperatur weist im Stadtgebiet aufgrund der unterschiedlichen Flächennutzungen einerseits und den Reliefunterschieden andererseits deutliche Unterschiede auf. Über den niedrig bewachsenen Freiflächen im Umland ist die nächtliche Abkühlung am größten. Während dort am Tage die ungehinderte Sonneneinstrahlung hohe Temperaturen bewirkt, speichert der natürliche Boden wenig Wärme und kühlt nachts schnell ab. Im Modellergebnis für die wind schwache, warme Sommernacht liegen die bodennahen Temperaturen über den Freiflächen zwischen 16,0 bis 17,5 °C. Im Stadtbereich sind dagegen nur vereinzelt, in unversiegelten Grünflächen mit geringem Baumbestand, relativ kühle Bereiche mit Temperaturen unter 17,0 °C zu finden. Bäume verhindern mit ihrer Krone die nächtliche Wärmeausstrahlung der Oberflächen, wodurch die Abkühlung lokal gemindert wird. Nichtsdestotrotz sind besonders die Wohnquartiere mit großem Grünanteil und Lufttemperaturen von 17,0 bis 18,0 °C relativ kühl. Die nächtliche Lufttemperatur ist stark abhängig von Versiegelungsgrad und Baudichte, da die Baustruktur die tagsüber eingestrahlte Wärme speichert und nachts verlangsamt an die Umgebungsluft abgibt. Die Innenstadt, Bad Godesberg sowie deren umliegende Straßenräume gehören mit Temperaturen über 20,0 °C nachts zu den wärmsten Bereichen der Stadt.

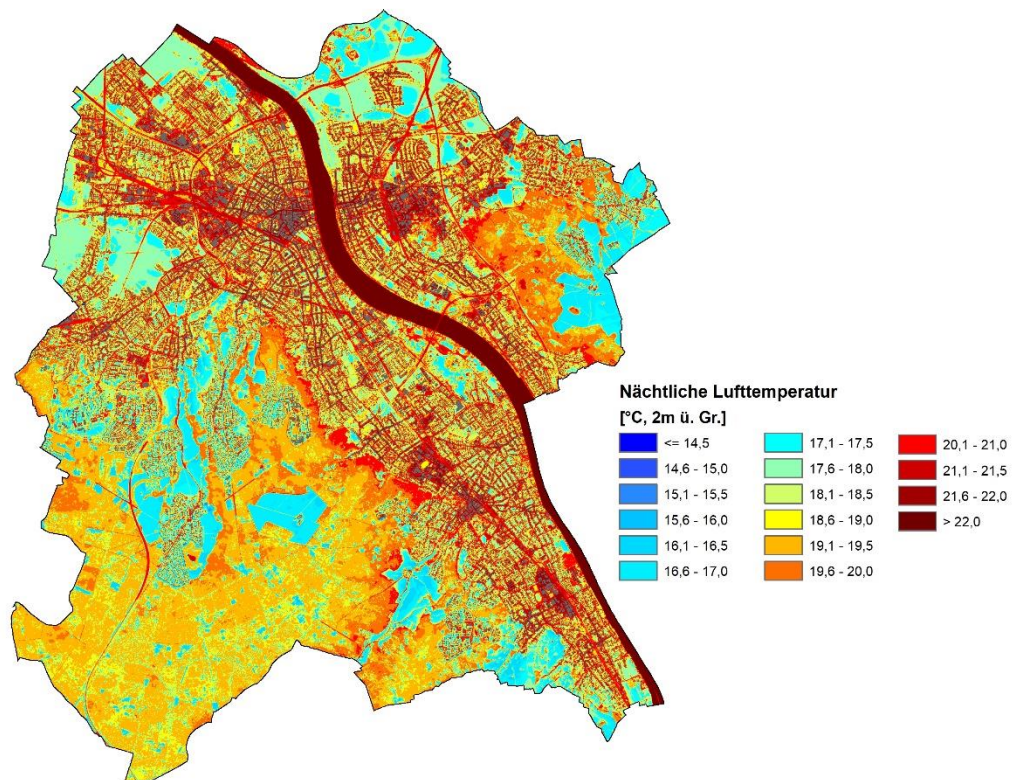


Abbildung 10: Lufttemperatur um 4 Uhr in 2 m über Grund für eine hochsommerliche Wetterlage im Jahr 2035, unter Annahme des starken Klimawandels laut RCP-Szenario 8.5

Bewertung der Klimafunktionen in der Nacht

Analog zur Bewertung der Klimafunktionen am Tage, werden die Siedlungsbereiche je nach Belastungsgrad in Bezug auf nächtliche Überwärmung eingeteilt. In der Nacht ist weniger der Aufenthalt im Freien Bewertungsgegenstand, sondern vielmehr die Möglichkeit eines erholsamen Schlafes im Innenraum. Die Lufttemperatur der Außenluft ist dabei die entscheidende Größe. Per statistischem Verfahren (z-Transformation) werden die relativen Unterschiede im Stadtgebiet zu-

grunde gelegt. Der Bewertungsmaßstab basiert somit auf der Abweichung der Lufttemperaturwerte von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum. Die verwendeten statistischen Werte für die Klasseneinteilung beziehen sich auf die Modellergebnisse für die heutige Situation und die der Referenzrechnung 2035.

Rund zwei Drittel der Siedlungsflächen weisen in der Nacht eine mindestens ungünstige bioklimatische Situation auf und sind damit hoch belastet. Darunter sind vor allem Gewerbegebiete (Beuel-Ost, Nordstadt, Gewerbegebiet Am Vogelsang, Gewerbegebiet an der Godesberger Straße und Bonn-Mehlem) sowie der hoch versiegelte Kernbereich der Innenstadt. Aber auch vereinzelte Wohngebiete mit starkem Versiegelungsgrad fallen nachts durch eine ungünstige bis sehr ungünstige bioklimatische Situation auf (zum Beispiel in Beuel-Mitte). Insgesamt sind breite Straßen und Plätze höherer bioklimatischer Belastung ausgesetzt als Siedlungsquartiere (93 % der Verkehrsflächen sind mindestens in der Kategorie einer ungünstigen bioklimatischen Situation). Knapp ein Drittel der Siedlungsfläche fällt in der Referenz-Modellierung in die mittlere Kategorie. Grund ist einerseits der relativ hohe Grünanteil in Gebieten mit vorrangiger Einzelhausbebauung und großen Gärten wie z. B. in der Amerikanischen Siedlung Plittersdorf, andererseits die gute Kaltluftversorgung aus dem Umland, was vor allem auf die Stadtbereiche zutrifft, die im Wirkungsbereich der flächenhaften Hangabflüsse oder Kaltflutleitbahnen liegen. Günstige oder sehr günstige bioklimatische Situationen treten im Bonner Stadtgebiet in der Referenzmodellierung 2035 nur vereinzelt auf (2 %).

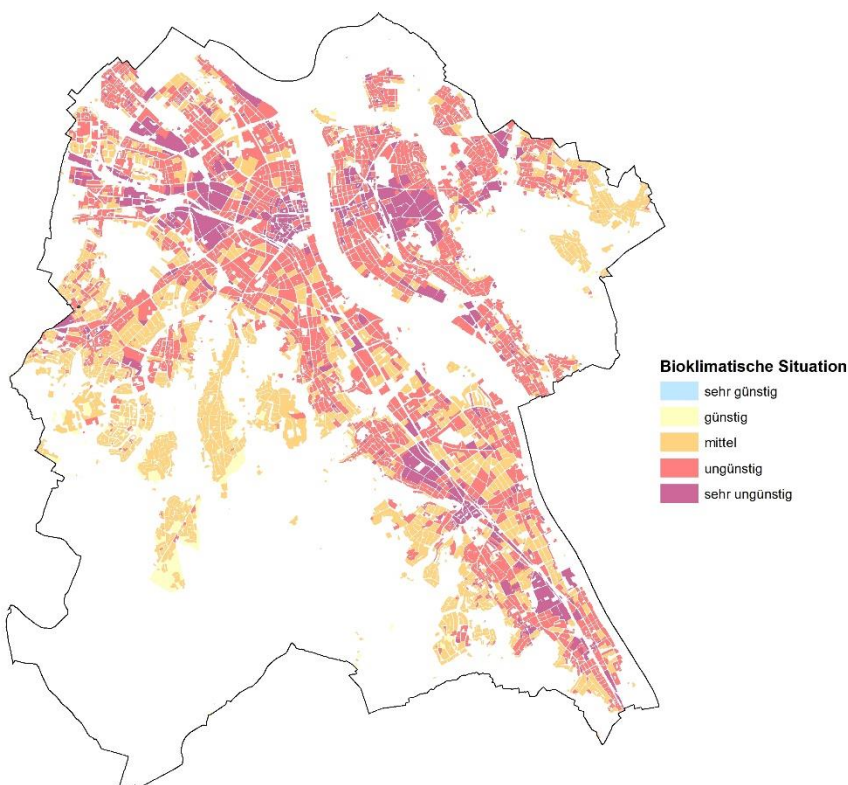


Abbildung 11: Bioklimatische Situation von Siedlungsflächen in der Nacht unter Annahme des starken Klimawandels in der Referenzrechnung 2035



4.2 Szenario Weiter wie bisher 2035

Das Szenario zeigt auf, wie hoch die bioklimatische Belastung des Siedlungskörpers im Jahr 2035 sein wird, wenn die Stadt Bonn bereits etablierte Formen der Förderung und Forderung von Maßnahmen in ähnlichem Maße fortführt. Die Maßnahmenpotenzialermittlung berücksichtigt neben baulichen und natürlichen Restriktionen auch wirtschaftliche und eigentumsbezogene Restriktionen. Demnach besteht das Anpassungspotenzial nur aus vereinzelt punktuellen Hitzeminderungsmaßnahmen im Bestand und in kleinen Stadtentwicklungsmaßnahmen, welche durch die Stadt selbst oder über Förderprogramme in Umsetzung gebracht werden.

4.2.1 Grundannahmen der Klimawirkungsanalyse

Folgende Annahmen und Modellparameter wurden bei der Stadtklimamodellierung des Szenarios *Weiter wie bisher 2035* umgesetzt:

- Betrachtung der Klimaperiode 2021-2050 mit Zielhorizont 2035
- Klimaänderungssignal analog zur Referenz-Modellierung (+ 2,0 °C)
- Veränderte Stadtstruktur (siehe 4.2.3)
- Sommerliche Hochdruckwetterlage mit geringem Luftaustausch
- Regionalwindantrieb aus Deutschlandrechnung in 250 m Auflösung
- Individuelle Bodenfeuchte (Vermeidung der Sommertrockenheit nur im Bereich von Klimaanpassungsmaßnahmen)
- Ausfall von Stadtbäumen (*Betula pendula*, *Acer pseudoplatanus*)
- Reduktion des Kronendurchmessers der übrigen Stadtbäume um 7 %

4.2.2 Grundannahmen der Potenzialermittlung

Folgende Maßnahmen aus den Bereichen Stadtplanung, Freiraumplanung, Stadtgrün und Förderprogramme sind als Potenzial ermittelt worden:

- Bebauungspläne mit Satzungsbeschluss: 7 Bebauungspläne
- Masterplan Innere Stadt: Budapester Straße, Stiftsplatz, Rheinuferpromenade, Brüdergasse, Bornheimer Straße, Kölnstraße, Rheingasse sowie Uni trifft City
- Masterplan Bad Godesberg: Projektplanung Innere Stadt (Variante C + Erhalt Frohnhof Galeria), Rahmenplan (Stand 02.02.2023)
- Zukunftsprognose Grünrahmenplan Bundesviertel: Öffentliche Plätze, Straßenräume und private Freiräume nach Blue-Green-Streets-Leitlinien entwickelt
- Spielflächenplanung: 5 Spielflächen
- Zukunftsprognose aufbauend auf dem Stadtbaumkonzept: 1.200 neue Stadtbäume in „baumlosen Straßen“ geplant
- Stadtgrün – naturnah: Rasenflächen im Verkehrsr Grün und weitere Rasenflächen unter 400 qm zu Blühwiesen entwickelt
- Förderprogramm Begrünung: Auswertung des Förderprogramms und Prognose für Zeit-horizont 2035: 18.000 qm Entsiegelung und Begrünung, 120 Gebäude mit Fassadenbe-grünung, 50.800 qm Dachbegrünung

Die Maßnahmen sind durch eine entsprechende Anpassung der Nutzungsklassen des Nutzungs-rasters (bspw. Umwandlung der Nutzungsklasse „unbebaut versiegelt“ in „Baum über Rasen“) in das Modell integriert.

4.2.3 Nutzungsänderungen/ Stärke des Maßnahmenpotenzials

Das Anpassungspotenzial wird nicht gesamtstädtisch, sondern nur punktuell und teilraumbezo-gen innerhalb des Stadtgebietes genutzt. Grob verallgemeinert sind folgende Mengen an Hit-zeminderungsmaßnahmen in das Szenario eingeflossen:

- 10.000 neue Bäume (inkl. Zukunftsprognose aus dem Stadtbaumkonzept)
- 56 ha Entsiegelung (zu Rasen oder teilversiegelten Bodenoberflächen)
- 5 ha Gebäudegrundfläche mit Dachbegrünung
- 0,7 ha Gebäudegrundfläche mit Fassadenbegrünung

Werden nur die Maßnahmen des Masterplan Innere Stadt analysiert, ergibt sich rein für diese Flächen eine Nutzungsänderung von +2 %Punkte Rasen, -4,5 %Punkte versiegelte Fläche und +2,2 %Punkte mehr baumüberstandene Fläche. Die Änderungen der Nutzungen aus Stadtbaumkonzept und Förderprogramm Begrünung wirken sich gesamtstädtisch nur im Bereich von wenigen Promille-Punkten aus.

4.2.4 Temperaturergebnisse

Die im Vergleich zur Referenz-Modellierung abweichenden Modelleingangsparameter und die im Szenario *Weiter wie bisher* umgesetzten Maßnahmen mit einhergehender Änderung der Nutzungsstruktur, führen sowohl am Tage als auch in der Nacht zu Abweichungen im Temperatur- sowie Strömungsfeld. Im Folgenden werden diese Temperaturabweichungen zwischen Referenzrechnung und dem Szenario *Weiter wie bisher* in Differenzkarten dargestellt.

Die Situation am Tage

Die Auswirkungen der im Szenario *Weiter wie bisher* umgesetzten Maßnahmen auf die PET am Tage beschränken sich größtenteils auf deren Nahbereich. Die punktuellen Änderungen im Nutzungsraster, wie dem Setzen einzelner Bäume oder kleinräumiger Entsiegelungsmaßnahmen, führt zu lediglich punktuellen Änderungen in der PET. In Bereichen, in denen beispielsweise neue Baumstandorte hinzugefügt wurden, führt dies aufgrund der Verschattung und Verdunstungskühlung zu einer Reduktion der PET. Ebenfalls punktuell treten Bereiche mit höheren PET-Werten als in der Referenzmodellierung auf. Diese werden zumeist durch die angepasste Nutzung (Stadtstruktur) und veränderte Strömungsbedingungen hervorgerufen. Einzig die Masterpläne (Ø bis zu -1,3 °C) sowie der Grünrahmenplan (Ø -3,2 °C) zeigen großflächigere Änderungen der PET, da hier deutlich mehr Maßnahmen auf begrenztem Raum in das Modell implementiert wurden. Gesamtstädtisch betrachtet nimmt die PET im Szenario *Weiter wie bisher* innerhalb der Siedlungs- und Verkehrsflächen im Mittel um knapp 0,2 °C ab.

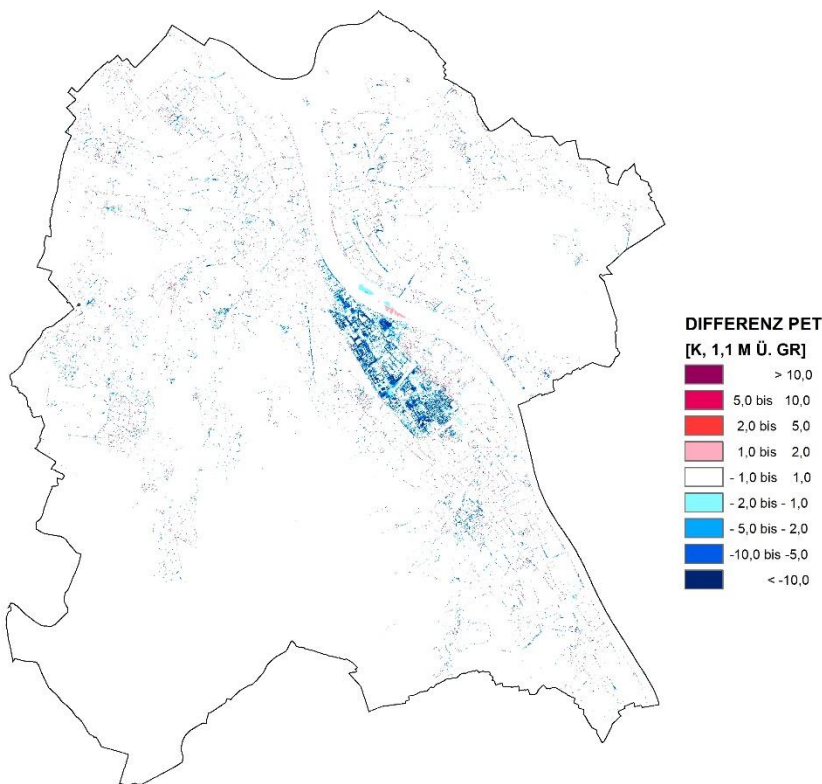


Abbildung 12: Differenz der Physiologisch Äquivalenten Temperatur um 14 Uhr des Szenarios *Weiter wie bisher* und der Referenz-Modellierung 2035

Bewertung der Klimafunktion am Tage

Im Vergleich zur Referenz-Modellierung 2035 ändern sich die Flächenanteile in den einzelnen Bewertungskategorien zur bioklimatischen Situation in den Siedlungs- und Verkehrsflächen nur geringfügig. Durch die überwiegend nur punktuell stattfindenden Eingriffe werden zwar lokal Temperaturdifferenzen erzeugt, welche in Bezug auf die Flächengröße (z. B. ein zusätzlicher Baum für eine gesamte Straße) allerdings so gering sind, dass sich die Bewertungskategorie nicht verändert. So verringert sich der Anteil an Siedlungs- und Gewerbeflächen mit ungünstiger bioklimatischer Situation gegenüber der Referenzrechnung um 2 %, während die Flächen mit günstiger bioklimatischer Situation um 2 % zunehmen. Bei den Plätzen und Verkehrsflächen sind die Unterschiede in der Bewertung in etwa derselben Größenordnung.

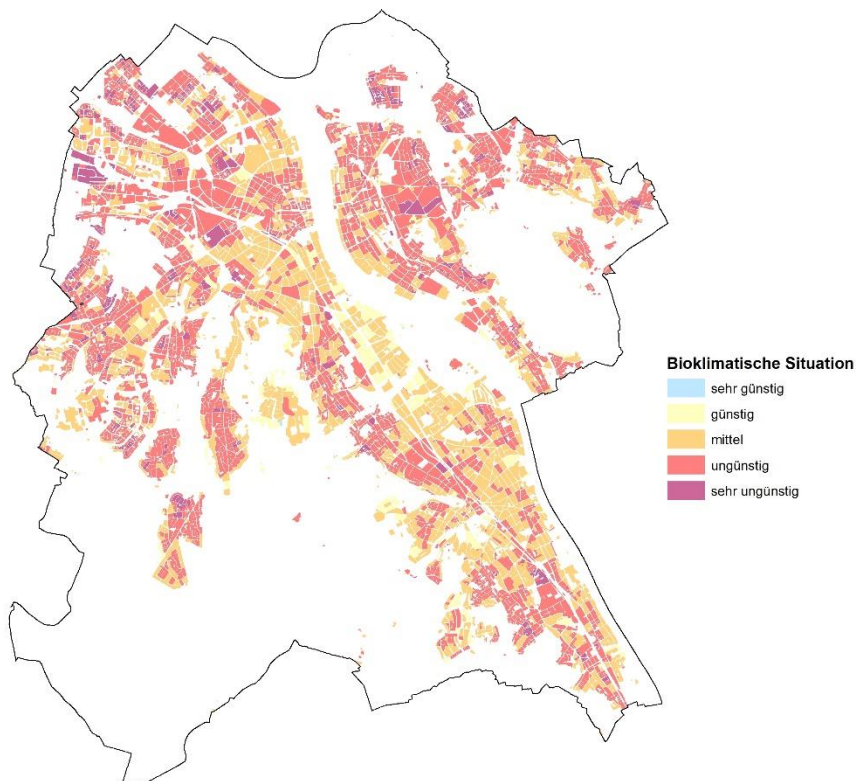


Abbildung 13: Bioklimatische Situation von Siedlungsflächen am Tage im Szenario *Weiter wie bisher*

Die Situation in der Nacht

Die Auswirkungen der Maßnahmen im Szenario *Weiter wie bisher* sind in der Nacht ähnlich wie am Tage eher punktuell und lokal. Im Gegensatz zu den Temperaturdifferenzen zwischen dem Szenario und der Referenz-Modellierung am Tag ist die Spannweite der Abkühlung bzw. Erwärmung in der Nacht weniger stark ausgeprägt. Diese reicht bei der bodennahen Lufttemperatur um 4 Uhr von $-4,1\text{ °C}$ bis $3,7\text{ °C}$ (zum Vergleich: $-17,5\text{ °C}$ bis $16,5\text{ °C}$ PET-Differenz um 14 Uhr). Besonders die Umsetzung der umfassenden Maßnahmen des Grünrahmenplans Bundesviertel im Stadtklimamodell führt zu einer mittleren Abkühlung in diesem Bereich von $0,7\text{ °C}$. Gesamtstädtisch verringert sich die nächtliche Temperatur innerhalb der Siedlungs- und Verkehrsflächen um $0,1\text{ °C}$.

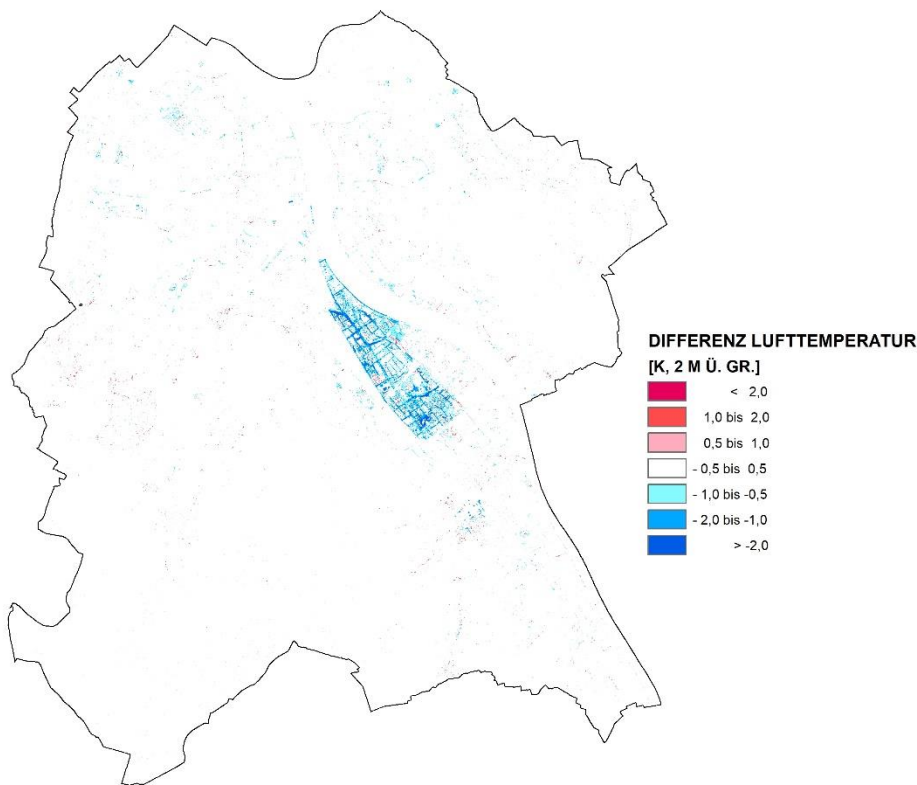


Abbildung 14: Differenz der bodennahen Lufttemperatur um 4 Uhr des Szenarios *Weiter wie bisher* und der Referenz-Modellierung 2035

Bewertung der Klimafunktion in der Nacht

Im Vergleich zur Referenz-Modellierung 2035 ändern sich in diesem Szenario die Flächenanteile in den einzelnen Bewertungskategorien zur nächtlichen bioklimatischen Situation in den Siedlungs- und Verkehrsflächen etwas deutlicher als am Tage. Während sich in den Siedlungs- und Gewerbeflächen sehr ungünstiger bioklimatischer Belastung prozentual gesehen nichts ändert, nehmen die Flächen mit ungünstiger bioklimatischer Situation um 8 % ab und fallen nun in die mittlere Kategorie. Bei den Verkehrsflächen und Plätzen ist die Ausgangslage in der Referenzrechnung mit über 90 % in den beiden höchsten Kategorien thermischer Belastung bereits sehr ungünstig. Mit der Umsetzung der Maßnahmen im Szenario *Weiter wie bisher* verringert sich der Anteil an Flächen sehr ungünstiger bioklimatischer Situation um 7 % und findet sich in der mittleren Kategorie bzw. in den Flächen günstiger bioklimatischer Situation wider.

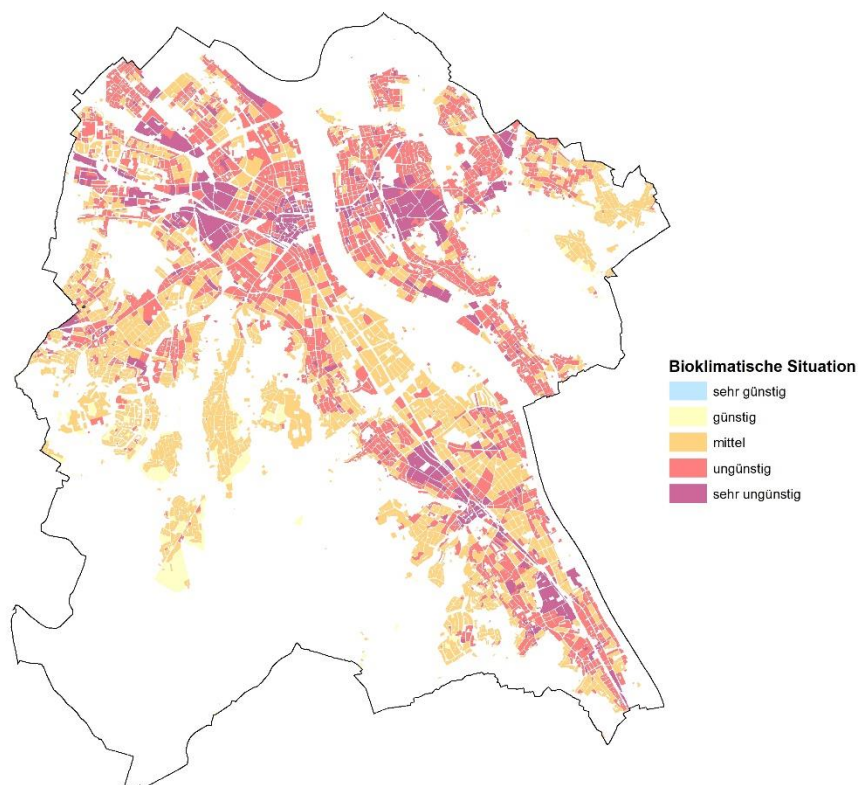
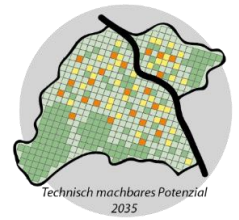


Abbildung 15: Bioklimatische Situation von Siedlungsflächen in der Nacht im Szenario *Weiter wie bisher*

4.3 Szenario des Technisch Machbaren 2035

Das Szenario zeigt auf, wie hoch die bioklimatische Belastung des Siedlungskörpers im Jahr 2035 sein wird, wenn in der Stadt Bonn das maximal mögliche Anpassungspotenzial ausgenutzt und alle technisch möglichen Hitzeminderungsmaßnahmen umgesetzt werden. Die Maßnahmenpotenzialermittlung berücksichtigt technische und bauliche Restriktionen insoweit es die Geodatengrundlage und die automatisierte Bearbeitung zulassen. Wirtschaftliche und eigentumsbezogene Restriktionen finden keine Berücksichtigung. Demnach besteht das Anpassungspotenzial aus einer flächendeckenden Integration von Hitzeminderungsmaßnahmen im Bestand und in Stadtentwicklungsmaßnahmen. Die Stadt und die Privateigentümer*innen werden auf allen Flächen aktiv.



4.3.1 Grundannahmen der Klimawirkungsanalyse

Folgende Annahmen und Modellparameter wurden bei der Stadtklimamodellierung des Szenarios des *Technisch Machbaren 2035* umgesetzt:

- Betrachtung der Klimaperiode 2021-2050 mit Zielhorizont 2035
- Klimaänderungssignal analog zur Referenz-Modellierung (+ 2,0 °C)
- Veränderte Stadtstruktur (siehe 4.3.3)
- Sommerliche Hochdruckwetterlage mit geringem Luftaustausch
- Regionalwindantrieb aus Deutschlandrechnung in 250 m Auflösung
- Individuelle Bodenfeuchte (Vermeidung der Sommertrockenheit im Bereich von Klimaanpassungsmaßnahmen)
- Kein Ausfall von Stadtbäumen sowie keine Reduktion des Kronendurchmessers

4.3.2 Grundannahmen der Potenzialermittlung

Was ist ein technisch machbares Potenzial? Was ist auf den einzelnen Nutzungen im Siedlungskörper möglich ohne die aktuelle Nutzung zu verdrängen? Die Erarbeitung hat gezeigt, dass es keine richtigen oder falschen Antworten gibt, sondern dass die Methodik auf vielen getroffenen Annahmen beruht, die einen Mangel an (Geodaten-)Informationen ausgleichen. Auch kann nicht wie im Szenario *Weiter wie bisher* nur auf geplante Anpassungsmaßnahmen zurückgegriffen werden, da bewusst die aktuell als realistisch angesehenen Anpassungsmöglichkeiten deutlich erweitert werden sollen.

Die Potenzialermittlung erfolgt getrennt nach den Kulissen Straßenräume, weitere bebaute und unbebaute Flurstücke und Gebäudebestand. Ziel ist es, für jede Straße und jedes Flurstück eine neue klimaangepasste Nutzungsaufteilung zu entwickeln, die ein zukünftig zu erwartendes Maß an Mobilitätswende und ein ambitioniertes Maß an Klimaanpassung berücksichtigt, und den Gebäudebestand soweit wie möglich zu begrünen.

Potenzialermittlung im Straßenraum

Abbildung 16 visualisiert die Zielvorstellung für den Straßenraum. Durch die entwickelte Methodik wird für jeden Straßenabschnitt individuell geprüft, ob eine Reduktion der Fahrspuren bzw. der Fahrspurenbreite und des Parkraumbedarfs möglich ist und dadurch ein Potenzialraum für grünblaue Hitzeminderungsmaßnahmen entsteht.

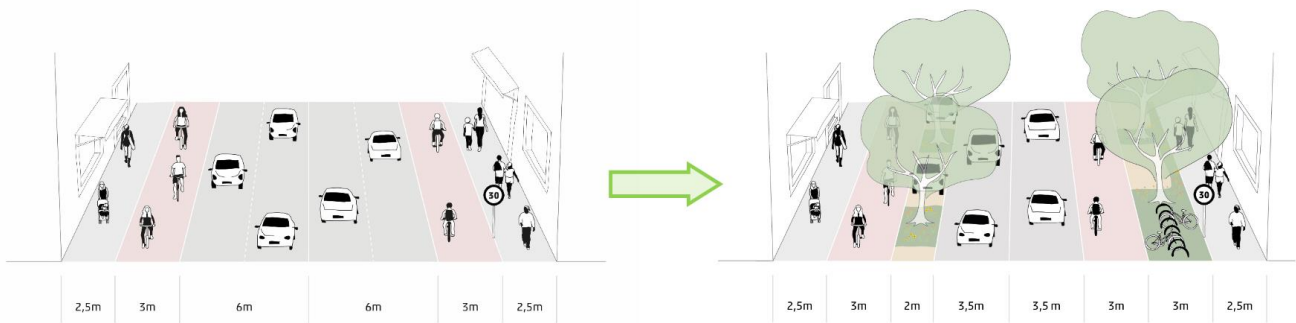


Abbildung 16: Beispielhaftes Zielbild für einen Straßenraum im *Szenario des Technisch Machbaren*

Straßentypen der Zukunft

Straßentypen der Zukunft: Jedem Straßenabschnitt wird kriterienbasiert auf Basis von aktueller Straßenhierarchie, Verkehrsbelastung, Bus- und Tramnutzung und Siedlungsstruktur ein „Straßentyp der Zukunft“ zugeordnet. Diese sind: Fußgängerzone, Verkehrsberuhigte Straße mit / ohne Bus, Wohnstraße, Sammelstraße, Hauptverkehrsstraße Innerorts, Hauptverkehrsstraße Außerorts/ Gewerbe

Standardisierte Straßenquerschnitte für den fließenden Verkehr

Standardisierte Straßenquerschnitte für den fließenden Verkehr: Die Straßentypen der Zukunft legen Vorgaben zur Raumaufteilung im Straßenraum fest. Für jeden Straßentyp wird ein standardisierter Querschnitt für den fließenden Verkehr (PKW + ÖPNV + Radweg + Gehweg) entwickelt, der sich mit seinen Maßen an Empfehlungen des Forschungsprojektes „BlueGreenStreets“³ orientiert und ein Maximum an Potenzialraum für grün-blaue Maßnahmen ermöglicht.



Abbildung 17: Standardisierte Querschnitte für den fließenden Verkehr im *Szenario des Technisch Machbaren*

Ermittlung Potenzialraum für grün-blaue Maßnahmen

Ermittlung des Potenzialraums für grün-blaue Maßnahmen: Der Potenzialraum ergibt sich aus der Differenz der realen Gesamtflurstücks-Breite des Straßenraums und der benötigten Querschnittsbreite für den fließenden Verkehr (Abbildung 18).

³ BlueGreenStreets Toolbox - Teil A & B. Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere (<https://repos.hcu-hamburg.de/handle/hcu/638>)

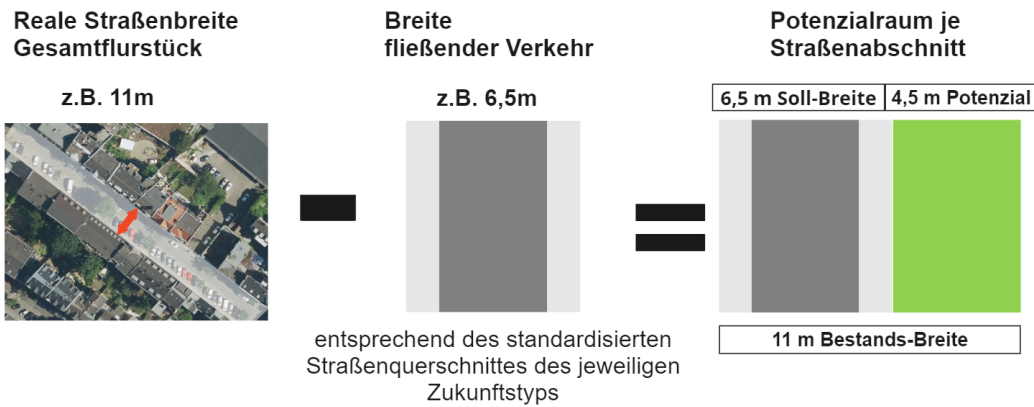


Abbildung 18: Methodik zur Ermittlung des Potenzialraums im Straßenraum

Der Potenzialraum kann für manche Straßenabschnitte auch Null bzw. negativ sein, d.h. es besteht keine Möglichkeit grün-blaue Maßnahmen im Straßenraum zu integrieren. Wie der Potenzialraum in den Straßenquerschnitt integriert wird, ist abhängig von der Breite des Potenzialraums und des Straßentyps. Ziel dabei ist, dass ein Grünstreifen mind. 2,5 m breit ist, um ideale Bedingungen für grün-blaue Maßnahmen zu bieten (siehe beispielhaft dazu Abb. 16).

Bestimmung des Anteils an grün-blauen Maßnahmen: In den ermittelten Potenzialraum sollen als Maßnahmen Bäume, Rasenflächen, Teilentsiegelung von Parkplätzen und gute Wasserversorgung der Vegetation integriert werden. Zusätzlich wird der Potenzialraum den Nutzungsansprüchen des Parkraumbedarfs gerecht. Die Bestimmung der Maßnahmenanteile berücksichtigt die folgenden Kriterien:

Bestimmung Anteil an grün-blauen Maßnahmen

- Bioklimatische Hitzebelastung des Straßenraums am Tag und in der Nacht
- Bedeutung des Straßenraums für den Kaltlufttransport
- Ausrichtung der Straße (Sonneneinstrahlung zur Mittagszeit)
- Entlastungsfokus auf die Tag-Situation oder auf Tag- und Nacht-Situation
- Parkraumbedarf (festgelegt auf Basis der Stadtstrukturtypen und der Erreichbarkeit von Tram- und Bahnhaltstellen)

Bei der neuen Nutzungsverteilung der Straßenräume werden keine Bestandsbäume gefällt. „Neu gepflanzte“ Bäume werden mit einer Durchschnittshöhe von 12 m und einem Kronendurchmesser von 7,5 m ins Modell integriert, sodass sie bereits als ausgewachsene Bäume in der Klimawirkungsanalyse berücksichtigt werden.

Potenzialermittlung auf bebauten und unbebauten Flurstücken

Abbildung 19 visualisiert beispielhaft die Zielvorstellung für Flurstücke. Durch die entwickelte Methodik wird für jedes bebaute und unbebaute Flurstück (außer Wald- und Landwirtschaftsflächen) individuell geprüft, ob eine Reduktion der Versiegelung möglich ist und welche grün-blauen Maßnahmen in diesen Potenzialraum und auf den schon bestehenden Grünflächen integriert werden können.

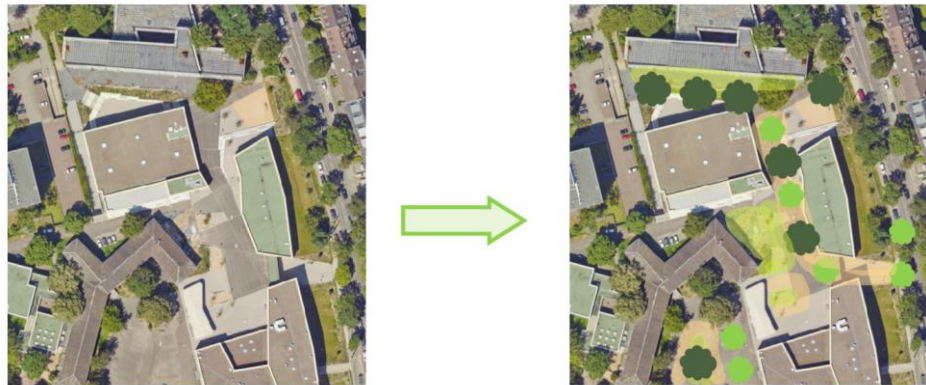


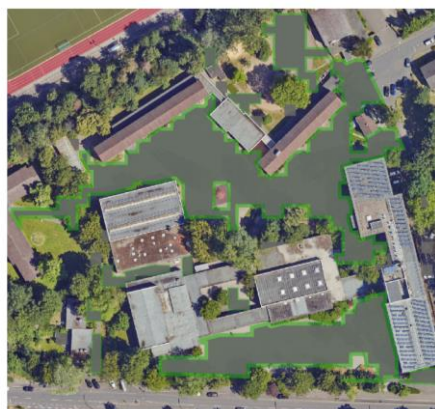
Abbildung 19: Beispielhaftes Zielbild für ein Flurstück im Szenario des Technisch Machbaren

Flächenkulissen nach Nutzung

Flächenkulissen nach Nutzung kategorisieren: Eine Verbesserung der Hitzebelastung am Tag wird durch Begrünung und Verschattung auf dem Flurstück selbst erreicht. Aber auch eine nächtliche Abkühlung ist oft nicht durch großräumigere Kaltluftprozesse zu erreichen, sondern muss durch Entsiegelungs- und Begrünungsmaßnahmen auf dem Flurstück selbst lokal begünstigt werden. Die Flurstücke werden nach ihrer Nutzung kategorisiert (bspw. Gewerbe, Dienstleistung, Schulen, Kultur, öffentliche Grünanlagen, Wohn-Flurstücke (private Freiräume)).

Rückbau von versiegelten Flächen

Rückbau von versiegelten Flächen: Ziel ist es, alle versiegelten Flächen auf Flurstücken zu identifizieren, die zukünftig über eine Nutzungsänderung als Potenzialraum für grün-blaue Maßnahmen zur Verfügung stehen können. Flurstücke mit einer ähnlichen Nutzung besitzen ein ähnliches Maß an Entsiegelungspotenzial. Für jede Nutzungskategorie wird ein Flächenanteil festgelegt, der die maximale Menge an Nutzungsänderung (sprich Überführung von versiegelter Fläche in Potenzialraum für grün-blaue Maßnahmen) angibt, welche bei höchster Anstrengung möglich ist, ohne die eigentliche Flurstücksfunktion (bspw. Schulhof) zu beeinträchtigen. Dieser Flächenanteil entspricht einer Annahme, wie viel Rückbau von versiegelten Flächen „technisch machbar“ ist und berücksichtigt insbesondere eine starke Mobilitätswende mit einer Reduktion von Parkplatzflächen. Die versiegelten Flächen werden entsprechend des Richtwertes (bspw. 25 % Flächenentsiegelung bei Gewerbe, 50% Flächenentsiegelung bei Kultur und Soziales) in ihren Randbereichen entsiegelt. Dadurch entstehen unversiegelte Potenzialräume entlang der Gebäude und der Flurstücksgrenzen.



Schulen > 25 % weniger versiegelte Fläche

- weiterhin versiegelte Fläche
- Rückbau versiegelte Fläche

Abbildung 20: Automatisierter Rückbau versiegelter Fläche auf einem Schulgelände ermöglicht Potenzialraum zur Verschattung der Gebäude und des Freiraums

Bestimmung Anteil an grün-blauen Maßnahmen

Bestimmung des Anteils an grün-blauen Maßnahmen auf versiegelten Flächen und Wegen: Auch die nach dem Entsiegelungsschritt weiterhin versiegelten Flächen besitzen ein Potenzial für Hitzeminderungsmaßnahmen. Auf diese Flächen werden die Maßnahmen Bäume und Teilentsie-

gelung (bspw. wassergebundener Bodenbelag oder Rasengittersteine) integriert. Die Bestimmung der Anteile an Bäumen und Teilentsiegelung beruht auf einer Annahme, wie viel dieser Maßnahmen je nach Flurstücksnutzung möglich ist, ohne die Funktion der Fläche zu stark zu beeinträchtigen.

Bestimmung des Anteils an grün-blauen Maßnahmen auf unversiegelten Flächen: Bereits bestehende Grünräume sowie durch den Rückbau versiegelter Flächen neu hinzugewonnener Potenzialraum werden durch die Maßnahmen Bäume, Rasen und gute Wasserversorgung der Vegetation klimaangepasst. Die Bestimmung der Maßnahmenanteile berücksichtigt die folgenden Kriterien:

- Bioklimatische Hitzebelastung am Tag und in der Nacht
- Bedeutung des Flurstücks für den Kaltlufttransport
- Entlastungsfokus auf die Tag-Situation (bspw. Schule) oder auf Tag- und Nacht-Situation (bspw. Wohngebäude)

Bei der neuen Nutzungsverteilung werden keine Bestandsbäume gefällt. „Neu gepflanzte“ Bäume werden mit einer Durchschnittshöhe von 12 m und einem Kronendurchmesser von 7,5 m ins Modell integriert, sodass sie bereits als ausgewachsene Bäume in der Klimawirkungsanalyse berücksichtigt werden.

Potenzialermittlung im Gebäudebestand

Potenzialermittlung Dachbegrünung: Die Potenzialermittlung beruht auf dem Gründachpotenzialkataster des Landes NRW, welches die Dachneigung, allerdings keine Aspekte der Traglast und Statik der Gebäude berücksichtigt. Ausgewählt werden alle Gebäude, die nicht dem Denkmalschutz unterstehen und eine geeignete Neigung (bis 10°) und zusammenhängende Mindestfläche von 10 qm aufweisen. Um Einschränkungen der Traglast und Statik zu berücksichtigen, werden von den gewählten Gebäuden nur 75 % zufällig ausgewählt und als Potenzial für Dachbegrünung festgehalten. Dies ergibt insgesamt etwa 21.000 Gebäude mit Gründach. Da die Klimawirkungsanalyse die bodennahe Temperatur darstellt, fließt in die Analyse nur Dachbegrünung mit einer Gebäudehöhe bis 6 m ein, da höhergelegene Dachbegrünungen zwar Auswirkungen auf höhere Temperaturschichten (insbesondere bei Nutzung als Aufenthaltsfläche) haben, aber nicht auf den bodennahen Temperaturbereich.

21.000 Gebäude mit
Gründach

Potenzialermittlung Fassadenbegrünung: Es liegen keine geeigneten Geodaten vor, aus denen sich die Eignung für Fassadenbegrünung (insb. für bodengebundene Fassadenbegrünung) ableiten lässt. Deshalb wird die Eignung der Gebäude generalisiert über ihren Stadtstrukturtyp angenommen: Parkhäuser/Garagen 100 %; Gewerbe 75 %; Einfamilienhäuser/ Zeilengebäude/ Institutionelle Einrichtungen 75 %; restliche Gebäude 50%. Aus allen Gebäuden, die nicht dem Denkmalschutz unterstehen, werden entsprechend der angenommenen Eignungswerte zufällig Gebäude ausgewählt. Dies ergibt insgesamt 65.000 Gebäude mit Fassadenbegrünung in den unterschiedlichen Stadtstrukturtypen.

65.000 Gebäude mit
Fassadenbegrünung

Alle Maßnahmen im Bereich der Straßenräume, Flurstücke und Gebäude sind durch eine entsprechende Anpassung der Nutzungsklassen des Nutzungsrasters (bspw. Umwandlung der Nutzungsklasse „unbebaut versiegelt“ in „Baum über Rasen“) in das Modell integriert.

4.3.3 Nutzungsänderungen

Das Anpassungspotenzial kommt flächendeckend in der Stadt zum Tragen, sodass gesamtstädtisch betrachtet eine große Anzahl an Maßnahmen umgesetzt wird. Grob verallgemeinert sind folgende Mengen an Hitzeminderungsmaßnahmen in das Szenario eingeflossen:

- 180.000 neue Bäume (zu aktuell etwa 320.000 Bestandsbäumen im Siedlungsgebiet)
- 500 ha Entsiegelung zu Rasen und 500 ha Entsiegelung zu teilversiegelten Bodenoberflächen (von aktuell etwa 1.800 ha Versiegelung im Siedlungsgebiet)
- 21.000 Gebäude mit Dachbegrünung (13.000 in Klimamodellierung berücksichtigt)
- 65.000 Gebäude mit Fassadenbegrünung

Die Straßenräume sind von stark versiegelten und nur abschnittsweise verschatteten Räumen in multifunktionale Mobilitätsräume umgewandelt (Abbildung 21). Ausreichend Rasenfläche und baumbestandene Rasenfläche sichert die nächtliche Abkühlung und dient als Potenzialraum für Versickerung und Verdunstung. Parkplätze im Straßenraum sind nicht voll versiegelt, sie sind teilversiegelt (Naturferner Boden) und oftmals durch Bäume verschattet (Baum über naturfernem Boden).

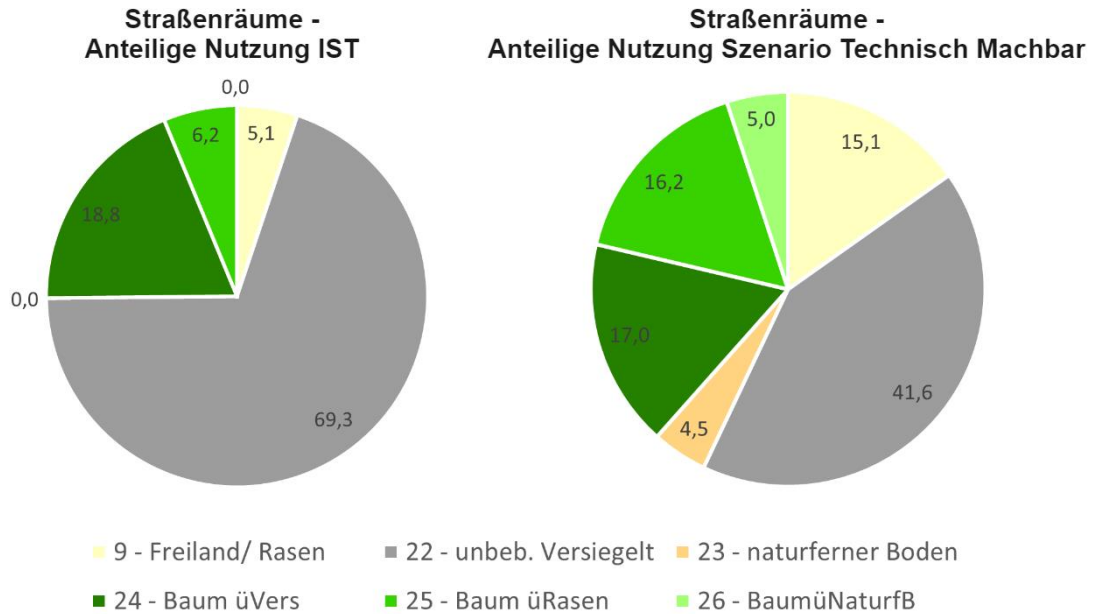


Abbildung 21: Durchschnittliche Flächennutzungsanteile in % in Straßenräumen im Ist-Zustand und im *Szenario des Technisch Machbaren* im Vergleich

Über alle Flurstücksnutzungen hinweg ergibt sich eine starke Reduktion der Versiegelung, größtenteils umgewandelt in Rasen, teilweise in teilversiegelte naturferne Böden. Der Anteil an baumbestandener Fläche hat sich von 23 % auf 36 % erhöht. Etwa die Hälfte des Gebäudebestandes besitzt das Potenzial an Dach und/oder Fassade begrünt zu werden.

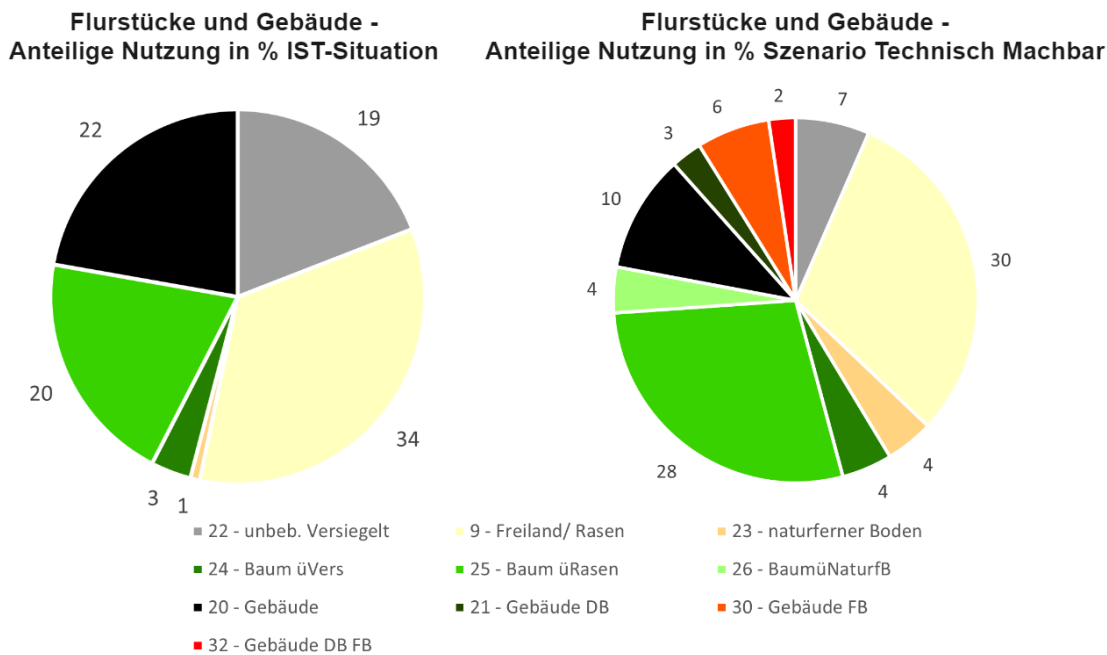


Abbildung 22: Durchschnittliche Flächennutzungsanteile in % auf den Flurstücken im Ist-Zustand und im Szenario des Technisch Machbaren im Vergleich

4.3.4 Temperaturegebnisse

Die im Vergleich zur Referenz-Modellierung abweichenden Modelleingangsparameter und die im Szenario *Technisch machbar* umgesetzten Maßnahmen mit einhergehender Änderung der Nutzungsstruktur, führen sowohl am Tage als auch in der Nacht zu Abweichungen im Temperatur- sowie Strömungsfeld. Im Folgenden werden diese Temperaturabweichungen zwischen Referenzrechnung und dem Szenario *Technisch machbar* in Differenzkarten dargestellt und die bioklimatische Situation der Siedlungs- und Verkehrsflächen betrachtet und ausgewertet.

Die Situation am Tage

Die Auswirkungen der flächendeckend im Szenario *Technisch Machbar* umgesetzten Maßnahmen auf die PET am Tage führen zu einer deutlichen Abkühlung im gesamten Stadtgebiet im Vergleich zur Referenz-Modellierung 2035. Großräumige Entsiegelungs- und Begrünungsmaßnahmen sowie Baumneupflanzungen im Straßenraum, auf Grundstücken und innerhalb von Grünflächen reduzieren die Wärmebelastung gesamtstädtisch um 6,1 °C, sodass das Bonner Stadtgebiet im Mittel statt der ursprünglichen starken Wärmebelastung (38,2 °C) nur noch eine mäßige Hitzebelastung (32,1 °C) aufweist. Gebiete mit extremer Hitzebelastung treten abgesehen von den Flächen in denen keine Maßnahmen umgesetzt wurden (bspw. landwirtschaftliche Flächen, Autobahnen, etc.) nur noch sehr vereinzelt auf.

Bewertung der Klimafunktion am Tage

Im Vergleich zur Referenz-Modellierung 2035 ändern sich in diesem Szenario die Flächenanteile in den einzelnen Bewertungskategorien zur bioklimatischen Situation in den Siedlungs- und Verkehrsflächen sehr stark zum Positiven. Im Szenario *Technisch Machbar* entfallen die Flächen mit sehr ungünstiger bioklimatischer Situation völlig und nur 1 % der Flächen weisen eine starke Hitzebelastung auf. Die übrigen Flächen finden sich nahezu gleichwertig verteilt in der günstigen bzw. mittleren Belastungskategorie wieder. Hierbei erhöht sich der Anteil an Flächen bioklimatisch günstiger Situation von 3 % auf 52 %. Bei den Verkehrsflächen und Plätzen verringert sich der Anteil an Flächen in den beiden höchsten Kategorien thermischer Belastung um 39 %-Punkte, sodass 87 % der Flächen in einer mittleren oder besseren Belastungskategorie liegen (Referenzmodellierung 2035: 48 %).

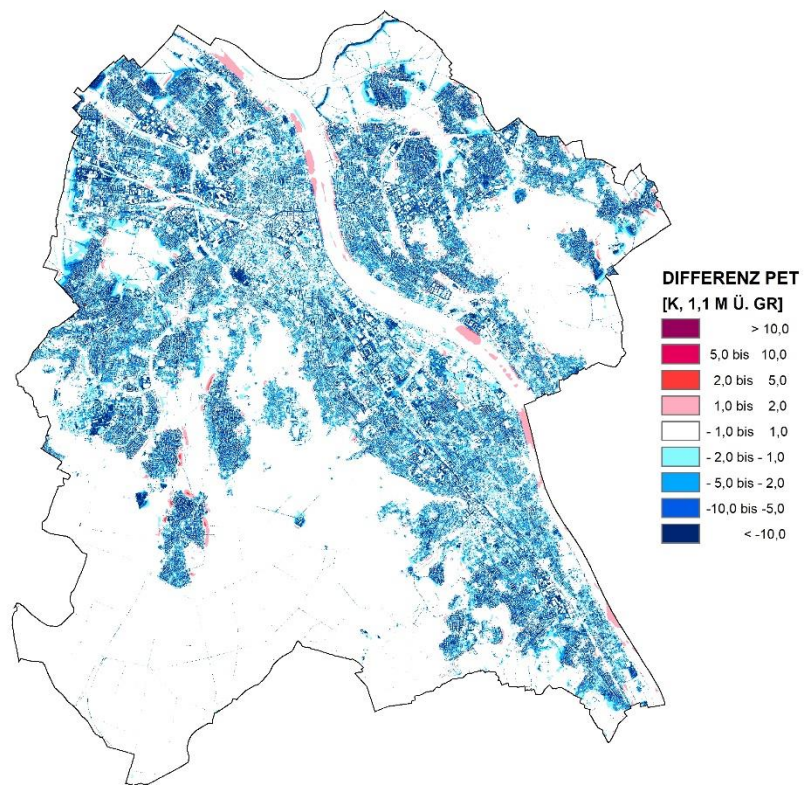


Abbildung 23: Differenz der Physiologisch Äquivalenten Temperatur um 14 Uhr des Szenarios Technisch Machbar und der Referenz-Modellierung 2035

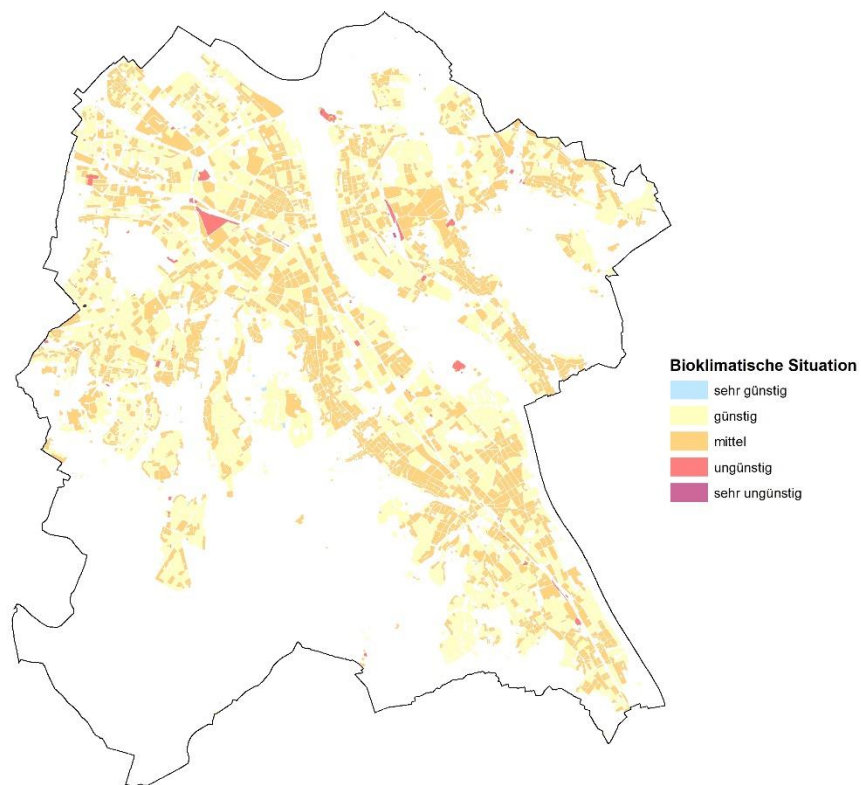


Abbildung 24: Bioklimatische Situation von Siedlungsflächen am Tage im Szenario Technisch Machbar

Die Situation in der Nacht

Die Auswirkungen der Maßnahmen im Szenario *Technisch Machbar* sind in der Nacht ähnlich flächendeckend wie am Tage, allerdings in Bezug auf den Abkühlungseffekt weniger stark ausgeprägt. In der Nacht spielen Verschattungs- und Verdunstungseffekte von Bäumen oder Gebäudebegrünung eine untergeordnete Rolle, sodass sich die Temperaturdifferenzen im Vergleich zur Referenz-Modellierung 2035 in der Nacht größtenteils auf die umfassenden (Teil-)Entsiegelungsmaßnahmen zurückführen lässt.

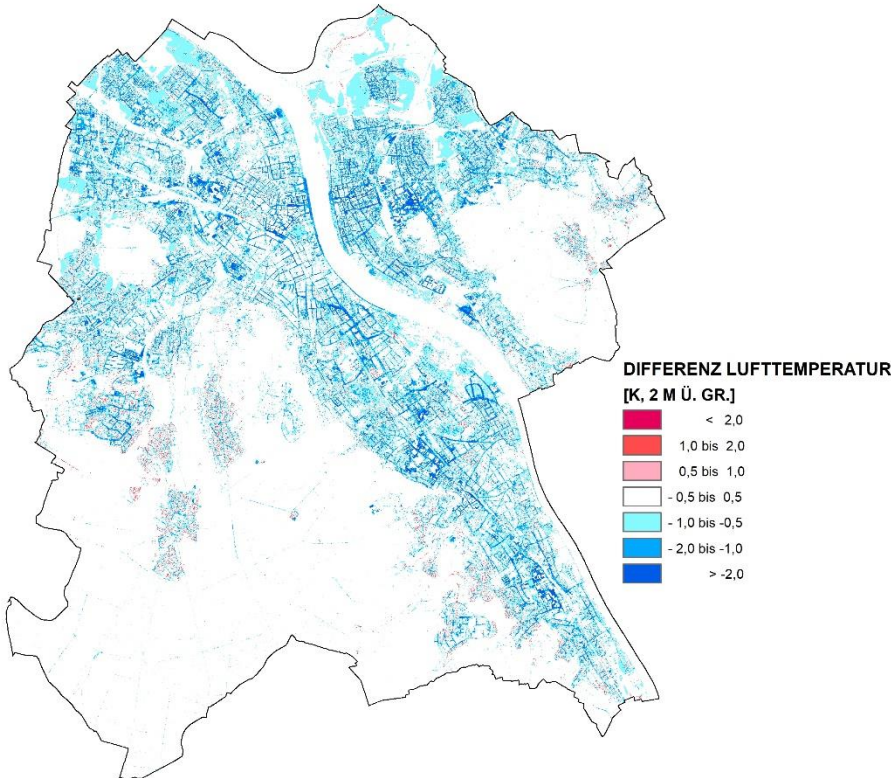


Abbildung 25: Differenz der bodennahen Lufttemperatur um 4 Uhr des Szenarios *Technisch Machbar* und der Referenz-Modellierung 2035

Bewertung der Klimafunktion in der Nacht

Die Flächenanteile der einzelnen Bewertungskategorien zur bioklimatischen Situation in den Siedlungs- und Verkehrsflächen verschieben sich im Vergleich zur Referenz-Modellierung 2035 stark zu Gunsten einer geringen bis mittleren bioklimatischen Situation bzw. Wärmebelastung. Durch die flächendeckend stattfindenden Eingriffe verringert sich der Anteil an Siedlungs- und Gewerbeflächen mit (sehr) ungünstiger bioklimatischer Situation auf insgesamt 19 % (sehr starke Wärmebelastung hiervon nur 1 %). Der überwiegende Teil findet sich mit 76 % in der mittleren Kategorie wieder. Der Anteil an Siedlungsflächen mit günstiger bioklimatischer Situation erhöht sich um 3%- Punkte auf 5 %, während (unverändert zur Referenz-Modellierung 2035) auch im Szenario *Technisch Machbar* keine Flächen mit sehr günstiger bioklimatischer Situation vorliegen. Innerhalb von Plätzen und Verkehrsflächen verbessert sich die Situation im Szenario *Technisch Machbar* insoweit, dass ein Drittel der Flächenanteile nun eine mittlere oder günstige bioklimatische Situation aufweisen (Referenzmodellierung 2035: 7 %) und der Anteil an Flächen mit sehr starker Hitzebelastung sich um 46 % verringert hat.

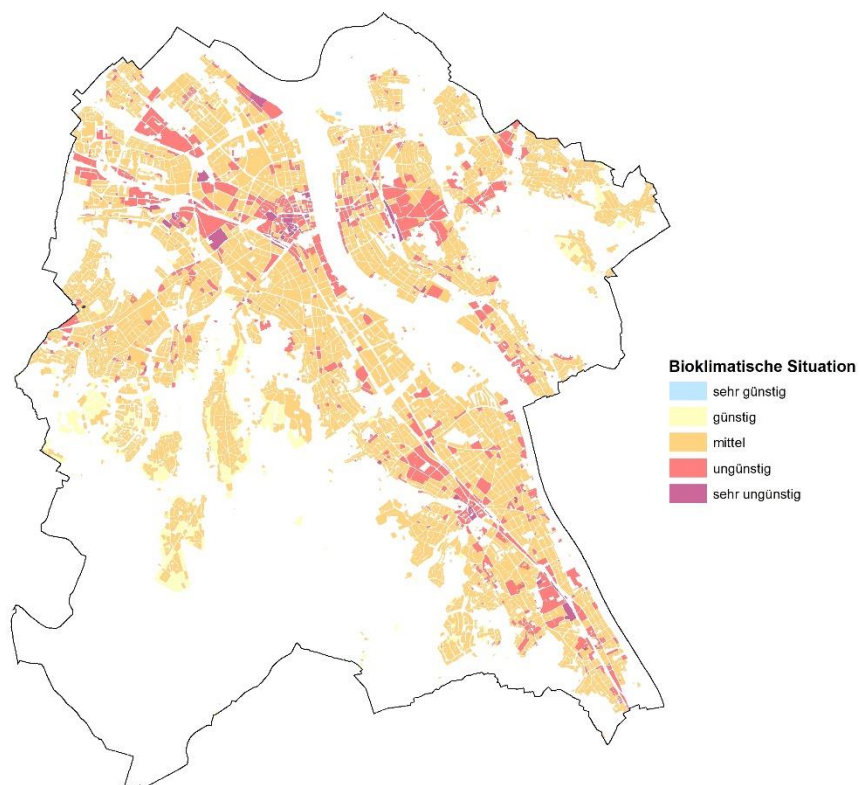


Abbildung 26: Bioklimatische Situation von Siedlungsflächen in der Nacht im Szenario Technisch machbar

4.3.5 Add-On Transformationsgebiete

Neben der Integration grün-blauer Maßnahmen in den Bestand, kann auch eine Änderung der Gebäudestruktur zur Hitzeminderung beitragen. Hierbei gilt es mit der Gebäudestruktur auf nächtliche Kaltluftströmungen, auf die Durchlüftung am Tag und auf das Zusammenspiel mit Grünräumen zu reagieren. Gebäudekubatur, insbesondere ein Bauen in die Höhe statt in die Fläche, Gebäudestellung, -ausrichtung und -körnung können das Lokalklima beeinflussen. Da die Integration dieser Maßnahmen in die Potenzialermittlung nicht automatisiert erfolgen kann und das Forschungsprojekt einen Fokus auf den Gebäudebestand legt, werden diese Maßnahmen nur in exemplarischen Teilräumen in die Potenzialermittlung integriert. Für drei Testgebiete wird die Gebäudestruktur durch einen händischen Entwurf klimatisch optimiert, anschließend werden die Denkalgorithmen des *Szenarios des Technisch Machbaren* zur Potenzialermittlung von grün-blauen Maßnahmen auf die Gebiete angewendet.



Das *Add-On Transformationsgebiete* dient dem exemplarischen Testen klimatischer Verbesserungsoptionen im Zuge von Nachverdichtung und Gebietstransformationen und soll das Wirkungsspektrum der grün-blauen Maßnahmen im Bestand ergänzen. Der händische Entwurf der klimaoptimierten Gebäudestruktur stellt dabei keinen „Umsetzungsplan“ bzw. städtebaulichen Entwurf für die ausgewählten Gebiete dar, da Restriktionen wie Eigentum, Wirtschaftlichkeit, konkrete Nutzungen und Denkmalschutz nicht berücksichtigt wurden.

Für einen großen Erkenntnisgewinn sind drei Gebiete mit sehr unterschiedlichen Charakteristika und Herausforderungen ausgewählt: ein Gewerbegebiet, ein Wohngebiet mit lockerer Zeilenbebauung und Blockrandstruktur und eine Zentrumslage. Alle drei Gebiete weisen bereits heute eine hohe nächtliche Hitzebelastung und teilweise auch eine hohe Hitzebelastung am Tag auf. In zwei Gebieten besteht Verbesserungspotenzial bezüglich der nächtlichen Kaltluftabflüsse. Eine Anpassung an die Hitze könnte unter dem Begriff „Klima-Sanierungsgebiet“ argumentiert werden. In zwei Gebieten soll vorhandenes Innenentwicklungspotenzial genutzt werden, um dessen Wirkung auf das Lokalklima zu analysieren.

Typ Gewerbegebiet

Zielformulierung:

- Verbesserung der klimatischen Situation insb. am Tag und eine allgemein höhere Aufenthaltsqualität
- Mindestens gleichbleibende Verfügbarkeit an Gewerbe- und Dienstleistungsflächen und Erhöhung der Nutzungsmischung

Konzeption (Abbildung 27):

- Geringerer Footprint (Grundflächenzahl, GRZ) der Gebäude durch Ersatzneubauten, Aufstockung und Stapelung von Nutzungen
- Geringerer Versiegelungsgrad im Außenbereich durch Reduktion von versiegelten Stellplatzflächen und Nutzung von Parkhäusern und Teilentsiegelung, sowie Verschattung der Park-, Lager- und Wegeflächen durch Bäume
- Vernetzte Grünstruktur mit verschatteten grünen linearen Verbindungen und kleinen verschatteten Grünräumen innerhalb der Baublöcke, um eine Kühlung des Gebiets aus sich heraus zu gewährleisten
- Grün-blaues Maßnahmenpotenzial (Gebäudebegrünung, Freiraum- und Straßennutzung) entsprechend *Szenario des Technisch Machbaren* integrieren.



Abbildung 27: Konzeptskizze Klimaoptimierte Siedlungsstruktur im Typ Gewerbe

Nutzungsänderung:

- Die Aufteilung der Nutzungsklassen entspricht in etwa den Anteilen des „Szenario des Technisch Machbaren“. Der Gebäude-Footprint hat leicht abgenommen, der Anteil teilversiegelter Flächen leicht zugenommen.

Temperaturergebnisse:

- Deutliche Verbesserung der klimatischen Situation am Tage (s. Abb. 28). Die Physiologisch Äquivalente Temperatur reduziert sich im Zuge der Umstrukturierung und Maßnahmenwirkungen flächendeckend um durchschnittlich 7,9 °C von 41,0 °C (extreme Hitzebelastung) auf 33,1 °C (mäßige Hitzebelastung) innerhalb des Gewerbegebietes.
- Leichte Reduktion der Wärmebelastung in der Nacht um durchschnittlich 0,9 °C (Referenzmodellierung 2035: 20,6 °C, Transformationsgebiete: 19,7 °C; Abb. 29).

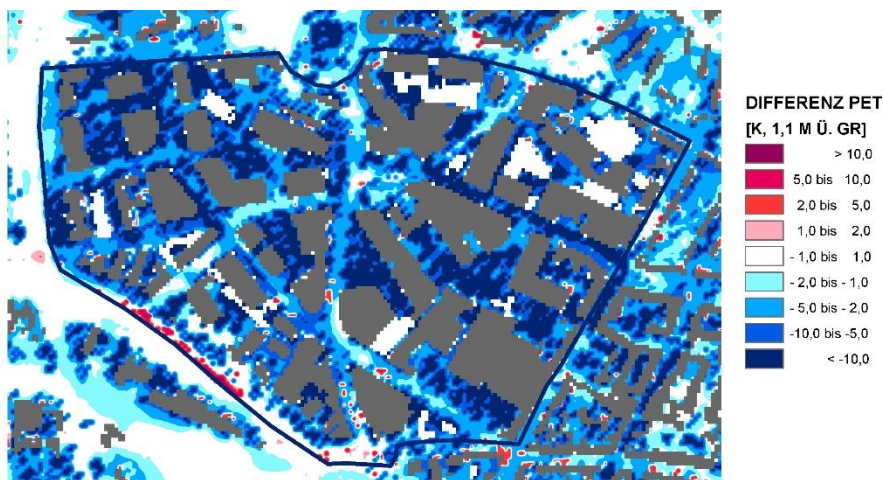


Abbildung 28: Differenz der Physiologisch Äquivalenten Temperatur um 14 Uhr des Add Ons Transformationsgebiete und der Referenz-Modellierung 2035 (Typ Gewerbegebiet)

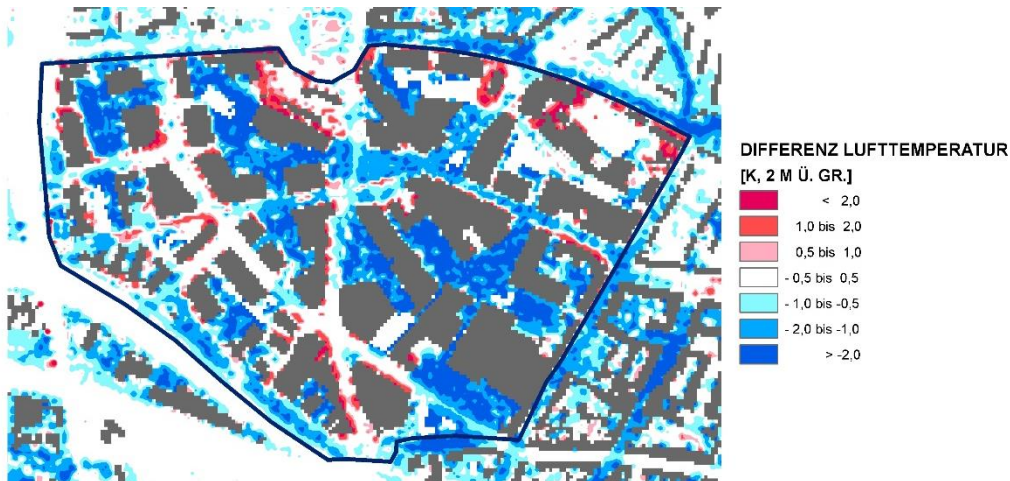


Abbildung 29: Differenz der bodennahen Lufttemperatur um 4 Uhr des Add Ons Transformationsgebiete und der Referenz-Modellierung 2035 (Typ Gewerbegebiet)

Typ Wohngebiet (Zeilenbebauung und Blockrand)

Zielformulierung:

- Verbesserung der klimatischen Situation am Tag und eine allgemein höhere Aufenthaltsqualität
- Verbesserung der klimatischen Situation in der Nacht u.a. durch einen verbesserten Transport nächtlicher Kaltluft in den Siedlungskörper
- Verbesserte Verfügbarkeit an Wohnraum

Konzeption (Abbildung 30):

- Ersatz von Bestandsgebäuden mit großer Hinderniswirkung auf die Kaltluft durch Gebäude mit optimierter Gebäudestellung und -kubatur zur Optimierung der nächtlichen Kaltluftdurchströmung.
- Aufstockungen und Anbauten im Bereich der Zeilenbebauung
- Transformation eines mischgenutzten Quartiers mit Leerstand in ein neues Wohngebiet mit ausreichend Grünraum und Verschattung zur Kühlung
- Grün-blaues Maßnahmenpotenzial (Gebäudebegrünung, Freiraum- und Straßennutzung) entsprechend *Szenario des Technisch Machbaren* integrieren.



Abbildung 30: Konzeptskizze Klimaoptimierte Siedlungsstruktur im Typ Wohnen

Nutzungsänderung:

- Die Aufteilung der Nutzungsklassen entspricht in etwa den Anteilen des *Szenarios des Technisch Machbaren*. Der Gebäude-Footprint hat leicht abgenommen, der Anteil an Rasenflächen leicht zugenommen. Der Unterschied liegt in erster Linie in den Gebäudehöhen und der Gebäudeausrichtung.

Temperaturergebnisse:

- Verbesserung der Aufenthaltsqualität am Tage vor allem im nördlichen Bereich aufgrund großzügiger Entsiegelungs- und Begrünungsmaßnahmen. Im südlichen Bereich des Transformationsgebietes etwas geringere Auswirkungen auf die bioklimatische Situation, da hier bereits in der Referenz-Modellierung 2035 ein vergleichsweise hoher Grünanteil vorliegt. Im Mittel verringert sich die Physiologisch Äquivalente Temperatur im Wohngebiet um 2,9 °C von 37,0 °C in der Referenz-Modellierung 2035 auf 34,1 °C (Abbildung 31).
- Die nächtliche Wärmebelastung reduziert sich im Vergleich zur Referenz-Modellierung 2035 (19,3 °C) um durchschnittlich 2,5 °C, was für die Nachtsituation eine beachtliche Abkühlung bedeutet (Abbildung 32). Hier spielen sowohl die Entsiegelungsmaßnahmen als auch die Optimierung der Gebäudekörperstellung in Bezug auf den Kaltlufttransport eine Kernrolle.
- Die Drehung der Gebäudekörper in Richtung des nächtlichen Kaltluftvolumenstroms sowie die Verminderung der Hinderniswirkung quer zur Strömungsrichtung stehender Ge-

bäudekomplexe durch den Einsatz von Einzelbauten mit höherer Körnigkeit, führt im Süden des Areals zu einer Erhöhung des Kaltluftvolumenstroms, welcher zudem Kaltluft weit in das Wohngebiet zu transportieren vermag (Abbildung 33).

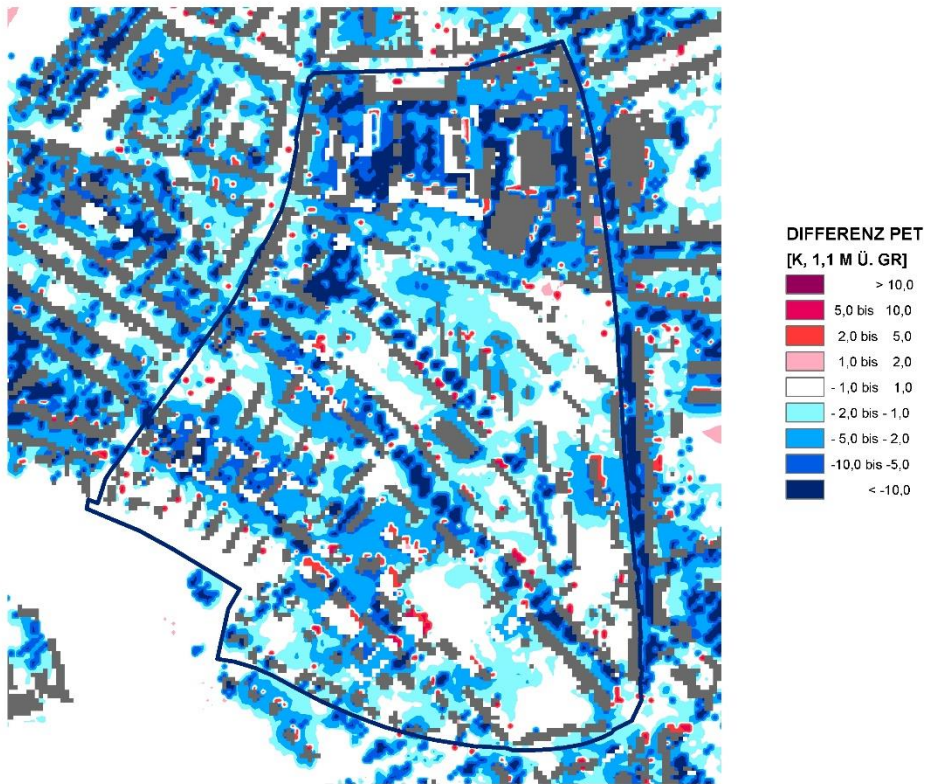


Abbildung 31: Differenz der Physiologisch Äquivalenten Temperatur um 14 Uhr des Add Ons Transformationsgebiete und der Referenz-Modellierung 2035 (Typ Wohngebiet)

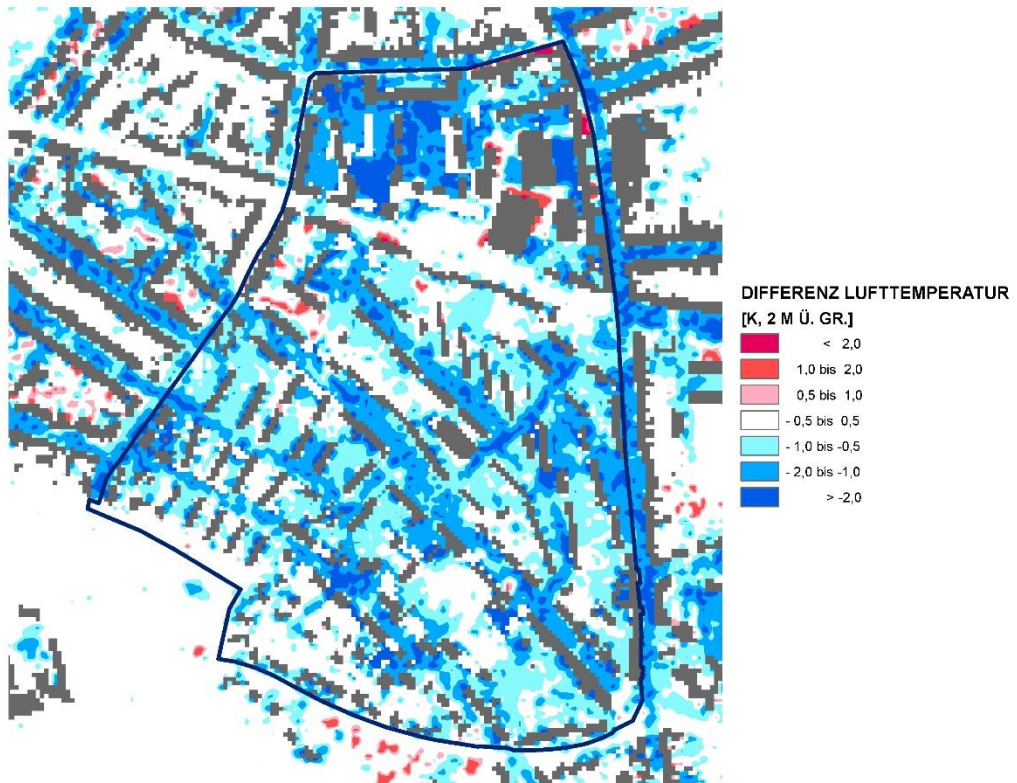


Abbildung 32: Differenz der bodennahen Lufttemperatur um 4 Uhr des Add Ons Transformationsgebiete und der Referenz-Modellierung 2035 (Typ Wohngebiet)

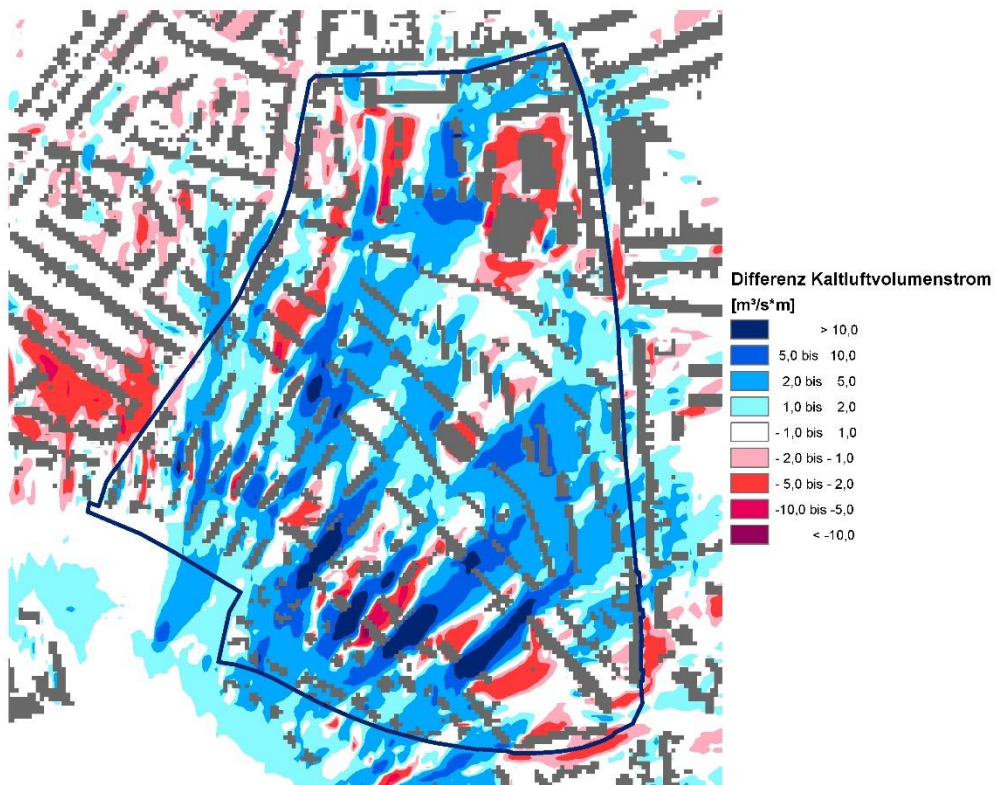


Abbildung 33: Differenz des Kaltluftvolumenstroms um 4 Uhr des Add Ons Transformationsgebiete und der Referenz-Modellierung 2035 (Typ Wohngebiet)

Typ Zentrum

Zielformulierung:

- Verbesserung der klimatischen Situation am Tag und eine allgemein höhere Aufenthaltsqualität
- Verbesserung der klimatischen Situation in der Nacht u.a. durch einen verbesserten Transport nächtlicher Kaltluft in die Fußgängerzone und die Blockinnenbereiche
- Mindestens gleichbleibende Verfügbarkeit an Dienstleistungsflächen und Wohnraum

Konzeption (Abbildung 34):

- Ersatz von Bestandsgebäuden mit großer Hinderniswirkung auf die Kaltluft durch Gebäude mit optimierter Gebäudestellung und -kubatur zur Optimierung der nächtlichen Kaltluftdurchströmung
- Fußgängerzone als urbane Frisch- und Kaltluftschneise mit verschatteten Wegeflächen, Grünflächen und teilversiegelten Bodenbelägen
- Punktuelle Öffnung der Blockrandbebauung hin zur Kaltluftströmung und Entkernung der Innenhöfe
- Neubauten und Aufstockungen zur Sicherung der Dienstleistungs- und Wohnfläche
- Grün-blaues Maßnahmenpotenzial (Gebäudebegrünung, Freiraum- und Straßennutzung) entsprechend *Szenario des Technisch Machbaren* integrieren.



Abbildung 34: Konzeptskizze Klimaoptimierte Siedlungsstruktur im Typ Zentrum

Nutzungsänderung:

- Die Aufteilung der Nutzungsklassen weicht leicht von den Anteilen des *Szenarios des Technisch Machbaren* ab. Der Gebäude-Footprint hat abgenommen (-5 %Punkte), weitere versiegelte Flächen sind teilentsiegelt worden (+13 %Punkte naturferner Boden). Der Anteil an Bäumen ist etwa gleichbleibend. Der Unterschied liegt in erster Linie in den Gebäudehöhen und der Gebäudestellung.

Temperaturergebnisse:

- Die klimatische Situation am Tage verbessert sich im gesamten Transformationsgebiet Typ Zentrum von einer starken Hitzebelastung (38,3 °C) um durchschnittlich 5,3 °C auf 33,0 °C zu einer mäßigen Hitzebelastung 2035 (Abbildung 35).
- Die Reduktion der Wärmebelastung in der Nacht betrifft flächendeckend nahezu das gesamte betrachtete Areal und beträgt durchschnittlich 2,2 °C im Vergleich zur Referenz-Modellierung 2035 (21,1 °C; Abbildung 36).
- Die sehr großzügigen (Teil-)Entsiegelungen und Umbaumaßnahmen der Gebäude führen zu dieser für nächtliche Verhältnisse sehr deutlichen Abkühlung. Durch die an die Kaltluftströmung angepasste Gebäudestellung, mit Öffnung des Areals im Südwesten sowie einer Verbreiterung der Kaltluftschneise gelangt mehr Kaltluft bis tief in das Zentrum (Abbildung 37). In den an die Fußgängerzone angrenzenden Bereichen hingegen verringert sich der Kaltluftvolumenstrom wiederum, da die Umstrukturierung dort eine Hinderniswirkung auf den Kaltlufttransport hat.

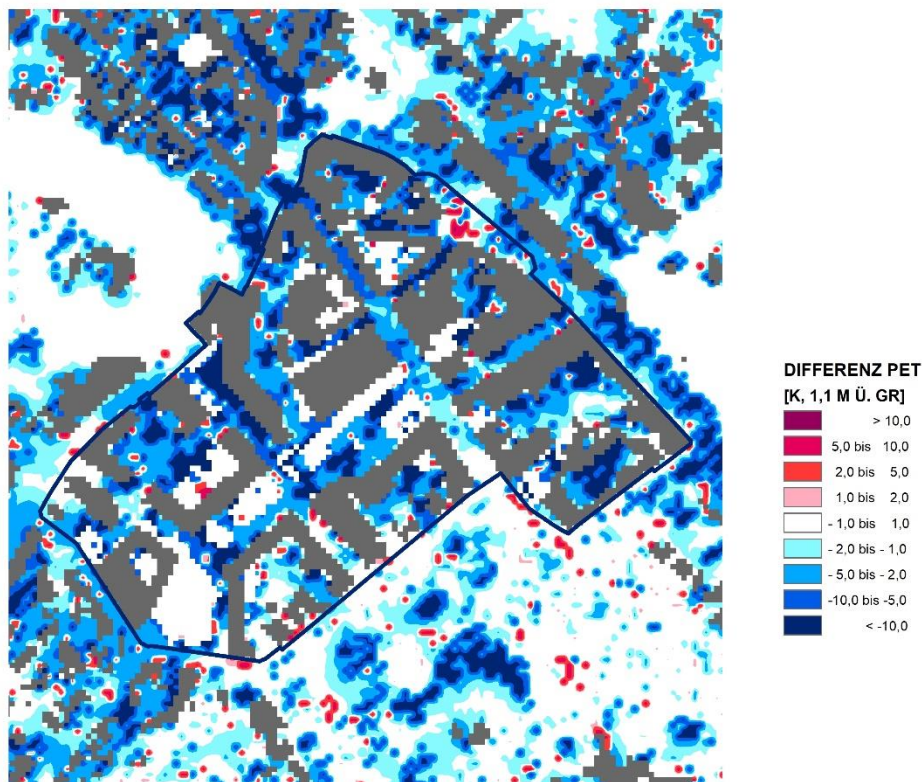


Abbildung 35: Differenz der Physiologisch Äquivalenten Temperatur um 14 Uhr des Add Ons Transformationsgebiete und der Referenz-Modellierung 2035 (Typ Zentrum)

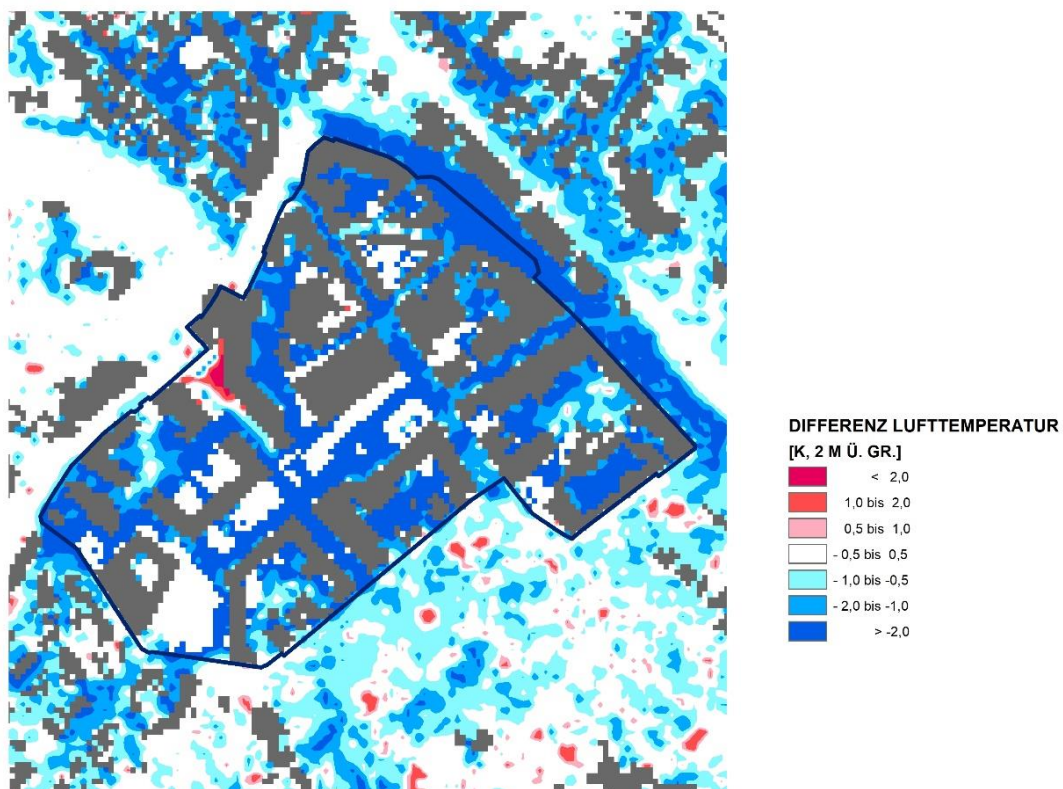


Abbildung 36: Differenz der bodennahen Lufttemperatur um 4 Uhr des Add Ons Transformationsgebiete und der Referenz-Modellierung 2035 (Typ Zentrum)

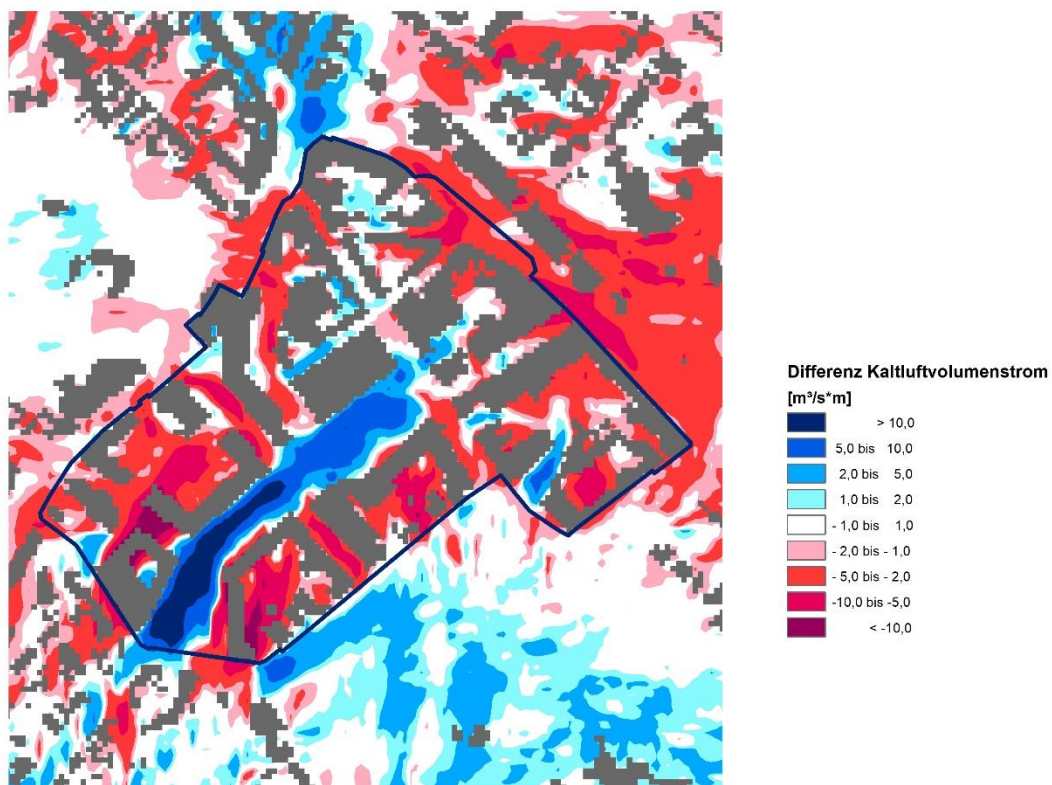


Abbildung 37: Differenz des Kaltluftvolumenstroms um 4 Uhr des Add Ons Transformationsgebiete und der Referenz-Modellierung 2035 (Typ Zentrum)

4.4 Exkurs Rückwärts-Modell (Neuronales Netzwerk)

Die Potenzialermittlung und die Umsetzung der Maßnahmen in den einzelnen Szenarien des Projektes spiegelt ein klassisches Verfahren wieder. Dabei wird zunächst die gegenwärtige klimaökologische Situation der Stadt betrachtet und mit Zuhilfenahme eines Klimasignals in die Zukunft transferiert. Auf Grundlage der zukünftigen Situation werden Anpassungspotenziale gearbeitet und unter Rücksichtnahme eventueller Restriktionen (Denkmalschutz, etc.) gesamtstädtisch grün-blaue Maßnahmen verteilt, welche das Stadtklima verbessern sollen. Die Ergebnisse dienen dazu stadtklimatische Ziele (bspw. Verbesserung der Aufenthaltsqualität auf öffentlichen Plätzen, Reduktion der nächtlichen Lufttemperatur in belasteten Siedlungsflächen, etc.) zu bestärken, weiter auszuführen und Umsetzbarkeiten aufzuzeigen.

Eine weitere Herangehensweise ist es, detaillierte stadtklimatische Ziele (bspw. die Einhaltung fester Temperaturgrenzwerte je Nutzungsklasse) zu formulieren und ein Modell zu entwickeln, welches eine Aussage zu den, für die Erreichung des Ziels, nötigen Maßnahmen trifft - quasi ein Rückwärts-Modell. Während bei dem klassischen Verfahren die Frage „*Welche Wirkung auf das Mikroklima erzielen die im Modell umgesetzten Maßnahmen?*“ beantwortet wird, gibt das Rückwärts-Modell Auskunft auf die Frage „*Wie müssen grün-blaue Maßnahmen in der Stadt verteilt werden um einen bestimmten Effekt auf das Stadtklima zu erzielen?*“

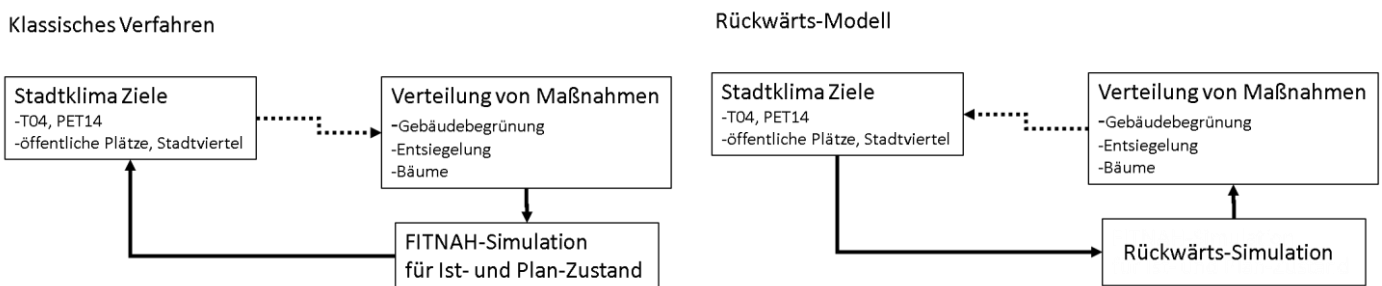


Abbildung 38: Systematik Klassisches Verfahren und Rückwärts-Modell

Für die Entwicklung des Rückwärts-Modells wurde zunächst ein erstes neuronales Netzwerk mithilfe der FITNAH-Ergebnisse zur Physiologisch Äquivalenten Temperatur um 14 Uhr aus der Stadtklimaanalyse trainiert, welches die Maßnahmeneffekte am Tage erfasst. Die Trainingsdaten setzen sich aus den Ergebnissen der Ist-Situation, der Referenz Zukunft 2035 (ohne Maßnahmen) sowie zehn zufälliger Planzustände mit Maßnahmen zusammen. Bei den Maßnahmen handelt es sich um Fassaden- und Dachbegrünungen sowie deren Kombination. Als Output liefert das neuronale Netzwerk eine gitterpunktweise Vorhersage von FITNAH-Simulationsergebnissen als Differenz der Referenz Zukunft 2035 mit Maßnahmen zur Referenz Zukunft 2035 ohne Maßnahmen.

Indem das neuronale Netzwerk sehr oft (eine Millionen Mal) mit zufälligen Planzuständen mit Maßnahmen angewendet wurde, wurde ein zweites neuronales Netzwerk, das Rückwärts-Modell trainiert. In das Modell fließen die Maßnahmeneffekte auf die Physiologisch Äquivalente Temperatur um 14 Uhr, gemittelt auf 200 x 200 m, ein. Als Ergebnis liefert das Rückwärtsnetzwerk die Verteilung von zusätzlichen Gebäudebegrünungsmaßnahmen auf Bestandsgebäuden.



Abbildung 39: Funktionsweise des Rückwärtsnetzwerks.

Abbildung 39 veranschaulicht die Funktionsweise des Rückwärtsmodells am Beispiel der Fassadenbegrünung. Für vier verschiedene große Bereiche im Stadtgebiet Bonn wurden Vorgaben für die Änderung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur um 14 Uhr getroffen (Bild Mitte). Jeder Rasterpunkt beträgt hierbei eine Auflösung von 200 m. Die vorgegebene Temperaturdifferenz in diesem Beispiel beträgt zwischen -0,5 (hellblau) und -2 °C (blau). Das Rückwärtsnetzwerk platziert entsprechend der gewünschten Temperaturreduktion die zusätzlich nötige Fassadenbegrünung (rechtes Bild), hier dargestellt als zusätzlicher prozentualer Anteil von 0 - 10 % (hell zu dunkelgrün) pro 200 x 200 m Rasterpunkt.

Ziel ist es, sowohl die Ergebnisse des neuronalen Netzwerks als auch des Rückwärtsnetzwerks weiter zu verbessern, zusätzliche Maßnahmen zu implementieren (Bäume, Entsiegelung, etc.) und auf weitere Klimaparameter wie bspw. die nächtliche Lufttemperatur und Kaltluftvolumenströme anzuwenden.

5 Wesentliche Erkenntnisse für die Hitzevorsorge in Bonn

Die verschiedenen Potenzialermittlungen und Klimamodellierungen der Szenarien bilden ein großes Spektrum an Forschungsergebnissen. In diesem Kapitel werden über alle Szenarien hinweg, die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst.

5.1 Was ist durch Hitzevorsorge möglich?

Erkenntnis 1: Hitzeminderung ist möglich und Belastungen können erfolgreich verhindert werden.

Das *Szenario des Technisch Machbaren 2035* zeigt, dass durch eine flächendeckende sehr ambitionierte Umsetzung „klassischer“ grün-blauer Maßnahmen, die Hitzebelastung auch in Zukunft unter Klimawandelbedingungen in großen Teilen der Stadt Bonn im Zeithorizont 2035 nicht zu einer starken Belastung für die Bevölkerung werden muss. Aus dem Szenario lassen sich folgende Erkenntnisse zur Wirksamkeit ambitionierter Klimaanpassung ableiten:

Die Referenz 2035 verdeutlicht, dass ohne Hitzeminderungsmaßnahmen nur sehr wenige Siedlungsbereiche am Tag und in der Nacht im Bereich günstiger und mittlerer bioklimatischer Belastung bleiben. Dies ist größtenteils nur im Bereich von Kaltluftabflüssen am Siedlungsrand in aufgelockerter Bebauung oder in Zeilenbebauung mit einem hohen Anteil an gebäudebezogenem Grünraum vorzufinden. Sollte in diesen Gebieten allerdings nachverdichtet werden, ist zwingend auf einen Ausgleich durch Hitzeminderungsmaßnahmen zu achten, da sonst mit einer bioklimatischen Belastung zu rechnen ist.

Die gute Nachricht ist, dass viele in der Referenz 2035 belastete Siedlungsbereiche durch das Maßnahmenpektrum des *Szenarios des Technisch Machbaren* aus den ungünstigen bioklimatischen Verhältnissen herauszuholen sind. Flächendeckende Hitzeminderungsmaßnahmen sind wirksam und können insbesondere am Tag dafür sorgen, dass keine hohen Belastungen mehr bestehen. Im Vergleich zur Referenz 2035 verringert sich die Physiologisch Äquivalente Temperatur der Siedlungs- und Verkehrsflächen im *Szenario des Technisch Machbaren* tagsüber gesamtstädtisch um 4,2 °C auf 33,9 °C.

Allerdings gilt es zu berücksichtigen, dass gebietsweise und besonders im Straßenraum große Anstrengungen notwendig sind, um das Szenario Wirklichkeit werden zu lassen. Der aktuelle Baumbestand muss sich von etwa 320.000 Bestandsbäumen im Siedlungsgebiet (ohne Waldareale) auf etwa 500.000 Bäume im Siedlungsgebiet vervielfachen. Von etwa 1.800 ha versiegelter Fläche (ohne Gebäude) im Siedlungsgebiet müssen 500 ha versiegelte Fläche in Rasen umgewandelt werden, weitere 500 ha in teilversiegelte Böden wie wassergebundene Bodenbeläge oder Rasengittersteine. Zudem wurde in der Modellierung des Szenarios an 13.000 Gebäuden (mit Gebäudehöhe unter 6 m) ein Gründach angenommen und an 65.000 Gebäuden eine Fassadenbegrünung.

Referenz Zukunft 2035

Szenario Technisch Machbar 2035

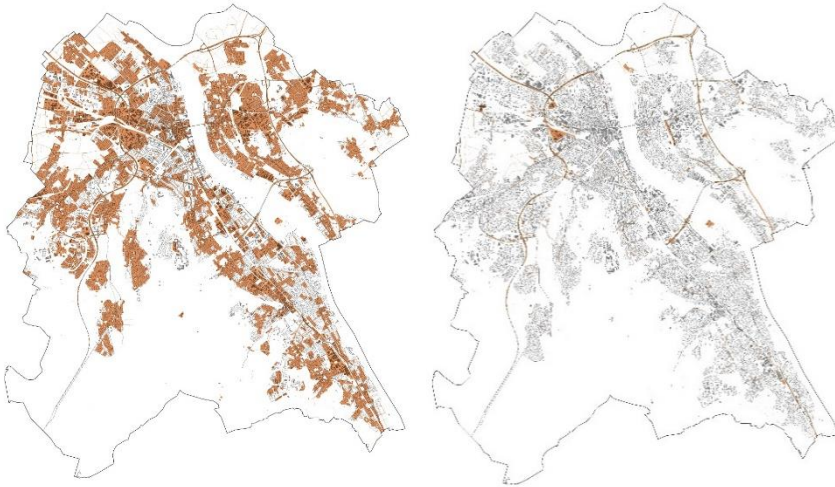


Abbildung 40: Siedlungsgebiete mit Hitzebelastung am Tag in der Referenz 2035 (links, in orange); Siedlungsgebiete mit Hitzebelastung am Tag im Szenario des Technisch Machbaren (rechts, in orange).

Referenz Zukunft 2035

Szenario Technisch Machbar 2035

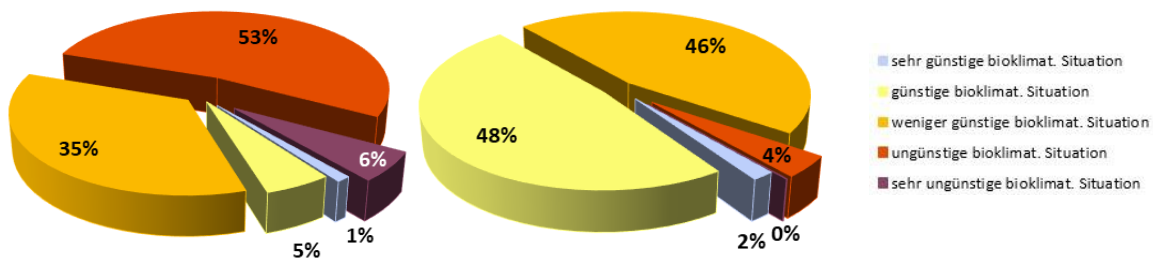


Abbildung 41: Prozentuale Verteilung der Bewertungsklassen am Tage für die Siedlungs- und Verkehrsflächen der Referenz-Modellierung 2035 (links) und dem Szenario des Technisch Machbaren 2035 (rechts)

Erkenntnis 2: Hitzevorsorge hat Grenzen: sehr breites Maßnahmenpektrum nutzen.

Die Maßnahmen des Szenarios des Technisch Machbaren führen auch zu einer deutlichen Verbesserung der Nachtsituation. Gesamtstädtisch verringert sich die nächtliche Lufttemperatur im Szenario des Technisch Machbaren um 0,7 °C auf 18,8 °C im Vergleich zur Referenz 2035 (19,5 °C). In einigen Siedlungsgebieten bestehen die ungünstigen bioklimatischen Verhältnisse allerdings trotz grün-blauer Maßnahmen weiter. Dies sind insbesondere dichte Strukturen mit wenig Grünanteil in den Zentrumsbereichen, Gewerbestrukturen und Verkehrsflächen, die kein bis wenig Potenzialraum für grün-blaue Maßnahmen aufweisen. In diesen Gebieten reichen die in das Szenario integrierten Maßnahmen nicht aus. Dies kann unter anderem auf eine im Modell angewendete, nicht ausreichende oder optimale Maßnahmenkombination zurückgeführt werden. Allerdings wird eine noch flächenhaftere Umsetzung von Maßnahmen als sehr unwahrscheinlich gesehen.

Die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse lassen aber darauf schließen, dass in gewissen Strukturen bereits heute sowie bei fortschreitendem Klimawandel die Grenzen der Hitzevorsorge hinsichtlich ausreichend umsetzbarer Maßnahmen erreicht werden. Hier sollte das Maßnahmenpektrum um verhaltensbezogene Maßnahmen (Hitzeaktionsplanung), Anpassungen am Gebäude zur Kühlung der Rauminnentemperatur (bspw. Gebäudeverschattung, Dämmung) und Möglichkeiten zur städtebaulichen Transformation (veränderte Ausrichtung von Gebäuden, durchlässigere Strukturen etc.) erweitert werden.

Referenz Zukunft 2035

Szenario Technisch Machbar 2035



Abbildung 42: Siedlungsgebiete mit Hitzebelastung in der Nacht in der Referenz 2035 (links, in rot); Siedlungsgebiete mit Hitzebelastung in der Nacht im Szenario des Technisch Machbaren (rechts, in rot).

Referenz Zukunft 2035 Szenario Technisch Machbar 2035

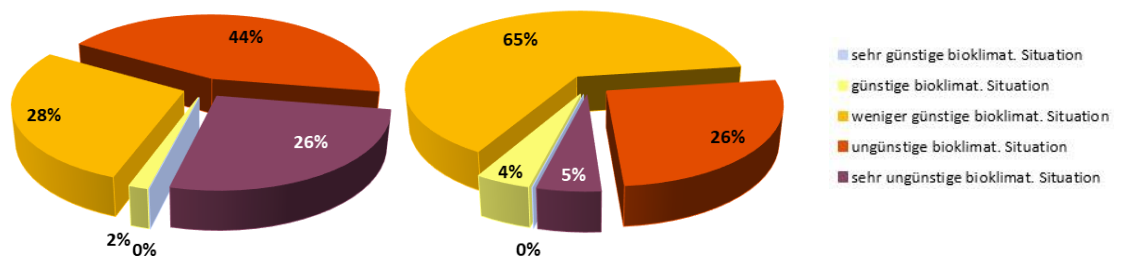


Abbildung 43: Prozentuale Verteilung der Bewertungsklassen in der Nacht für die Siedlungs- und Verkehrsflächen der Referenz-Modellierung 2035 (links) und dem Szenario des Technisch Machbaren 2035 (rechts)

Möglichkeiten weiterer Klimaanpassungsmaßnahmen:

Zusätzlich zu den klassischen grün-blauen Maßnahmen, die in das Modell eingeflossen sind, können weitere Maßnahmen zu einer Reduktion der Außentemperatur oder zu einer Reduktion der Innentemperatur in Gebäuden führen. Diese Maßnahmen konnten aufgrund technischer Restriktionen nicht in die Potenzialermittlung und Klimawirkungsanalyse integriert werden.

Folgende Maßnahmen zur Reduktion der Außentemperatur sind insbesondere dann zu wählen, wenn die „klassischen“ Maßnahmen aufgrund von Restriktionen nicht umsetzbar sind (Details siehe Maßnahmenkatalog, Kap. 2.3)

- Technische Verschattung im Freiraum (Sonnensegel, Pergolen) statt Verschattung durch Stadtbäume
- Begrünte Pergolen im Freiraum statt Verschattung durch Stadtbäume
- Hohe Albedo bei Dachmaterialien statt Dachbegrünung
- Hohe Albedo bei Fassadenmaterialien statt Fassadenbegrünung
- Hohe Albedo bei Bodenbelägen bzw. innovative Materialien für Straßenbeläge statt (Teil-) Entsiegelung

Folgende Maßnahmen zur Reduktion der Außentemperatur können bei entsprechenden Gegebenheiten umgesetzt werden:

- Entdolung von Fließgewässern
- Wasseranlagen mit bewegtem Wasser (Sprühnebel, Vertikale Wasserläufe etc.)

- Klimawirksame Begrünung von landwirtschaftlichen Flächen
- Nutzung von Prozesswärme statt Abgabe in die Umgebung

Trotz Umsetzung von grün-blauen Maßnahmen im Außenraum und an Gebäuden wird es Gebiete geben, die weiterhin insbesondere in der Nacht von Hitzebelastung betroffen sind. Besonders in diesen Gebieten und in Gebäuden mit vulnerablen Bevölkerungsgruppen sollten weitere Maßnahmen zur Reduktion der Innenraumtemperatur von Gebäuden zum Einsatz kommen:

- Gebäudedämmung für eine geringere Wärmeaufnahme der Gebäude durch Fassade und Fenster
- Technische Verschattung am Gebäude selbst durch bspw. Markisen oder eine angepasste Baukonstruktion
- Notfalls technische effiziente Gebäudekühlung wie bspw. Erdkältenutzung

Zudem besteht eine Bandbreite an sinnvollen Maßnahmen im Bereich Gesundheitsvorsorge, die nicht die gefühlte Temperatur außerhalb oder in Gebäuden beeinflussen, sondern die Bevölkerung resilienter gegen die Hitzebelastung werden lassen wie bspw. Trinkwasserspender im öffentlichen Raum oder Informationsverbreitung bei Hitzewarnung.

Erkenntnis 3: Ein „Weiter wie bisher“ reicht nicht – flächendeckende Maßnahmenumsetzung ist erforderlich.

Trotz durchaus ambitionierter Maßnahmenumsetzung bleiben im Szenario *Weiter wie bisher* viele Siedlungsbereiche am Tag und bzw. oder in der Nacht im Bereich hoher Hitzebelastung. Tagsüber reduziert sich die Physiologisch Äquivalente Temperatur innerhalb der Siedlungs- und Verkehrsflächen im Mittel um 0,2 °C und in der Nacht um durchschnittlich 0,1 °C im Vergleich zur Referenz-Modellierung 2035. Die Maßnahmen in diesem Szenario reichen nicht aus, um die Stadt Bonn effektiv gegen Hitzebelastung zu schützen.

Referenz Zukunft 2035

Szenario Weiter wie bisher 2035

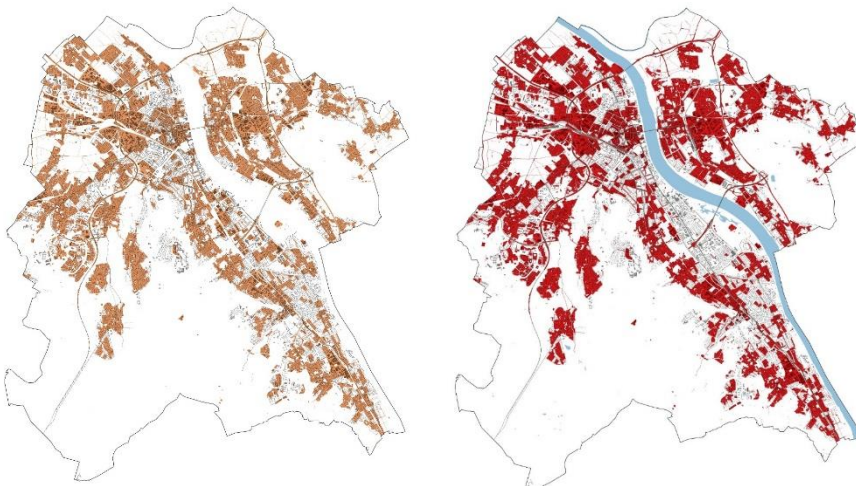


Abbildung 44: Siedlungsgebiete mit Hitzebelastung am Tag in der Referenz 2035 (links, in orange); Siedlungsgebiete mit Hitzebelastung am Tag im Szenario *Weiter wie bisher* (rechts, in rot).

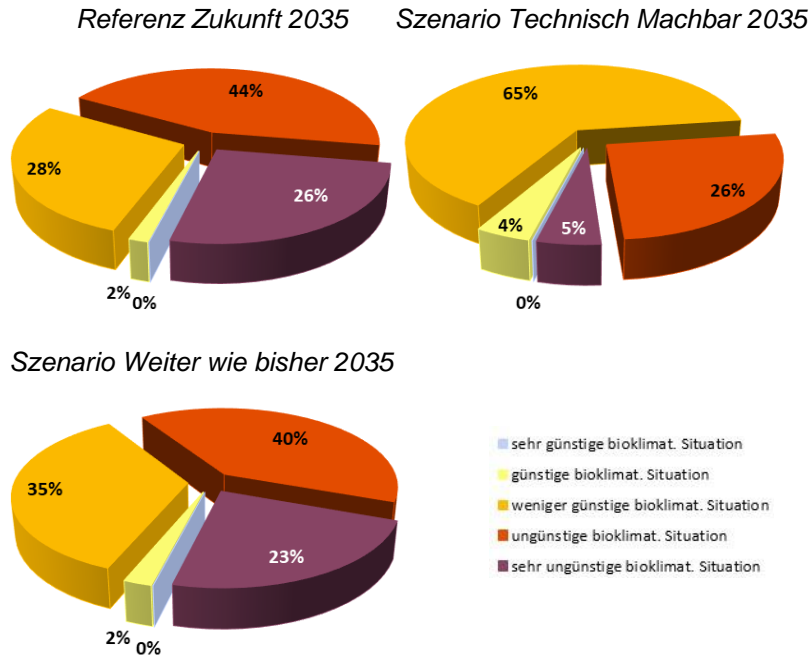


Abbildung 45: Prozentuale Verteilung der Bewertungsklassen in der Nacht für die Siedlungs- und Verkehrsflächen der Referenz-Modellierung 2035 (links oben), dem Szenario des Technisch Machbaren 2035 (rechts oben) und dem Szenario Weiter wie bisher 2035 (links unten)

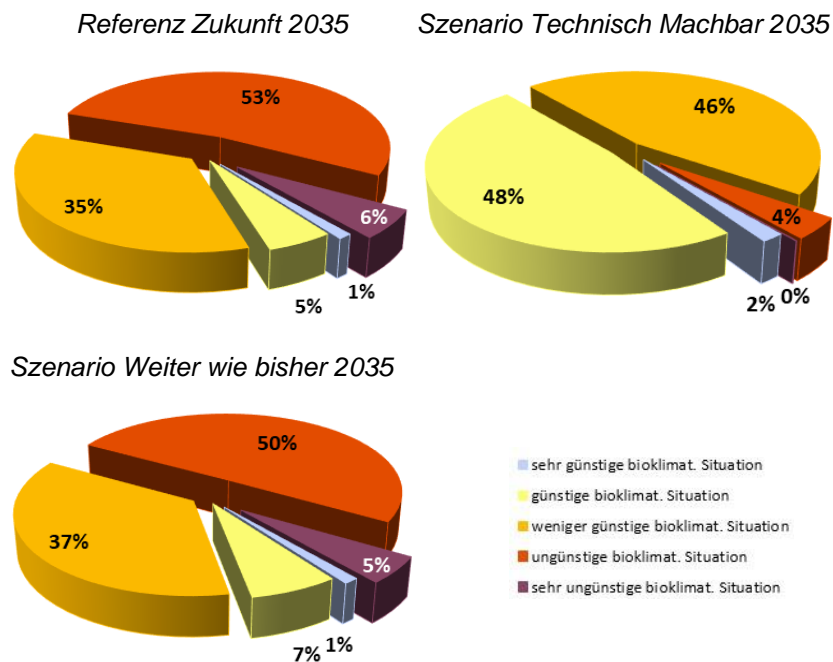


Abbildung 46: Prozentuale Verteilung der Bewertungsklassen am Tage für die Siedlungs- und Verkehrsflächen der Referenz-Modellierung 2035 (links oben), dem Szenario des Technisch Machbaren 2035 (rechts oben) und dem Szenario Weiter wie bisher 2035 (links unten)

Das Szenario *Weiter wie bisher* zeigt, dass punktuell umgesetzte Maßnahmen wie Stadtbäume, Entsiegelung oder Fassadenbegrünung nur sehr lokal wirken. Um einen ganzen Straßenraum oder Wohnblock effektiv zu entlasten, müssen die Maßnahmen möglichst flächendeckend umgesetzt werden. Dies ist besonders dann relevant, wenn eine hohe Belastung vorliegt. Das bestätigt auch der Szenarien-Ausschnitt des Bundesviertels, in welchem die Straßen, Plätze und privaten Freiräume entsprechend des Masterplans nach „Blue-Green-Streets-Prinzipien“ flächendeckend angepasst wurden und sogleich eine flächendeckende sehr gute Hitzeminderung erzielt wurde.

Die Maßnahmen, die über die Prognose des Stadtbaumkonzepts in die Modellierung eingeflossen sind, wirken kleinräumig sehr gut. Ein Stadtbaumkonzept ist der richtige Ansatz, aber auch im öffentlichen Raum ist noch deutlich mehr Verschattung notwendig, um die Hitzebelastung effektiv zu reduzieren.

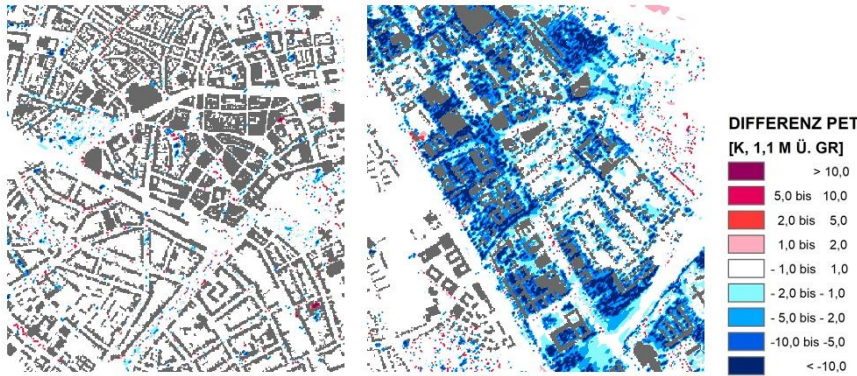


Abbildung 47: Differenz der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) am Tage am Beispiel der Innenstadt mit punktuell eingesetzten Maßnahmen (links) und am Beispiel des Bundesviertels mit Einsatz flächendeckender Maßnahmen (rechts) im Szenario Weiter wie bisher 2035

5.2 Wo sind die großen Stellschrauben?

Erkenntnis 4: „Champions“ in Umsetzung bevorzugen.

Es gibt nicht die eine wirksamste Maßnahme zur Hitzereduzierung am Tag und in der Nacht. In den meisten Strukturen wirkt eine Kombination aus Bäumen, Entsiegelung und Begrünung oder Teilentsiegelung sowie Fassadenbegrünung zur Reduktion der Hitzebelastung am besten. Auch Maßnahmen zur Steigerung der Bodenfeuchtigkeit (sogenannte Schwammstadtmaßnahmen und Bewässerungssysteme) sind essenziell, damit die Vegetation Verdunstungskühlung leisten kann. Diese sogenannten „Champions“ sollten wo möglich weniger wirksamen Maßnahmen wie technischer Verschattung, Teilentsiegelung oder veränderter Albedo bei Oberflächen in der Umsetzung vorgezogen werden. Dachbegrünung entfaltet eine Wirkung auf die bodennahe Lufttemperatur nur bei geringen Dachhöhen kleiner als sechs Meter. Bei direkter Nutzung eines Gründachs ist eine Temperaturreduktion auf Dachniveau zur Entlastung sinnvoll und zudem stärken Gründächer den natürlichen Wasserhaushalt.

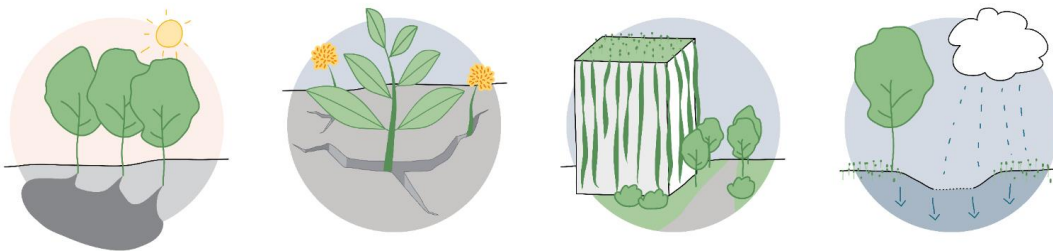


Abbildung 48: Die „Champions“ der Hitzevorsorge

Erkenntnis 5: Identifizierte Potenzialräume nutzen. Mobilitätswende bringt effektiv Potenzialraum.

Die Potenzialermittlung für das *Szenario des Technisch Machbaren* zeigt, in welchen Räumen besonders viel Potenzial für Klimaanpassungsmaßnahmen besteht. Die Möglichkeit der Umsetzung, das Vorhandensein von Potenzialraum für Maßnahmen, unterscheidet sich stark zwischen den Straßentypen und den Stadtstrukturtypen und Gebäudenutzungen. Dieses Potenzial gilt es zu heben. In dem Szenario blieb dabei die Umsetzungspriorität, die sich aus Hitzebelastung, Nutzungsansprüchen und Sensibilitäten ergeben kann, unberücksichtigt. In der Umsetzung empfiehlt es sich, die Potenziale mit den Prioritäten abzugleichen.

Straßenraum: Eine umfassende Mobilitätswende ermöglicht effektiv Potenzialraum: Weniger MIV, weniger ruhender Verkehr, geringere Höchstgeschwindigkeiten und mehr Umweltverbund (ÖPNV, Fahrrad- und Fußverkehr) ermöglichen eine flächensparende Neugestaltung des Straßenraums. Großes Maßnahmenpotenzial besteht besonders in Wohnstraßen, auf denen durch Geschwindigkeitsreduktion und Verkehrsberuhigung die Straßenquerschnitte zugunsten der Klimaanpassung neu organisiert werden können. Im *Szenario des Technisch Machbaren* wird in bestimmten Straßentypen der Zukunft im Durchschnitt sehr viel Potenzialraum für Hitzeminderungsmaßnahmen und klimagerechten Parkraum gesehen: in Wohnstraßen 3,79 m, in verkehrsberuhigten Straßen mit Bus 9,90 m sowie in verkehrsberuhigten Straßen ohne Bus 5,98 m (Abbildung 50).

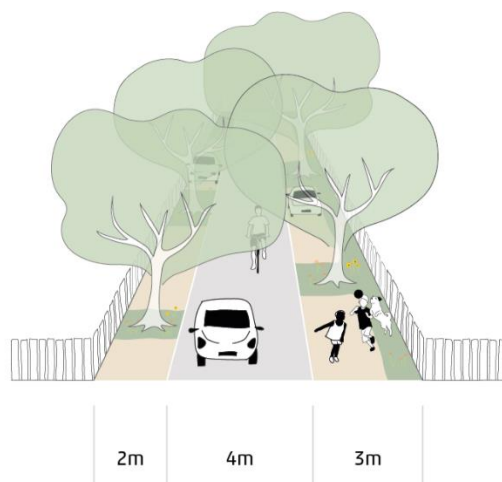


Abbildung 49: Neu organisierte Straßenquerschnitte mit Verkehrsberuhigung bieten in Wohnstraßen reichlich Potenzialraum für grün-blaue Maßnahmen

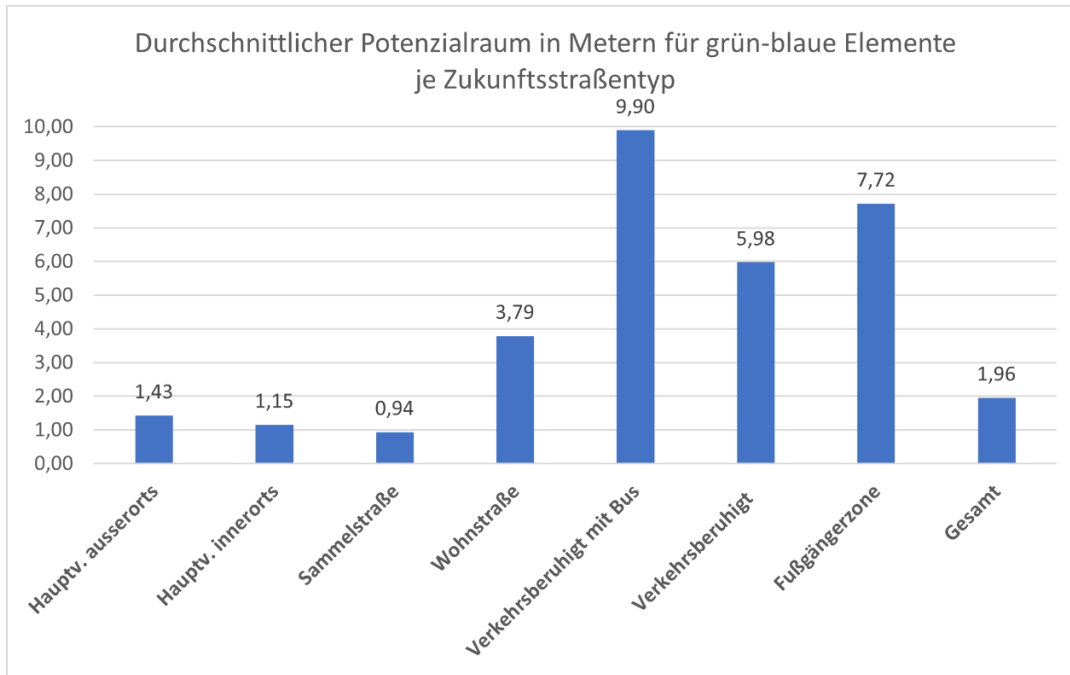


Abbildung 50: Durchschnittlicher Potenzialraum für Hitzeminderungsmaßnahmen und klimagerechten Parkraum in Metern im Straßenraum im Szenario des technisch Machbaren

Auch ohne grundlegende Neuaufteilung der verschiedenen Nutzungen im Straßenraum liegt großes Potenzial im straßenbegleitenden Parkraum. Dieser kann flächendeckend teilentsiegelt werden und durch Entnahme einzelner Stellplätze entsteht Potenzialraum für Stadtbäume und kleinteilige Entsiegelung.

Flurstücke: Auf Flurstücken besteht Potenzial zur Entsiegelung und Teilentsiegelung vornehmlich im Bereich von Stellplätzen, Zufahrten und großflächigen Parkplätzen durch eine ambitionierte Mobilitätswende. Auch auf Wohngrundstücken kann der Versiegelungsgrad durch eine Reduktion an Stellplätzen und Zufahrten deutlich reduziert werden. Aufenthaltsbereiche wie Quartiersplätze, Schulhöfe oder Plätze vor institutionellen Einrichtungen bieten ein großes Potenzial für Entsiegelung, Teilentsiegelung und Verschattung durch Bäume. Hierfür müssen die bestehenden Nutzungsansprüche, die Bäume und Entsiegelung verhindern, kritisch hinterfragt werden. Potenzial für Verschattung durch Bäume besteht auf allen entsiegelten Flächen und zudem auf bestehenden Grünräumen in Bebauungsstrukturen wie freistehenden Einfamilien- und Mehrfamilienhäusern, Zeilenbebauung, Hochhäusern und Wohnanlagen.

Gebäude: Für die Hitzeminderung ist Fassadenbegrünung deutlich effektiver als Dachbegrünung, es sei denn das Dach wird als Aufenthaltsbereich genutzt. Viel Potenzial für Fassadenbegrünung wird in Gewerbestrukturen sowie an Parkhäusern gesehen. Zum einen kann großflächig, meist ohne Fensterausparungen, begrünt werden, zum anderen erlauben die Strukturen eine bodengebundene Begrünung, welche deutlich kostengünstiger und wassereffizienter entwickelt werden kann. Auch an größeren Strukturen wie institutionellen Einrichtungen oder Zeilenbebauung wird großes Potenzial für Fassadenbegrünung gesehen. Dachbegrünungen werden meist nur im Neubau umgesetzt und können bei Aufstockungen integriert werden. Nachrüstungen besonders bei Flachdächern mit niedriger Gebäudehöhe sollten forciert werden.

5.3 Einflussmöglichkeiten der verschiedenen Akteur*innen

Erkenntnis 6: Für Anpassung im Bestand institutionelle Eigentümer*innen und städtische Liegenschaften aktivieren und Synergien nutzen.

Die Potenzialermittlung des *Szenarios des Technisch Machbaren* schließt alle Akteur*innen in die Klimaanpassung mit ein. Dadurch entsteht ein flächendeckendes Potenzial mit Hitzeminderungsmaßnahmen in fast jedem Straßenraum und fast jedem Grundstück. Diese flächendeckende Anpassung ist sehr wirksam. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass alle Akteur*innen in einer Stadt aktiv Klimaanpassung betreiben müssen, vom privaten Eigentümer*innen eines Einfamilienhauses, über Wohnungsbaugesellschaften bis hin zu Stadt, Land und Bund.

Bestand im Eigentum der Stadt wie Schulen und Verwaltungsgebäude und deren Außenbereiche bieten ein großes Potenzial für Hitzeminderung. Hier muss die Stadt tätig werden und hat die Möglichkeit über ihre Vorbildfunktion auch Anreize für private Eigentümer*innen zu entwickeln.

Der öffentliche Raum als weiterer direkter Einflussbereich der Stadt bietet sehr große Einflussmöglichkeiten und ist zudem zu großen Teilen besonders stark durch Hitze belastet. In Siedlungsstrukturen mit geringem Anteil an privaten Grünräumen (bspw. dichte Blockrandbebauung) kommen den öffentlichen Räumen, insbesondere den Straßenräumen, eine besonders hohe Bedeutung in der Hitzeminderung zu. Somit haben hier Stadt, Land und Bund eine hohe Verantwortung für die Hitzeminderung in diesen Räumen. Es ist wichtig die Klimaanpassung langfristig über Masterpläne, Grünrahmenpläne, Baumkonzepte o.ä. zu planen und zu sichern. Zudem ist es von zentraler Bedeutung die Potenziale zu erkennen, wie der Aspekt der Hitzeminderung in fachspezifischen ohnehin stattfindenden Projekten (bspw. Straßensanierungen, Fernwärmeausbau) frühzeitig und wirksam integriert werden kann.

Bioklimatische Verbesserungen im Siedlungsbestand im privaten Raum lassen sich nur über Anreize, Information und Fördermöglichkeiten von Seiten der Stadt unterstützen. Große Eigentümer*innen wie Genossenschaften, Institutionen (Universität, Kirche) und große Arbeitgeber*innen können aktiv angesprochen und über Anpassungsmöglichkeiten im Bestand informiert werden. Förderprogramme sind sinnvoll, sollten allerdings räumlich gezielt entsprechend der Hitzebelastung eingesetzt werden. Der insgesamt hohe Flächenanteil an Privatliegenschaften von 86% (Eigentumsanteile im Siedlungsgebiet ohne Straßen) zeigt die Bedeutung der Eigeninitiative der privaten Eigentümer*innen.

Zielvorgaben bzgl. der Hitzebelastung auf städtischen Flächen könnten auch im Siedlungsbestand den Klimabelangen in der Abwägung stärkeres Gewicht verleihen und die Politik mehr in die Pflicht nehmen.

Erkenntnis 7: Große Herausforderung ist die nachträgliche Anpassung im Bestand – Möglichkeiten im Neubau konsequent nutzen.

Anpassungen im Bestand sind kostenaufwändig und die Stadt besitzt kaum Einflussmöglichkeiten. Das Szenario *Weiter wie bisher* verdeutlicht, dass die Maßnahmen des Förderprogramms Gebäudebegrünung lokal positiv wirken, allerdings in ihrer Quantität „ein Tropfen auf den heißen Stein“ sind. Da im Bestand nicht mehr regulativ eingegriffen werden kann, ist es umso wichtiger im Neubau und bei Nachverdichtungsmaßnahmen weitreichende Klimaanpassungsmaßnahmen bindend festzuschreiben. Das gleiche gilt auch für stadteigene Hoch- und Tiefbauprojekte, denn im Nachgang ist es deutlich schwieriger Anpassungsmaßnahmen zu integrieren.

6 Handlungsorientierte Empfehlungen

6.1 ... zur Definition von und Orientierung an quantitativen Zielen zur Hitzevorsorge

Empfehlung 1: Verbindliche Zielvorgaben bestärken die Belange der Klimaanpassung in Abwägungsprozessen.

Laut §1 Abs. 6 Nr. 1 des Baugesetzbuches müssen in der Bauleitplanung die „allgemeinen Anforderungen an gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse und die Sicherheit der Wohn- und Arbeitsbevölkerung“ berücksichtigt werden. Die Stadtklimaanalyse der Stadt Bonn verdeutlicht vor diesem Hintergrund, dass mit fortschreitendem Klimawandel die Schaffung gesunder Wohn- und Arbeitsbedingungen im Bereich der Hitzevorsorge drängender wird. Mit der Planungshinweiskarte (PHK) liegt bereits ein aussagekräftiges Instrument hinsichtlich der räumlichen Handlungsprioritäten vor. Die Ergebnisse der Referenz 2035 zeigen für jeden Baublock, wie viel Temperaturreduktion am Tag und in der Nacht notwendig ist, um aus den höheren Belastungsstufen herauszukommen. Das *Szenario des Technisch Machbaren* liefert je Baublock einen möglichen Anpassungspfad, d.h. einen Maßnahmenmix, der in diesem Baublock zu einer ausreichenden Temperaturreduktion führt. Nur für einige wenige Gewerbe- und Zentrumsstrukturen konnte in dem Szenario noch kein Maßnahmenmix zur ausreichenden Belastungsreduktion in der Nacht gefunden werden.

In bestimmten Strukturen ist eine ausreichende Hitzereduktion in der Nacht sehr schwierig. Liegt in diesen Gebieten eine auf den Tag fokussierte Nutzung vor, kann es sinnvoll sein, die Anpassungsmaßnahmen primär auf die Tagsituation auszurichten.

Derzeit wird ein [“Zielbeschluss zur Klimaanpassung”](#) erarbeitet, der voraussichtlich im Dezember 2023 vom Rat der Stadt Bonn beraten wird. Dieser Zielbeschluss begründet sich in den durch das MUTABOR-Projekt daher grundsätzlich die Notwendigkeit zu einer deutlich verstärkten Hitzevorsorge unterstrichen. Daneben werden im Zielbeschluss Orientierungswerte für die einzelnen Handlungsfelder beschrieben, die sich auf die jeweiligen Planungsgrundlagen zur Hitze, Trockenheits- und Starkregenvorsorge beziehen. Für das Handlungsfeld Hitzevorsorge lautet die Formulierung: *“möglichst weitgehender Erhalt der Klimafunktionen der Flächen mit hohem und sehr hohem Schutzbedarf und Reduktion der thermischen Belastungsschwerpunkte, insbesondere in Bereichen mit der Handlungspriorität 1 und 2 gemäß Planungshinweiskarte Hitze”*. Wie bereits erläutert liegen aus MUTABOR gesamtstädtische Informationen dazu vor, welche Temperaturreduktion je Baublock notwendig wäre, um die Belastungsstufe zu reduzieren. Mit dem Zielbeschluss zur Klimaanpassung wird demnach für Bonn ein quantitatives Ziel für die Hitzevorsorge im Rahmen des Neubaus und der Bestandsentwicklung vorliegen. Klimaanpassung bleibt jedoch auch mit dem Zielbeschluss in Bonn ein abwägungsrelevanter Belang unter vielen anderen (z.B. im Rahmen der Bauleitplanung). Die aufgeführten Zielsetzungen lösen demnach keine absoluten Vorgaben oder Tabubereiche für Entwicklungsvorhaben aus. Mit dem Zielbeschluss soll jedoch die Bedeutung von Klimaanpassungsmaßnahmen, insbesondere in handlungsprioritären Räumen gemäß der vorliegenden Planungsgrundlagen zur Hitze, Trockenheits- und Starkregenvorsorge bekräftigt werden und die notwendigen Dimensionen zur Klimaanpassung verdeutlichen.

6.2 ...für die Bestandsentwicklung (z.B. als Grundlage für neue Förderprogramme, Stadtsanierung)

Empfehlung 2: Bestandsstrukturen wirksam durch Anpassungsmaßnahmen weiterentwickeln.

Im Szenario des *Technisch Machbaren* kann in Bestandsstrukturen die Hitzebelastung effektiv reduziert werden. Die statistische Auswertung über bestimmte Siedlungscluster zeigt, wie hoch die durchschnittliche Temperaturreduktion am Tag und in der Nacht ist. In belasteten Strukturen ist die Temperaturdifferenz höher, in Gewerbegebieten mit einer besonders schlechten Ausgangssituation am höchsten.

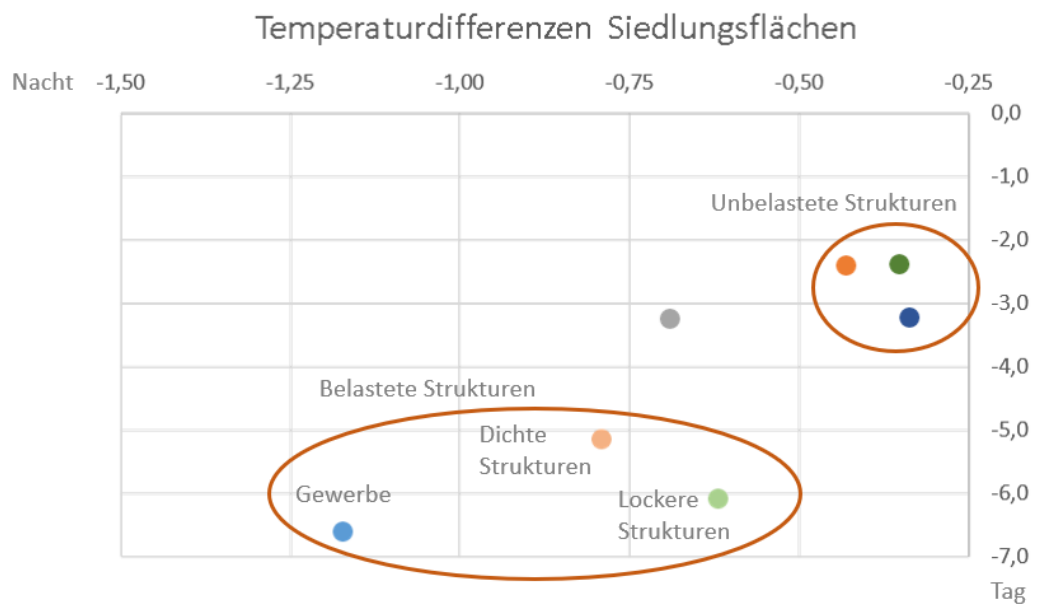


Abbildung 51: Temperaturdifferenzen im *Szenario des Technisch Machbaren* nach Clustern in Siedlungsflächen

Im Bestand ergibt sich vor allem auf größeren zusammenhängenden Flächen Potenzial für Teilentsiegelung und Verschattungsmöglichkeiten. Die Modellergebnisse zeigen, dass auf Schulhöfen eine Verbesserung am Tag und bei Nacht um eine Belastungsklasse erreicht werden kann. Besonders wirksame Maßnahmen sind die Entsiegelung und Begrünung der Fläche in Kombination mit der Pflanzung von Bäumen. Aber auch eine Teilentsiegelung größerer Flächen mit naturfernem Boden (z.B. wassergebundenen Wegedecken) zeigt im Vergleich zu einer vollversiegelten Fläche eine hohe Wirksamkeit in der Reduktion der Hitzebelastung. Bemerkenswert ist, dass die Pflanzung von neuen Bäumen nicht zu einer Verschlechterung in der Nacht führt, da die Teilentsiegelung die geringfügigere nächtliche Wärmeausstrahlung unterhalb von Bäumen kompensiert. Um die hier abgebildeten Temperaturdifferenzen zu erreichen, wurde auf dem Schulgelände der versiegelte Flächenanteil um 25 %-Punkte reduziert und durch einen naturfernen Boden ersetzt. Der durch Bäume verschattete Flächenanteil wurde um 13 %-Punkte erhöht (Abbildung 52).

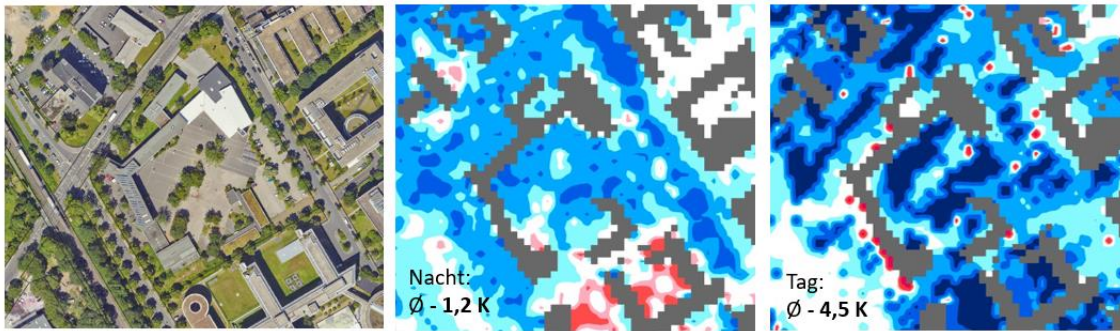


Abbildung 52: Differenz der nächtlichen Lufttemperatur und der gefühlten Temperatur am Tage am Beispiel eines Schulgeländes bei der Umsetzung von Teilentsiegelungen und Neupflanzung von Bäumen

Gebäudebegrünung ist meist gut zur Umsetzung im Bestand geeignet. Gebäudeoberflächen bieten auch in hoch verdichteten Bereichen nutzbare Potenzialflächen. Bei Dachbegrünungen müssen geeignete statische Voraussetzungen gegeben sein, um das Gewicht einer Dachbegrünung tragen zu können. Kiesdächer können in der Regel alternativ auch das Gewicht einer extensiven Dachbegrünung tragen. Am Markt existieren jedoch auch spezielle Leichtkonstruktionen, die bei eher schwierigen statischen Voraussetzungen eine Möglichkeit für eine nachträgliche Dachbegrünung im Bestand darstellen können. Vor allem die Fassadenbegrünung trägt, da sie meist bodennah angebracht wird, zur Kühlung des lokalen Mikroklimas im Straßenraum bei. Die Stadt Bonn nutzt bereits das Förderprogramm Begrünung (www.bonn.de/begrueung) als Möglichkeit Anreize für Eigentümer*innen zu setzen. Darüber hinaus sollte eine gezielte Bewerbung des Förderangebotes in Gebieten mit einem hohen Bedarf an Gebäudebegrünung erfolgen.

6.3 ... für Neubau und Nachverdichtung (z.B. als Grundlage für neue Standards in der Bauleitplanung)

Empfehlung 3: Durch dreifache Innenentwicklung bioklimatische Situation bei Nachverdichtung sichern.

Die Modellergebnisse zeigen, dass negative stadtklimatische Effekte in Folge von Nachverdichtungen (z.B. Aufstockungen und Erweiterungsbauten) bei geeigneter Auswahl und ausreichender zeitgleicher Umsetzung von Hitzeanpassungsmaßnahmen ausgeglichen werden können. Durch eine qualifizierte mehrfache Innenentwicklung – gerade auch im Sinne der Klimaanpassung – ist somit eine klimaverträgliche Steigerung der baulichen Dichte möglich. Für eine wirksame mehrfache Innenentwicklung in allen Teilbereichen (Klimaanpassung/Grünentwicklung, Klimaschutz, Mobilität, bauliche Entwicklung) sollten daher zielführende Kriterien definiert und im Rahmen von Planungsvorhaben berücksichtigt werden. Siehe hierzu auch die Praxishilfe zur Dreifachen Innenentwicklung des Region Köln Bonn e.V.⁴

Die Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse eines exemplarischen Transformationsgebietes zeigen teilträumlich, dass in bestimmten Strukturen der Nachverdichtung Aufstockungen und Erweiterungsbauten durch grün-blaue Maßnahmen ausgleichbar sind. So kommt es trotz einer Erhöhung der Wohneinheiten nicht zu einer Verschlechterung der klimatischen Situation, teilträumlich sind sogar Verbesserungen möglich.

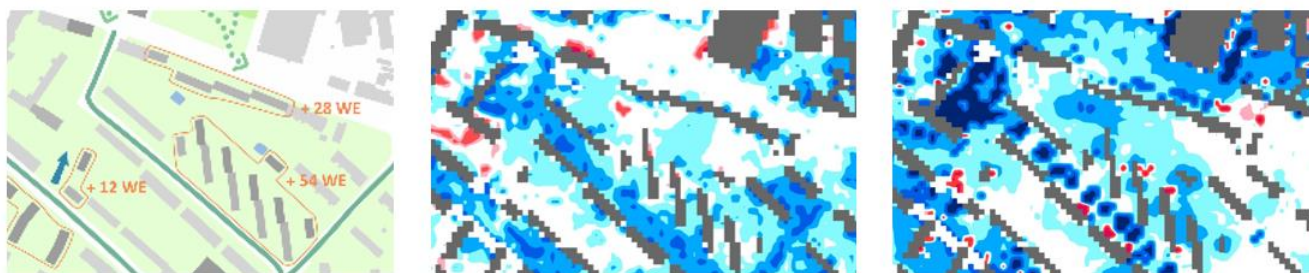


Abbildung 53: Aufstockungen und Erweiterungsbauten (links, orange umrandet) sind bei Nacht (Mitte) und am Tag (rechts) durch grün-blaue Maßnahmen ausgleichbar (Temperaturdifferenz abgebildet)

Empfehlung 4: Klimaanpassung in Gewerbestrukturen effizient mit „Stapelung“ und Umstrukturierung.

Gewerbestrukturen sind aufgrund des hohen Versiegelungsgrades und der hohen wärmespeichernden Baumasse besonders stark von Hitzebelastung betroffen. Um diese Strukturen nachhaltig vor Hitzebelastung zu schützen, sind Anpassungsmaßnahmen im großen Umfang notwendig. Im *Szenario des Technisch Machbaren* werden in Gewerbestrukturen Entsiegelung, Teilentsiegelung, Baumpflanzungen, Fassaden- und Dachbegrünungen eingesetzt. Die dadurch erzielte durchschnittliche Nutzungsänderung des Raumes lässt sich aus Abbildung 54 ablesen.

⁴ Region Köln/Bonn e.V.: Dreifache Innenentwicklung – Praxishilfe für die Region Köln/Bonn (https://www.agglomerationsprogramm.de/fileadmin/agglomerationsprogramm/Downloads/Praxishilfe_3FI_final_low_res.pdf)

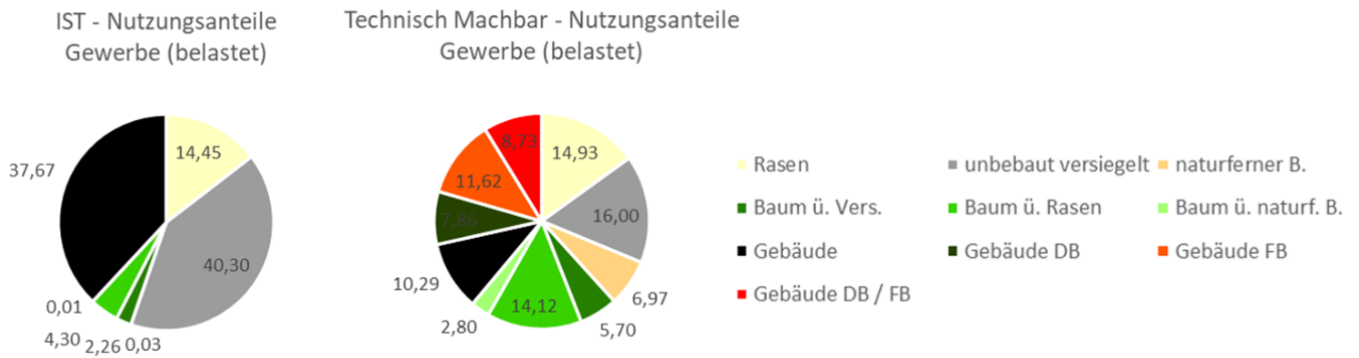


Abbildung 54: Durchschnittliche Nutzungsänderung im Cluster Gewerbebestrukturen zwischen der Ist-Nutzung (Referenz 2035) und der Nutzung im Szenario des Technisch Machbaren

Der Anteil der versiegelten Fläche wird stark zu Gunsten von naturfernen Böden und baumbestandenen Rasenflächen reduziert. Der Gebäudebestand bleibt etwa nur zu einem Viertel unverändert, drei Viertel des Gebäudebestandes werden durch Dach- und/ oder Fassadenbegrünung angepasst.

Im Bestand wird es eine immense Herausforderung sein, diese Menge an Anpassungsmaßnahmen in Gewerbebestrukturen zu integrieren. In dem *Add-On Transformationsgebiete* wurde teilweise die Integration grün-blauer Maßnahmen mit transformativen Maßnahmen der Umstrukturierung, Stapelung von Gewerbeeinheiten, Aufstockung und der Entwicklung von Parkhäusern kombiniert. Die Transformation der Struktur erleichtert die Reduktion des Gebäudefootprints und dadurch die Entsiegelung im Freiraum.

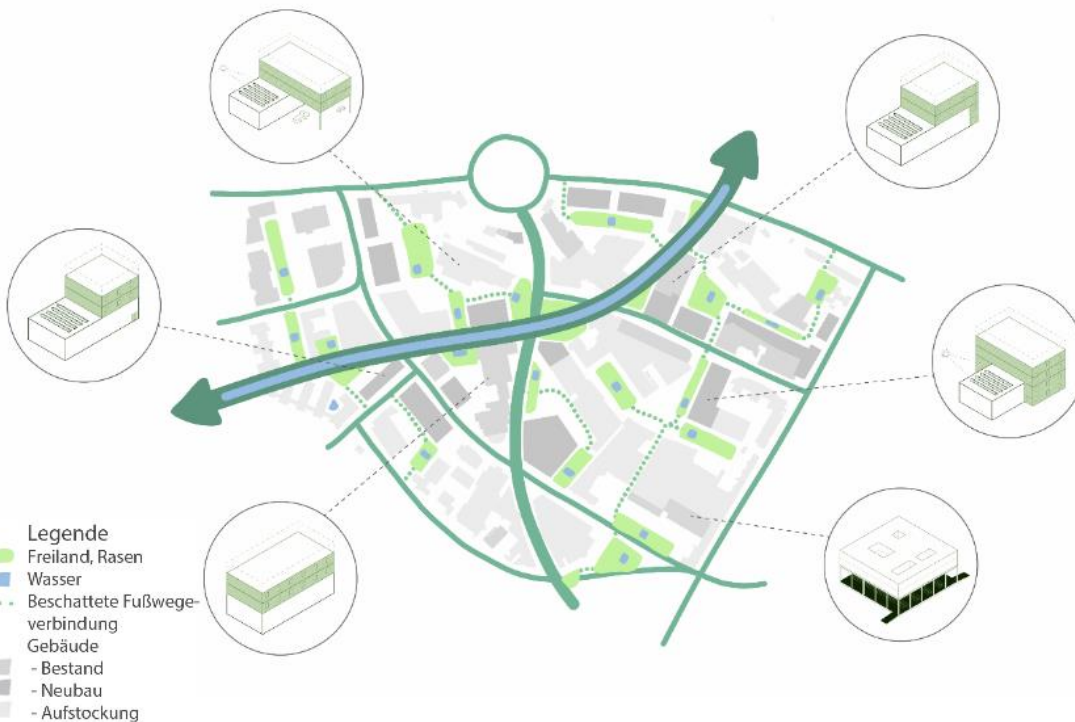


Abbildung 55: Transformationskonzept für ein exemplarisches Gewerbegebiet

Zur Hitzeminderung in Gewerbebestrukturen empfehlen wir die Integration grün-blauer Maßnahmen mit einer Transformation der Strukturen zu mehr Dichte und Nutzungsmischung durch Stapelung bei gleichzeitiger Entsiegelung des unbebauten Raumes und Begrünung der Gebäude und Freiflächen.

Empfehlung 5: Strömungsoptimierte Gebäudestellungen On-Top zu grün-blauen Maßnahmen umsetzen.

Spielen Kaltluftprozesse eine wichtige Rolle zur Reduktion der nächtlichen Hitzebelastung in einem Quartier, kommt der Siedungsstruktur eine besondere Rolle zu. Bei Neubau durch Siedlungserweiterung oder Nachverdichtung ist zwingend darauf zu achten das bestehende Kaltluftsystem möglichst nicht nachteilig zu beeinflussen. Wird das Kaltluftsystem geschwächt, kann dies negative Auswirkungen auf die Hitzebelastung auch noch in weit vom Siedlungsrand entfernten Bereichen haben. Wichtige zu berücksichtigende Kriterien sind die Gebäudestellung und -ausrichtung, die Gebäudehöhe und -länge, sowie die Durchlässigkeit und Körnigkeit der Baustruktur (bspw. Gebäudeabstände).

Mit fortschreitender Hitzebelastung kann die Transformation von Gebäudestrukturen auch im Bestand notwendig und sinnvoll sein. In zwei exemplarischen Transformationsgebieten wurden die Vorteile für den Kaltfluthaushalt und die nächtliche Hitzebelastung untersucht: In einem Wohngebiet wurden Zeilenbauten, die quer zur Kaltluftströmung stehen, durch Einzelbauten mit höherer Körnigkeit und durch in ihrer Ausrichtung optimal gedrehte Zeilenbauten ersetzt. Diese Transformation hat sich zusätzlich zu den grün-blauen Maßnahmen aus dem *Szenario des Technisch Machbaren* positiv auf den Kaltluftvolumenstrom und die nächtliche Lufttemperatur ausgewirkt. So hat sich der Kaltluftvolumenstrom in diesen Bereichen nicht nur erhöht, sondern vermag zudem tiefer in das Wohngebiet einzudringen und die klimatische Situation dort positiv zu beeinflussen.



Abbildung 56: Gedrehte oder ersetzte Gebäude (in dunkelgrau) in einem Bestandswohngebiet unter Kaltlufteinfluss

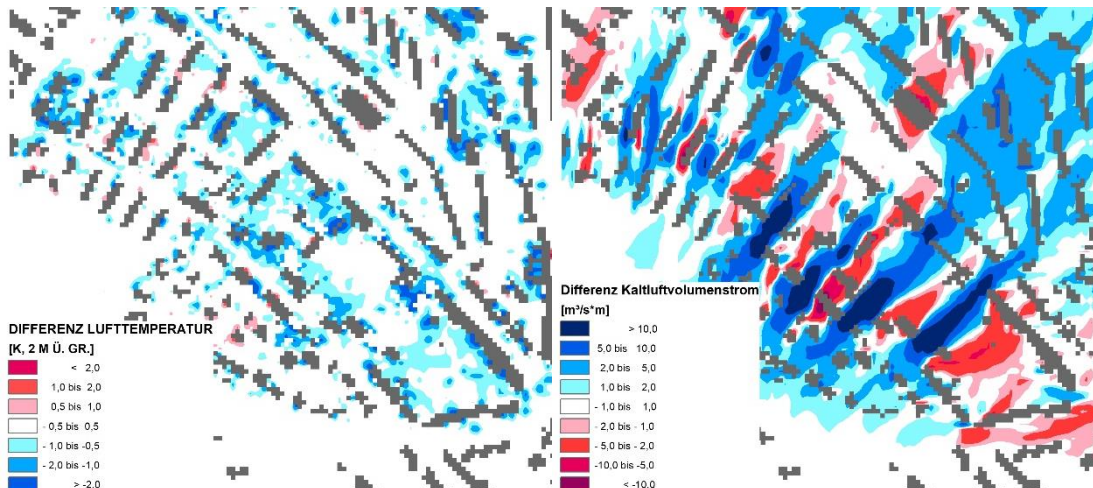


Abbildung 57: Differenz der nächtlichen Lufttemperatur (links) und des Kaltluftvolumenstroms (rechts) nach Optimierung der Gebäudekörperstellung und Gebäudeabstände

In einem zweiten kleinräumigen Beispiel wurde die Baustruktur in dichter geschlossener Blockrandbebauung punktuell aufgebrochen. Es wurde die These überprüft, ob durch die Aufbrüche nächtliche Kaltluft aus einer nahegelegenen Grünanlage bis in die Blockinnenbereiche fließen kann und dort zu einer zusätzlichen nächtlichen Abkühlung sorgt. Dies ist für die direkt an die Grünfläche angrenzende Blockrandbebauung, wenn auch relativ schwach ausgeprägt, der Fall. Sowohl die Breite des Öffnungsbereichs als auch die Lage zur vorherrschenden Kaltluftströmung sind ausschlaggebend für den Kaltlufttransport in die Blockinnenbereiche.

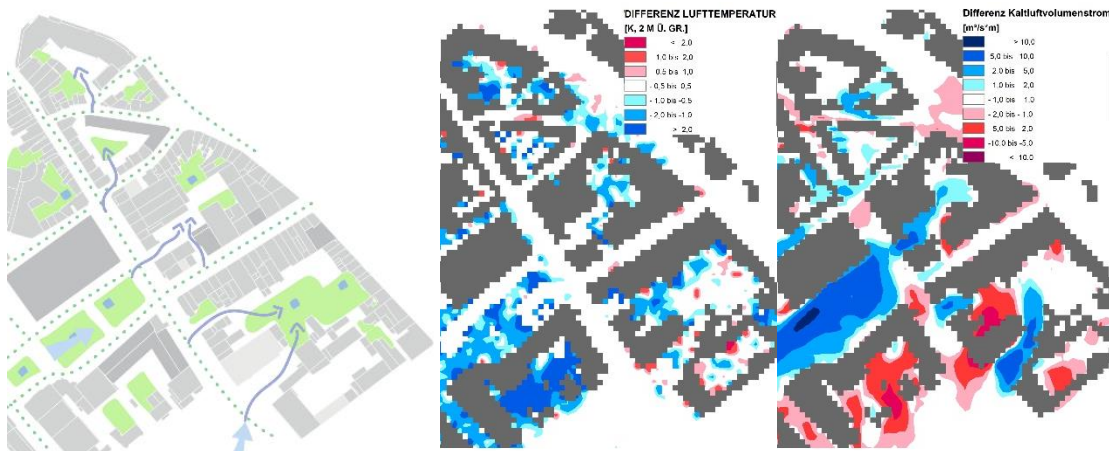


Abbildung 58: Differenz der nächtlichen Lufttemperatur (mitte) und des Kaltluftvolumenstroms (rechts) nach Öffnung geschlossener Baustrukturen in Strömungsrichtung

6.4 ... für die Entwicklung grün-blauer Infrastruktur

Empfehlung 6: Hitzereduktion im Straßenraum durch Synergien mit der Mobilitätswende vorantreiben.

Dem Straßenraum kommt im Zuge der Hitzeanpassung eine besondere Bedeutung zu. Der Straßenraum liegt größtenteils in der direkten Einflussmöglichkeit der Stadt, hier kann die Stadt mit gutem Vorbild vorangehen. Eine Hitzereduktion in Straßenräumen ist besonders relevant für die Attraktivität des Fuß- und Radverkehrs. Die Hitzebelastung im Straßenraum in dichten Siedungsstrukturen mit wenig Freiraum bedingt zudem direkt die Qualität der Belüftung der Gebäude.

Bereits mit relativ wenig Potenzialraum für Anpassungsmaßnahmen lässt sich am Tag eine gute Hitzereduktion durch die Entsiegelung von Parkplätzen und die Pflanzung von Bäumen erreichen. Die untenstehende statistische Auswirkung zeigt, dass in belasteten Straßenräumen auch mit einem geringeren Potenzialraum die Tagsituation in ähnlichem Maße verbessert werden kann wie in Straßenräumen mit sehr viel Potenzialraum. Die Menge des Potenzialraums ist insbesondere für die nächtliche Hitzereduktion entscheidend, da hier in erster Linie die flächenintensive Entsiegelung und Begrünung wirkt.

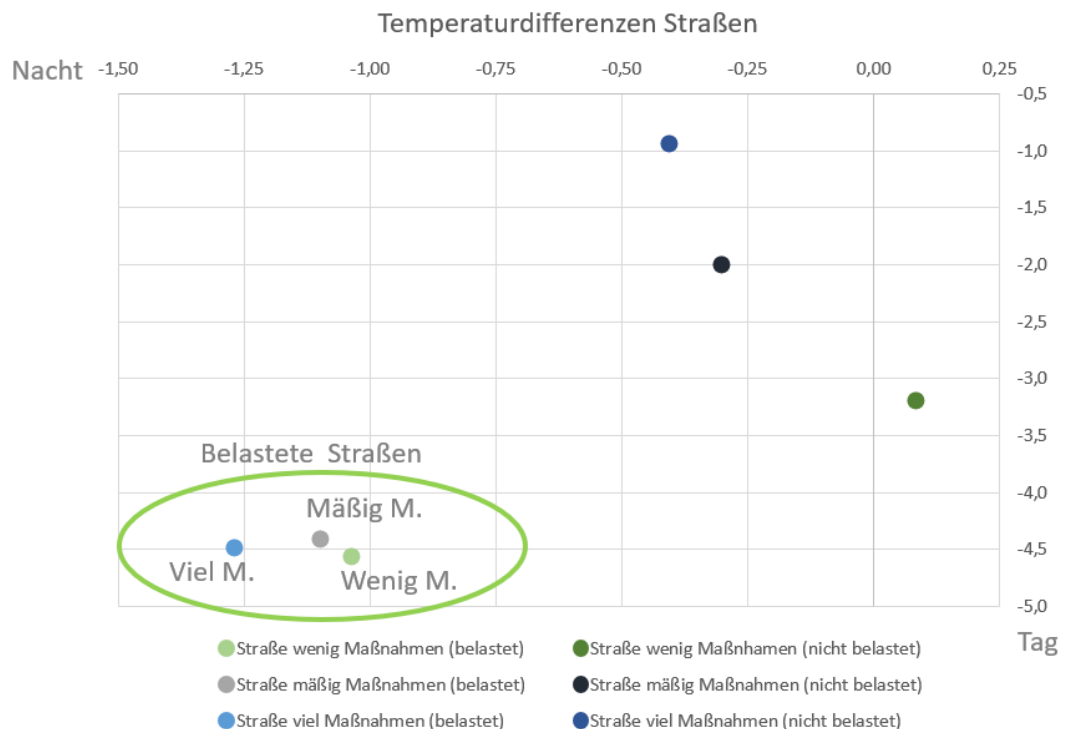


Abbildung 59: Temperaturdifferenzen im Szenario des Technisch Machbaren nach Clustern im Straßenraum

Um diese positiven klimatischen Effekte am Tag und in der Nacht zu erzielen, ist in belasteten Straßen eine starke Neustrukturierung des Straßenraumes notwendig. Die Grafik (Abbildung 60) der durchschnittlichen Nutzungsanteile in belasteten Straßen mit viel Potenzialraum verdeutlicht den Wandel. Der Anteil an versiegelten Flächen nimmt von vorher etwa 88% auf 53% ab und der Anteil von durch Bäumen überstandener Fläche nimmt von 24% auf 42% zu. Gerade in locker bebauten Strukturen ist es sinnvoll mehr Straßenbäume zu pflanzen, da sie im Vergleich zu Baumstandorten in dicht bebauten Innenstadtbereichen die Durchlüftung und nächtliche Wärmeausstrahlung weniger stark beeinträchtigen.



Abbildung 60: Durchschnittliche Flächennutzungsanteile im Cluster „Belastete Straßen mit viel Potenzialraum/ Maßnahmen“ in der Ist-Situation und im Szenario des Technisch Machbaren

	Referenz 2035	Technisch machbar 2035	Differenz
Lufttemperatur (Nacht)	20,5 °C	19,2 °C	- 1,3 K
PET (Tag)	38,3 °C	33,9 °C	- 4,4 K

Das 2023 erstellte Baumkonzept der Stadt ist für die Umsetzung ein richtiger und guter Schritt. Die Ergebnisse des Szenarios des Technisch Machbaren zeigen aber auch, dass noch deutlich mehr Baumpflanzungen notwendig sind, um eine signifikante Kühlung zu erreichen. Auf Basis des bereits bestehenden Baumkonzepts ist daher eine gesamtstädtische Erweiterung der Baumstandorte anzustreben. Für die Umsetzung solcher Maßnahmen kann durch die in Bonn angestrebte Mobilitätswende effektiv Raum geschaffen werden. Ohne eine Neustrukturierung des Straßenraumes und die Verlegung von Leitungen bzw. die Minimierung von Mindestabständen zu Leitungen wird die erforderliche Menge an Hitzeminderungsmaßnahmen nicht in den Straßenraum zu integrieren sein.

Empfehlung 7: Nutzungsansprüche an öffentliche Räume wie Plätze und Fußgängerzonen neu denken, um Aufenthaltsmöglichkeiten im Sommer zu sichern.

Vor allem auf vollversiegelten Plätzen ist die Belastungssituation bereits heute sehr ungünstig. Um unter Klimawandelbedingungen die Aufenthaltsmöglichkeit an heißen Sommertagen in dichten Strukturen wie z.B. in der Innenstadt zu sichern, ist eine Mindestmenge an Verschattung und weiteren Anpassungsmaßnahmen erforderlich. Ein Maßnahmenmix aus Teilentsiegelung, Bäumen und Fassadenbegrünung wird auf Platzflächen empfohlen. Im Beispiel Marktplatz wurde eine Teilentsiegelung auf mindestens der Hälfte der Bodenoberfläche umgesetzt, die Hälfte der Fläche mit Bäumen verschattet und bei umstehenden Gebäuden Fassadenbegrünung integriert. Unter diesen Bedingungen lässt sich die gefühlte Temperatur auf dem Marktplatz am Tag um beinahe 10°C verringern, in der Nacht nimmt die Temperatur um 2,3°C ab (Abbildung 61). Diese Menge an Anpassungsmaßnahmen erfordert ein Umdenken bezüglich der Nutzungsansprüche öffentlicher Plätze. Dieser Diskurs sollte in Politik und Öffentlichkeit geführt werden.

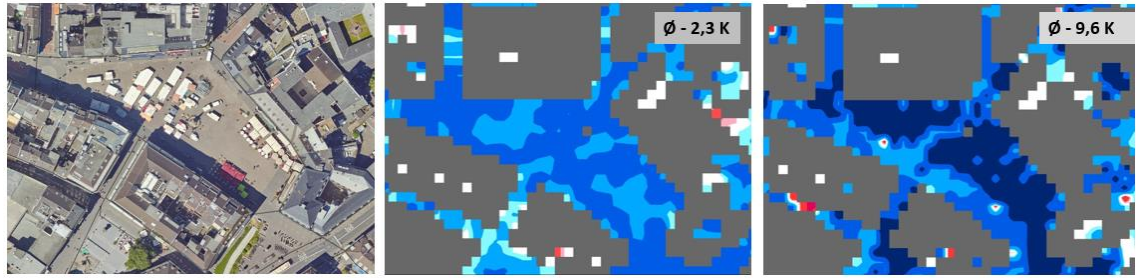


Abbildung 61: Die Gestaltung des Marktplatzes heute (links) und erzielte Temperaturdifferenzen unter dem Szenario des Technisch Machbaren in der Nacht (Mitte) und am Tag (rechts).

In dem *Add-On Transformationsgebiete* wurde testweise die Gebäudestruktur in einem Zentrumsbereich stark verändert, um eine bestehende Fußgängerzone zu einer urbanen Frischluftschneise aufzuweiten. Die deutlich breitere Fußgängerzone verringert zum einen die Hinderniswirkung bezüglich heranströmender nächtlicher Kaltluft und ermöglicht zum anderen neue Nutzungsansprüche in die Fußgängerzone zu integrieren. Die breite Fußgängerzone ist so strukturiert, dass entlang der Erdgeschosszonen beschattete Wegeverbindungen auf einem wassergebundenen Bodenbelag das Flanieren ermöglichen und kleine zum Teil durch Bäume verschattete Rasenflächen in der Mitte einen Parkartigen Aufenthalt ermöglichen.



Abbildung 62: Skizze der neugestalteten Fußgängerzone in einem Zentrumsbereich und Darstellung einer möglichen Gestaltung mit Bäumen und wassergebundenem Bodenbelag

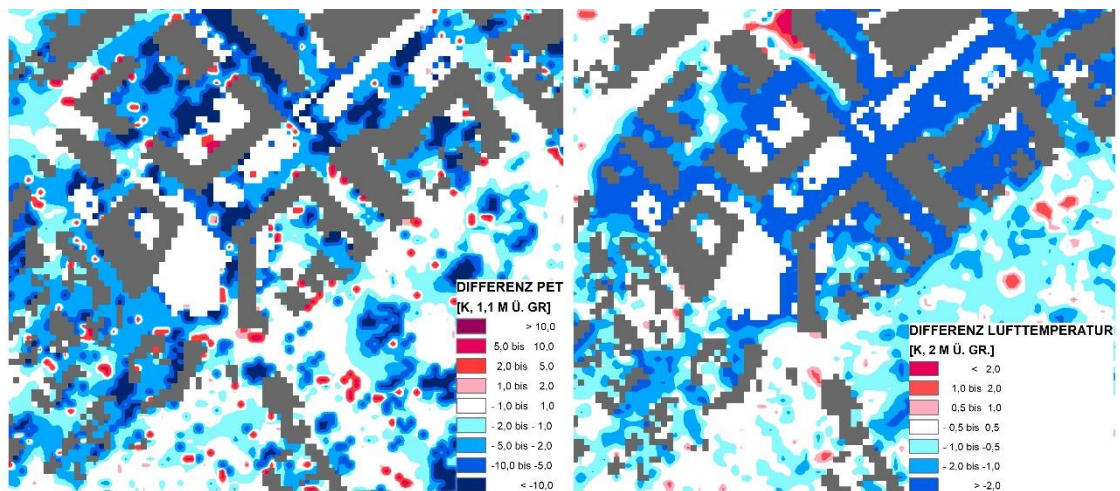


Abbildung 63: Differenz der Physiologisch Äquivalenten Temperatur am Tag (links) und der nächtlichen Lufttemperatur (rechts) im Bereich der neu gestalteten Fußgängerzone in Bezug auf die Referenz-Modellierung 2035

Empfehlung 8: Ausreichende Bodenfeuchte der Vegetationsflächen sichern.

Eine ausreichende Bodenfeuchte ist für die kühlende Wirkung von vegetativen Hitzeminderungsmaßnahmen entscheidend. Nur ausreichend mit Wasser versorgtes Grün kann Verdunstungskühle produzieren. Zudem ist eine gute Wasserversorgung elementar für eine langfristige gute Pflanzengesundheit. In den Szenarien des *Technisch Machbaren* und *Weiter wie bisher* wurde jeweils auf Flächen mit umgesetzten Maßnahmen eine gute Bodenfeuchte von 60% angenommen und somit eine Sommertrockenheit ausgeschlossen. Im Bereich ohne Maßnahmen und außerhalb des Siedlungskörpers auf Wald- und Landwirtschaftsflächen wurde eine Sommertrockenheit mit einer Bodenfeuchte von nur 30% angenommen. In der Referenz 2035 wurde flächendeckend eine Sommertrockenheit abgebildet.

Das bedeutet, dass die guten Hitzeminderungseffekte im *Szenario des Technisch Machbaren* auch auf die Verhinderung einer Austrocknung der Vegetation zurückzuführen sind. Die Erreichung und Erhaltung einer flächendeckenden hohen Bodenfeuchte ist mit Blick auf die anhaltende Trockenperiode eine große Herausforderung. Mit dem Schwammstadtkonzept wird derzeit eine Strategie erarbeitet, die die Entwicklung der Stadt Bonn zu einer wassersensitiven Stadt zum Ziel hat ([DS 230255-01](#)).

Empfehlung 9: Mehr Bäume pflanzen – auf die richtige Mischung im Freiraum kommt es an.

Die Pflanzung von mehr Bäumen im Bestand ist in den meisten Siedlungsstrukturen als sinnvoll zu betrachten. In bestimmten Strukturen ist es jedoch nötig, die Baumstandorte vor der Pflanzung zu prüfen. Zu viele Bäume an ungeeigneter Stelle können dazu führen, dass die nächtliche Abstrahlung der tagsüber im Boden gespeicherten Wärme oder der Kaltlufttransport vermindert werden. Dies ist vor allem in engen Straßenräumen mit geschlossener Blockrandbebauung möglich, da hier die Durchlüftung generell gering ist und ein geschlossenes Baumkronendach von Fassade zu Fassade wie ein Schirm wirken kann. Zudem ist die Thematik am Siedlungsrand oder am Übergang von großen Grünflächen zur Siedlung relevant, wenn dort nächtliche Kaltluftabflüsse vorhanden sind.

Um Kaltluftabflüsse und nächtliche Abstrahlung nicht zu verringern wird empfohlen, im Bereich von Kaltluftabflüssen nur ein Viertel der Flächen (Grünraum oder Straßenraum) durch Baumkronen zu „überdecken“. Spielen Kaltluftprozesse keine Rolle kann eine Baumkronenüberdeckung auf bis zu 45% der Freifläche sinnvoll sein. Eine leicht verringerte nächtliche Abstrahlung durch Bäume kann sehr gut durch (Teil-) Entsiegelungsmaßnahmen ausgeglichen werden, sodass es nicht zu einer Verschlechterung der Nachtsituation kommt.

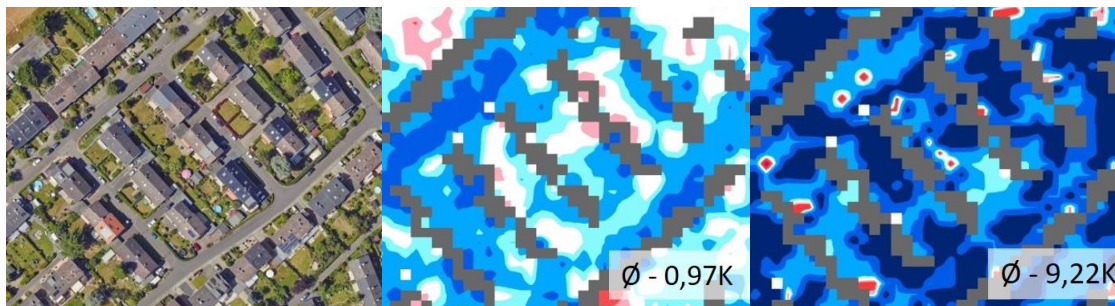


Abbildung 64: Lockere Wohnsiedlung in Bonn heute (links) und erzielte Temperaturdifferenzen im Szenario des Technisch Machbaren in der Nacht (Mitte) und am Tag (rechts).

In Strukturen, in denen aufgrund der Nutzung die Belastungsreduktion auf die Tagsituation fokussiert werden sollte wie bspw. bei Schulanlagen, Kindergärten, Spielplätzen und öffentlichen Plätzen, kann auch eine geringe Verschlechterung der nächtlichen Situation in Kauf genommen werden, wenn durch einen hohen Baumanteil die Tagsituation bedeutend verbessert werden kann.

Denn Bäume sind als eine der wichtigsten und effektivsten Maßnahmen zur Reduktion der Hitzebelastung anzusehen.

Für eine weitreichende Hitzereduktion in stark belasteten und verdichteten Strukturen in der Nacht ist eine umfassende Reduktion der Versiegelung und der Baumasse notwendig. Da dies aber in der Regel in Gewerbestrukturen oder Zentrumsbereichen nicht möglich ist, muss mit einer bestehenden Hitzebelastung in der Nacht gerechnet werden.

6.5 Planungshinweiskarte als zentrales Steuerungsinstrument für die gesamtstädtische Hitzevorsorge

Bonn verfügt über eine verhältnismäßig weit zurückreichende Historie in Bezug auf klimatische Untersuchungen des Stadtgebietes. Schon aus den Jahren 1954, 1972 und 1991 liegen entsprechende Untersuchungen vor. Grundsätzliche Erkenntnisse zur problematischen stadtklimatischen Situation in Bonn liegen demnach schon seit knapp 70 Jahren vor. Der sich intensivierende Klimawandel in Kombination mit der zunehmenden baulichen Entwicklung im Stadtgebiet, haben gerade in den letzten Jahren zu einer deutlich beschleunigten Veränderung des Stadtklimas beigetragen. Mit dem durch das BMBF geförderten Projekt ZURES konnten 2018 und 2019 gesamtstädtische Karten erstellt werden, welche sich aufgrund Ihrer Auflösung von 10 x 10m erstmalig dazu eigneten, sie in konkreten Planungsprozessen wie der verbindlichen Bauleitplanung einzusetzen.

Die Veröffentlichung der Stadtklimaanalyse (2018) und der Planungshinweiskarte (2019) fielen u.a. aufgrund der Hitzesommer in diesen beiden Jahren in eine Spanne sehr hoher Aufmerksamkeit für die Hitzevorsorge. Die neuen Planungsgrundlagen erlangten daher sehr schnell einen hohen Bekanntheitsgrad und werden seither in allen raumwirksamen Planungen zur Erstein-schätzung stadtklimatischer Belange verwendet. Bereits die im ZURES-Projekt ermittelten Grundlagen stellten daher einen Meilenstein für die Thematisierung der Hitzevorsorge in Bonn im Rahmen der Schaffung von neuem Planungsrecht dar.

Die Karten aus 2018 und 2019 waren jedoch noch darauf beschränkt bioklimatische Belastungen bzw. Bedeutungen auszuweisen. Demnach konnte daraus abgeleitet werden, in welchen Räumen Schutzbedarfe von Klimafunktionen bestehen und in welchen Bereichen Belastungen schon so hoch sind, dass sich im Zuge anstehender Planungen Handlungserfordernisse zur Verbesserung der Situation ergeben. Keine Aussage trafen die damaligen Karten jedoch zu Anpassungspotenzialen, -kapazitäten und notwendigen -dimensionen, um Belastungen im Bestand durch Maßnahmen aktiv reduzieren zu können.

Genau dieser Schritt in der Weiterentwicklung konnte im Rahmen des Forschungsprojektes MUTABOR und einer im Zusammenhang mit dem Projekt stehenden Aktualisierung der Stadtklimaanalyse und Planungshinweiskarte gegangen werden. Das *Szenario des Technisch Machbaren* lieferte in weiten Teilen des Siedlungsbestandes eine theoretisch mögliche Lösungsvariante zur Reduktion der Hitzebelastung durch aktive Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen. Auf Basis der Modellierung dieses Szenarios liegen konkrete Zahlenwerte zu möglichen Temperaturreduktionen infolge der Umsetzung des Maßnahmensets aus dem *Szenario des Technisch Machbaren* vor. Damit kann erstmalig auch Art und Umfang der jeweils notwendigen Realisierung von Anpassungsmaßnahmen auf Basis der vorliegenden Kartengrundlagen beschrieben werden.

Diese neuen Grundlagen wurden zum Anlass genommen einen Zielbeschluss zur Klimaanpassung für Bonn vorzuschlagen. Dieser Zielbeschluss soll rahmengebend für die weitere Klimaanpassungsarbeit in Bonn sein und insbesondere bei der Definition und Bemessung von Maßnahmen des Klimaanpassungskonzeptes für Bonn Orientierung liefern. Der Zielbeschluss formuliert für das Handlungsfeld Hitze einen "*möglichst weitgehender Erhalt der Klimafunktionen der Flächen mit hohem und sehr hohem Schutzbedarf und die Reduktion der thermischen Belastungsschwerpunkte, insbesondere in Bereichen mit der Handlungspriorität 1 und 2 gemäß Planungshinweiskarte Hitze*".

Dieser Zielbeschluss soll die Verwaltung in ihrem künftigen Handeln binden und die vorliegenden Planungsgrundlagen zur Bezugs- und Steuerungsgröße künftiger Maßnahmen zur Hitzevorsorge erheben.

7 Laufende Projekte der Stadt Bonn mit Bezug zur Hitzevorsorge

Die Ergebnisse der Szenario-Rechnungen verdeutlichen, dass eine zukünftige Stadtentwicklung verstärkt auf Maßnahmen ausgerichtet sein muss, die durch ihre (natürliche) Funktion eine Kühlung auf die Umgebungstemperatur bewirken. Zusätzlich müssen diese Maßnahmen für einen möglichst großen Kühleffekt flächendeckend umgesetzt werden. Potenziale ergeben sich v.a. im öffentlichen (Straßen-)Raum (s. Kap. 5). Hier ist die Stadt Bonn in ihrer kommunalen Verwaltungsaufgabe die maßgebliche Akteurin zur Umsetzung.

In Bezug zu den in Kapitel 2 definierten Maßnahmenkategorien lassen sich bereits jetzt aktuelle Planungen und Konzepte der Stadt Bonn einordnen, die einen Beitrag zur Umsetzung von Maßnahmen zur Hitzeanpassung leisten.

Konzeptionelle Ebene

Durch Strategien wie das Schwammstadtkonzept, der Freiraumplan oder das Grüne C wird ein strategischer Rahmen zur schrittweisen und flächendeckenden Erhöhung des Grünvolumens in der Stadt, der Wasserspeicherung und Verdunstung sowie der Verschattung durch Vegetation gespannt. Auch die Analyse zu neuen Baumstandorten im Rahmen des Baumkonzepts schafft einen Überblick über das Potenzial für die Kühlung der Stadt am Tage. Die geplante Erhöhung der Biodiversität durch das Aktionsprogramm Biodiversität und die Umsetzung des Programms „Stadtgrün naturnah“ lösen ebenfalls Synergieeffekte für die Klimaanpassung aus.

Auch im Rahmen der Programme und Projekte der Bonner Mobilitätswende wird neues Potenzial durch die Umverteilung des Straßenraums zugunsten einer grün-blauen Infrastruktur geschaffen. Mit den Bönnschen Vierteln wurde außerdem ein komplexes Beteiligungsverfahren zur Aufwertung des öffentlichen Raums (u.a. durch Begrünung) in den zwei Modellvierteln nördliche Altstadt und Combahnviertel gestartet.

Planungsebene

In der Stadtplanung steht mit dem Masterplan Innere Stadt sowie dem Masterplan Bad Godesberg/ISEK Bad Godesberg ebenfalls die qualitative Aufwertung des öffentlichen Raums im Fokus. So wurden bereits Entsiegelungs- und Begrünungsmaßnahmen auf städtischen Flächen, wie z.B. dem Budafok-Park, durchgeführt. Weitere geplante Projekte wie die Umgestaltung des Stiftsplatzes oder die Aufwertung der Rheinpromenade werden durch die Anpassung der lokalen Mobilität neue Potenzialräume zur Kühlung der Stadt schaffen. Die Kühlwirkung ausgewählter Maßnahmen der Masterpläne wurde im Szenario *Weiter wie bisher* ermittelt und bezeugt eine positive Wirkung auf das lokale Klima.



Abbildung 65: Begrünungsmaßnahme am Budafok-Park (3)

Auch die Kühlwirkung der Maßnahmen des Grünrahmenplans Bundesviertel wurde in dem Szenario berechnet. Hier zeigt sich, dass die Planungen der Stadt Bonn – solange sie flächendeckend und mit Mut umgesetzt werden – maßgeblich zum zukünftigen thermischen Komfort beitragen können.

Zur langfristigen Einbindung von Belangen der Klimaanpassung in die Stadtplanung und -entwicklung sind im Rahmen des Klimaplanes 2035 der Stadt zudem umfassende Maßnahmen geplant, die auch Schnittstellen zur Hitzevorsorge aufweisen. So werden beispielsweise im Amt für Wirtschaftsförderung Personalstellen geschaffen, um Gewerbetreibende umfassend bzgl. im eigenen Betrieb umsetzbarer Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung zu beraten.

Förderprogramme

Um neben dem öffentlichen Raum auch über die Einflussgrenzen als Akteurin hinaus Maßnahmen zur Hitzevorsorge im Stadtgebiet umsetzen zu können, fördert die Stadt Bonn mit unterschiedlichen Förderprogrammen verschiedene Maßnahmen, die für private Grundstücke und Gebäude genutzt werden können. Im Rahmen des Förderprogramms Begrünung werden nicht nur die entsprechenden Maßnahmen, sondern in Kombination mit diesen auch Systeme der Regenwasserrückhaltung (z.B. Zisternen oder Regentonnen) gefördert. Im Förderprogramm Solares Bonn wird zudem die Dachbegrünung im Zuge der Kombination von Grün- und Solardach bezuschusst. Mit der Obstbaumaktion möchte die Stadt Bonn zudem die Pflanzung von Bäumen auf privaten Grundstücken fördern, indem in zwei Aktionen im Herbst 2023 und 2024 Obstbäume an Bewerber*innen vergeben werden.

8 Good Practice

Die laufenden Projekte der Stadt Bonn verdeutlichen, dass die Hitzevorsorge sowohl auf konzeptioneller als auch auf planerischer Ebene fest integriert ist. Neben den positiven Beispielen aus der eigenen Stadt gibt es weitere Good-Practice-Ansätze aus anderen (internationalen) Städten, die Inspiration zur Umsetzung auch in Bonn liefern können.

Gestaltungssatzung Freiraum und Klima (Frankfurt am Main)

Die Stadt Frankfurt hat im Mai 2023 mit ihrer Gestaltungssatzung Freiraum und Klima ein Steuerungsinstrument für (gebäudebezogene) Begrünungsmaßnahmen bei Neu- oder Umbauten im Stadtgebiet geschaffen. Dies betrifft alle Neuerrichtungen oder Änderungen auf oder an Grundstücken, Gebäuden und Nebengebäuden. Nicht überbaute Freiflächen sind laut Gestaltungssatzung zu begrünen und mit ausreichend Bäumen bzw. Sträuchern zu bepflanzen, Gebäude und Nebengebäude (z.B. Carports oder Garagen) sind mit einer Dachbegrünung (mind. 12 bzw. 8 cm Substrataufbau) auszustatten. Fassaden müssen abzüglich Fenster- und Türöffnungen zu 50% begrünt werden. Bei Stellplätzen muss durch standortgerechte Pflanzung von Bäumen für eine ausreichende Verschattung gesorgt sein.

Cooler Wien (Österreich)

Akute Maßnahmen bei einer Hitzewelle bietet die Stadt Wien. Mit unterschiedlichen Aktionen wie den mobilen Trinkbrunnen „Brunnhilde“ oder dem „Somerspritzer“, einer an Hydranten angeschlossenen Sprühnebel dusche, sorgt Wien für eine direkte Abkühlung bei heißen Temperaturen. Auf einer interaktiven Karte können die Standorte der Trinkbrunnen, der Sprühnebel duschen und der Wasserspielmöglichkeiten eingesehen werden.



Abbildung 66: Trinkbrunnen "Brunnhilde", Wiener Wasser/Zinner

Citizen's Coolkit – Vancouver (Kanada)

Eine Möglichkeit private Flächen für die Hitzevorsorge zu aktivieren, bietet das Kommunikationsinstrument „Citizen's Coolkit“ der Stadt Vancouver (Kanada). Das Planspiel wird von der „Collaborative for Advanced Landscape Planning“ den Nachbarschaften der Stadt zur Verfügung gestellt. Mit einer Dauer von vier Wochen ist das Ziel des Coolkits die Bewohner*innen für das Thema Klimaanpassung und Eigenvorsorge zu sensibilisieren. Die Initiation erfolgt meist durch ein Nachbarschaftsfest, bei dem das nachbarschaftliche Kennenlernen sowie eine erste Wissensabfrage zum Thema Klima im Fokus stehen. Im Laufe des Planspiels haben die Anwohner*innen anschließend die Möglichkeit Grünflächen und Grünpotenziale durch Fotos und Kartenmaterialien zu kartieren und eigene Ideen mit Bildbearbeitungswerkzeugen wie GIMP oder Photoshop selbst zu visualisieren. Hilfe zur Umsetzung erhalten die Teilnehmenden durch Informationsmaterialien zur klimangepassten Gestaltung ihrer Nachbarschaft.

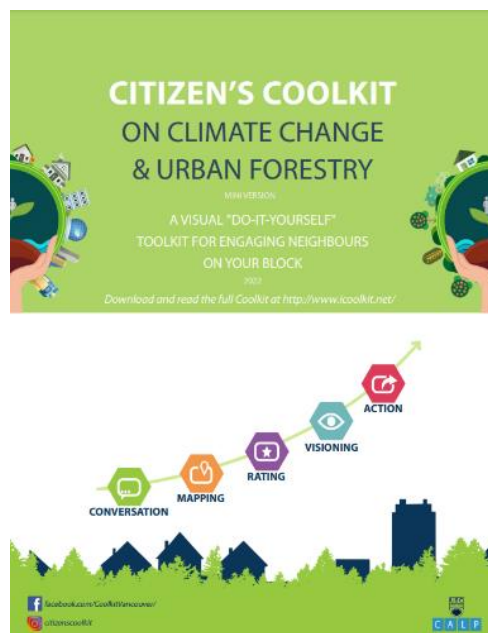


Abbildung 67: Broschüre zum Citizen's Coolkit, Collaborative for Advanced Landscape Planning

Ruta N-Gebäude – Medellín (Kolumbien)

Das Ruta N-Gebäude in Medellín dient als gutes Beispiel für klimaangepasste Architektur: der Komplex weist neben einer Fassadenbegrünung auch einen begrünten Innenhof auf, durch dessen Bepflanzung das Gebäude passiv gekühlt wird. Zudem sorgen technische Anpassungsmaßnahmen wie die spezielle Faltung des außenliegenden Sonnenschutzes oder die Fassadenstruktur nicht nur für eine gute Luftzirkulation im Außenbereich, sondern auch dafür, dass keine direkte Sonneneinstrahlung in das Gebäude gelangt. Die Aufenthaltsqualität im Außenbereich wird durch die Anbindung an die Grünanlage der Universität sichergestellt.



Abbildung 68: Die Fassade des Ruta N-Gebäude, Elke Mertens

9 Ausblick

Der vorliegende Bericht verdeutlicht, dass MUTABOR einen bedeutsamen Beitrag zur Erkenntnis über die technischen und planerischen Anpassungskapazitäten der Stadt Bonn geleistet hat. Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass bis 2035 erhebliche Fortschritte im Bereich der Kühlung der Stadt erreicht werden können. Insbesondere naturbasierte Maßnahmen haben – in der richtigen Kombination – wirkungstechnisch die größte Relevanz. Mit den angestrebten Transformationsprozessen in Bonn wie beispielsweise der Mobilitätswende lässt sich für die Umsetzung solcher grün-blauer Maßnahmen effektiv Potenzialraum schaffen.

Aus den Untersuchungen zu den unterschiedlichen Herangehensweisen an eine kommunale Hitzevorsorge wird jedoch auch erkennbar, dass die technischen und planerischen Maßnahmen selbst in ihrer ambitioniertesten Umsetzung Grenzen aufweisen. Im Hinblick auf die Temperaturentwicklungen bis Ende des Jahrhunderts werden weitere Maßnahmen wie die verhaltensbezogene Hitzevorsorge notwendig sein. Zudem muss vor dem Hintergrund der Effektivität von naturbasierten Lösungen die Trockenheitsvorsorge stärker in den Fokus rücken, um die Funktionalität von grün-blauen Maßnahmen gewährleisten zu können.

Derzeit werden in Bonn viele Konzepte und Projekte, die die Belange der Hitzevorsorge enthalten, erstellt bzw. umgesetzt. Mit dem Schwammstadtkonzept erarbeitet die Stadt Bonn derzeit eine Strategie, die den Bodenwasserhaushalt und die Versorgung von grünen Strukturen langfristig sichern soll. Mit der Aktualisierung der Planungshinweiskarte konnte mit Hilfe von MUTABOR bereits eine konkrete Maßnahme der Hitzevorsorge weiterentwickelt werden. Die Ergänzungskarte zur möglichen Temperaturreduktion im Stadtgebiet bietet der Stadtplanung eine Orientierung, um die Hitzebelastung zu reduzieren. Der geplante Zielbeschluss zur Klimaanpassung soll im Hinblick auf die wachsenden Herausforderungen einen klaren Entwicklungsrahmen für die weiteren Tätigkeiten der Stadt Bonn festsetzen.

Es fehlt jedoch eine systematische Dachstrategie, die die bereits vorhandenen Tätigkeiten der Stadt Bonn in der Klimaanpassung strategisch zusammenführt und weiterentwickelt. Die Stadt Bonn wird daher im Rahmen der DAS-Förderrichtlinie „Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel“ ab August 2023 ein integriertes Klimaanpassungskonzept erarbeiten. Eine Zielsetzung des Konzepts ist die Bilanzierung der bereits vorhandenen Tätigkeiten und darauf aufbauend eine Analyse der Stärken und Schwächen der Klimaanpassung in Bonn. Auch die in MUTABOR gewonnenen Erkenntnisse und Empfehlungen sollen in den Prozess einfließen. Auf Grundlage dieser Bilanzierung wird anschließend ein Handlungsplan mit definierten Zuständigkeiten und Budget für die kommenden Jahre entwickelt.