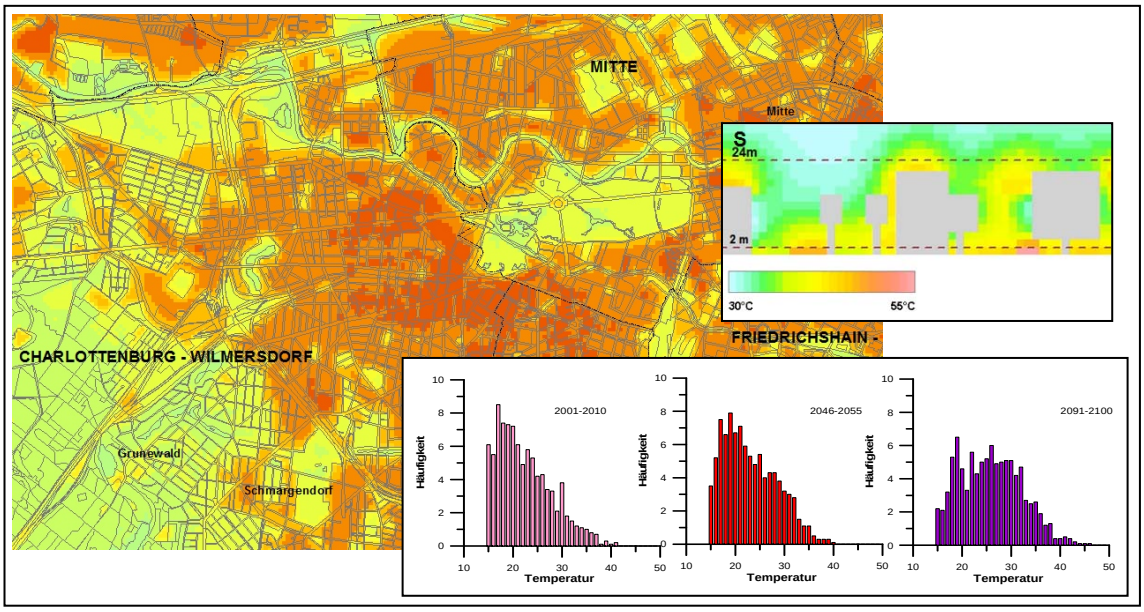
Untersuchungen zum Klimawandel in Berlin

- Dokumentation der im Rahmen des Stadtentwicklungsplan (StEP) Klima durchgeführten Modellrechnungen -



Auftraggeber:

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung
Abt. I - Stadt- und Freiraumplanung
Referat - I A - Stadtentwicklungsplanung
Am Köllnischen Park 3
10179 Berlin

Reiner Nagel, Thorsten Tonndorf

Projektbearbeitung: Heinz Brandl (Projektleitung),
Monika Faltermeier, Dr. Heike Stock, Jörn Welsch

Tel. 030 / 9025-1317, Fax 030 / 9025-1392
E-Mail: heinz.brandl@senstadt.berlin.de

Auftragnehmer:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Große Pfahlstraße 5 A
3 0 1 6 1 Hannover
Tel. (0511) 3887200
FAX (0511) 3887201
www.geo-net.de

in Zusammenarbeit mit:

Prof. Dr. G. Gross
Anerkannt beratender Meteorologe (DMG),
Von der IHK Hannover-Hildesheim öffentlich bestellter Gutachter
für Immissionsfragen und Kleinklima

Dezember 2010

Auftrag:	Erstellung von meteorologischen Grundlagendaten zum Klimawandel für die Region Berlin sowie deren Inwertsetzung im Rahmen des StEP Klima Berlin
Standort:	Stadt Berlin Bundesland: Berlin Deutschland
Auftraggeber:	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Am Köllnischen Park 3 10179 Berlin
Projektnummer:	2_09_012
Berichtsnummer:	2_09_012_StEP-Klima_Rev00
Version:	1
Datum:	18.01.2011
Erstellt von:	Dipl.-Geogr. Dirk Herrmann
Unter Mitarbeit von:	Prof. Dr. Günter Groß
Geprüft von:	Dipl.-Geogr. Peter Trute

GEO-NET
Umweltconsulting GmbH

Geschäftsführer:
Dipl.-Geogr. Thorsten Frey
Dipl.-Geogr. Peter Trute

Große Pfahlstraße 5a
D-30161 Hannover
Tel. (0511) 388 72 00
Fax (0511) 388 72 01

info@geo-net.de
www.geo-net.de

Amtsgericht Hannover
HRB 61218

Hannoversche Volksbank eG
KTO. 532 248 000
BLZ 251 900 01

Inhaltsverzeichnis

Seite:

Inhaltsverzeichnis ..... **I**
Abbildungsverzeichnis ..... **II**
Tabellenverzeichnis ..... **IV**

Inhaltsverzeichnis ..... **I**

1 Aufgabenstellung **1**

2. Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis **2**

2.1 Gesamtstädtische Ebene 2

2.2 Referenzgebiet 2

3. Methodik **3**

3.1 Das Mesoskalenmodell FITNAH 3

3.2 ENVELOPE-Methode 8

4. Ergebnisse **14**

4.1 Zukünftige Entwicklung ausgewählter meteorologischer Parameter 14

4.2.1 Anzahl der Sommertage 20

4.2.2 Anzahl der heißen Tage 23

4.2.3 Anzahl der Tropennächte 26

4.2.4 Integrierende Bewertung der Wärmebelastung am Tag 28

4.3.1 Vertikalschnitte 40

4.3.2 Bilanzierung der mittleren Lufttemperatur 52

5. Literatur **57**

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Unterschiedliche Rasterweiten (links: 500 m x 500 m; rechts: 125 m x 125 m) bei einem digitalen Geländehöhenmodell 4

Abb. 2: Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit 6

Abb. 3: Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle 6

Abb. 4: Exemplarischer Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen 7

Abb. 5: Eingangsdaten für die Modellrechnung 8

Abb. 6: Häufigkeitsverteilungen von Temperatur, Wind und relativer Feuchte für den Zeitraum bis 2100 10

Abb. 7: Begrenzungsraum für die ausgesuchten Wettersituationen 11

Abb. 8: Verteilung der 14-Uhr Situationen im Zustandsraum 11

Abb. 9: Schema zur Berechnung der meteorologischen Variablen für einzelne Wettersituationen aus den Ergebnissen der 8 Basis-Simulationen 12

Abb. 10: Klimaszenarien und prognostizierter globaler Temperaturverlauf (Quelle: IPCC 2007) 12

Abb. 11: Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur (Quelle: Institut für Meteorologie und Klimatologie Universität Hannover 2010) 15

Abb. 12: Häufigkeitsverteilung der relativen Feuchte (Quelle: Institut für Meteorologie und Klimatologie Universität Hannover 2010) 15

Abb. 13: Häufigkeitsverteilung der mittleren Windgeschwindigkeit (Quelle: Institut für Meteorologie und Klimatologie Universität Hannover 2010) 16

Abb. 14: Anzahl der Hitzeperioden 17

Abb. 15: Anzahl der Trockenperioden 18

Abb. 16: Häufigkeiten autochthoner Wetterlagen 2000 bis 2100 (berechnet mit CLM) 19

Abb. 17: Verteilung der Sommertage pro Jahr auf Grundlage der regionalen Modellierung mit CLM (ohne Berücksichtigung der städtischen Nutzungsstruktur) 20

Abb. 18: Sommertage im Zeitraum 2001 bis 2010 21

Abb. 19: Sommertage im Zeitraum 2046 bis 2055 22

Abb. 20: Sommertage im Zeitraum 2090 bis 2099 23

Abb. 21: Verteilung der heißen Tage pro Jahr auf Grundlage der regionalen Modellierung mit CLM (ohne Berücksichtigung der städtischen Nutzungsstruktur) 23

Abb. 22: Heiße Tage im Zeitraum 2001 bis 2010 24

Abb. 23: Heiße Tage im Zeitraum 2046 bis 2055 25

Abb. 24: Heiße Tage im Zeitraum 2091 bis 2099 25

Abb. 25: Verteilung der Tropennächte pro Jahr auf Grundlage der regionalen Modellierung mit CLM (ohne Berücksichtigung der städtischen Nutzungsstruktur) 26

Abb. 26: Tropennächte im Zeitraum 2001 bis 2010 28

Abb. 27: Tropennächte im Zeitraum 2046 bis 2055 28

Abb. 28: Tropennächte im Zeitraum 2091 bis 2099 28

Abb. 29: Anzahl der Tage/Jahr mit PMV > 2.5 am Tage im Zeitraum 2001 bis 2010 29

Abb. 30: Anzahl der Tage/Jahr mit PMV > 2.5 am Tage im Zeitraum 2046 bis 2055 30

Abb. 31: Anzahl der Tage/Jahr mit PMV > 2.5 am Tage im Zeitraum 2091 bis 2099 31

Abb. 32: Anzahl der Tage mit Wärmebelastung am Tage im Zeitraum 2001 bis 2010 31

Abb. 33: Karte Wärmebelastung Tagsituation 2046 bis 2055 32

Abb. 34: Bewertung der Wärmebelastung in der Nacht für den Zeitschnitt 2010 324

Abb. 35: Bewertung der Wärmebelastung in der Nacht für den Zeitschnitt 2050 32

Abb. 36: Luftbild und Lage des Referenzgebietes im Ortsteil Prenzlauer Berg im Bezirk Pankow 32

Abb. 37: Lufttemperatur in 2 m Höhe um 14 Uhr im Ist- und Plan-Zustand sowie Differenz bei Umsetzung der BFF-Zielsetzung 36

Abb. 38: Lufttemperatur in 2 m Höhe um 4 Uhr im Ist- und Plan-Zustand sowie Differenz bei Umsetzung der BFF-Zielsetzung 36

Abb. 39: Luftbild und Lageplan des Referenzgebietes im Bezirk Charlottenburg 39

Abb. 40: Übersicht der Schnittachsen im Modellgebiet Charlottenburg 39

Abb. 41: Nord-Süd-Schnitt Ausgangssituation (vollständig versiegelt) 40

Abb. 42: West-Ost-Schnitt Ausgangssituation (vollständig versiegelt) 40

Abb. 43: Nord-Süd-Schnitt Szenario 1 (Straßen- und Hofbäume) 41

Abb. 44: West-Ost-Schnitt Szenario 5 (Straßen- und Hofbäume) 41

Abb. 45: Differenz Szenario 1 zur Ausgangssituation (Nord-Süd-Schnitt) 41

Abb. 46: Differenz Szenario 1 zur Ausgangssituation (West-Ost-Schnitt) 42

Abb. 47: Nord-Süd-Schnitt Szenario 2 (Albedoerhöhung) 43

Abb. 48: West-Ost-Schnitt Szenario 2 (Albedoerhöhung) 43

Abb. 49: Differenz Szenario 2 zur Ausgangssituation (Nord-Süd-Schnitt) 43

Abb. 50: Differenz Szenario 2 zur Ausgangssituation (West-Ost-Schnitt) 44

Abb. 51: Nord-Süd-Schnitt Szenario 3 (Fassadenbegrünung) 44

Abb. 52: West-Ost-Schnitt Szenario 3 (Fassadenbegrünung 44

Abb. 53: Differenz Szenario 3 zur Ausgangssituation (Nord-Süd-Schnitt) 45

Abb. 54: Differenz Szenario 3 zur Ausgangssituation (West-Ost-Schnitt) 45

Abb. 55: Nord-Süd-Schnitt Szenario 4 (Dachbegrünung) 45

Abb. 56: West-Ost-Schnitt Szenario 4 (Dachbegrünung) 46

Abb. 57: Differenz Szenario 4 zur Ausgangssituation (Nord-Süd-Schnitt) 46

Abb. 58: Differenz Szenario 4 zur Ausgangssituation (West-Ost-Schnitt) 46

Abb. 59: Nord-Süd-Schnitt Szenario 5 (Entsiegelung) 47

Abb. 60: West-Ost-Schnitt Szenario 5 (Entsiegelung) 47

Abb. 61: Differenz Szenario 5 zur Ausgangssituation (Nord-Süd-Schnitt) 47

Abb. 62: Differenz Szenario 5 zur Ausgangssituation (West-Ost-Schnitt) 48

Abb. 63: Nord-Süd-Schnitt Szenario 6 (Fassadendämmung) 48

Abb. 64: West-Ost-Schnitt Szenario 6 (Fassadendämmung) 48

Abb. 65: Differenz Szenario 6 zur Ausgangssituation (Nord-Süd-Schnitt) 49

Abb. 66: Differenz Szenario 6 zur Ausgangssituation (West-Ost-Schnitt) 49

Abb. 67: Nord-Süd-Schnitt Szenario 7 (Summenwirkung aller Einzelmaßnahmen) 49

Abb. 68: West-Ost-Schnitt Szenario 7 (Summenwirkung aller Einzelmaßnahmen) 50

Abb. 69: Differenz Szenario 7 zur Ausgangssituation (Nord-Süd-Schnitt) 50

Abb. 70: Differenz Szenario 7 zur Ausgangssituation (West-Ost-Schnitt) 50

Abb. 71: Nord-Süd-Schnitt Szenario 8 (Summenwirkung aller Einzelmaßnahmen) 51

Abb. 72: West-Ost-Schnitt Szenario 8 (Erweiterte Fassadenbegrünung) 51

Abb. 73: Differenz Szenario 8 zur Ausgangssituation (Nord-Süd-Schnitt) 52

Abb. 74: Differenz Szenario 8 zur Ausgangssituation (West-Ost-Schnitt) 52

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Klassifizierung der bioklimatischen Situation 33

Tab. 2 Mittlere Lufttemperatur in der Höhe z = 2 m 55

Tab. 3 Mittlere Lufttemperatur in der Höhe z = 24 m 56

1 Aufgabenstellung

Die mit dem zu erwartenden Klimawandel eintretenden Veränderungen von Niederschlag und Temperaturen werden sich auf die Gesellschaft in ganz unterschiedlicher Weise auswirken. Hinsichtlich der Lebensqualität in den urbanen Räumen ist mit einer höheren sommerlichen Wärmebelastung zu rechnen, als dies bereits heute der Fall ist. Da sich voraussichtlich die Anzahl der Tage mit Hitzestress erhöhen wird, kommt der zukunftsorientierten räumlichen Planung zur Erhaltung bioklimatisch unbedenklicher Lebensbedingungen eine wichtige Rolle zu. Die weitere städtebauliche Entwicklung trägt jedoch auf der anderen Seite vermutlich auch zu weiteren Erwärmungen des Siedlungsgebietes bei, die sich durch die regionalen Auswirkungen des Klimawandels in den nächsten Dekaden noch verschärfen wird. Daraus ergibt sich die Erfordernis, die Wechselwirkungen zwischen der baulichen Dichte, den Grünanteilen sowie Versiegelungsgraden auf der einen Seite und der bioklimatischen Belastung einzelner Quartiere in der Zukunft zu betrachten, damit planerische Entscheidungen diese Belange mit in die Abwägung einbeziehen können.

In diesem Kontext ist der Stadtentwicklungsplan Klima (StEP Klima) als Ausgangspunkt eines dauerhaften Anpassungsprozesses entstanden. Das übergeordnete Ziel ist dabei die Sicherung der Lebensqualität aller Berlinerinnen und Berliner und die Entwicklung von Maßnahmen, welche für die Anpassung an den Klimawandel unter den charakteristischen Berliner Bedingungen am erfolgreichsten erscheinen. Zur Bereitstellung von entsprechenden Beurteilungsgrundlagen wurden, im Auftrag der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH in Kooperation mit Prof. Dr. G. Groß (Universität Hannover) im Verlauf des Jahres 2010 verschiedene modellgestützte Analysen zu den Auswirkungen des Klimawandels in Berlin durchgeführt. Im Vordergrund stand die Modellierung gesamtstädtischer meteorologischer Parameter für mehrere Zeithorizonte zur Analyse der räumlichen Strukturen in Verbindung mit der klimaökologischen Belastungssituation unter den Aspekten des globalen Klimawandels. Auf Basis eines Vergleichs der Zeithorizonte 2010 zu 2050 lassen sich die zukünftig bioklimatisch zusätzlich belasteten Bereiche und damit künftige Handlungsschwerpunkte in Berlin abgrenzen.

Für die Ermittlung dieser Zusammenhänge sowohl für den Istzustand als auch den zukünftigen Zeithorizonten wurde als meteorologische Rahmenbedingung eine austauscharme, sommerliche Hochdruckwetterlage angenommen, die häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen einhergeht. Eine solche Wetterlage ist auch durch die Entstehung kleinräumiger Windsysteme zwischen überwärmten Siedlungsbereichen einerseits und vergleichsweise kühlen, vegetationsgeprägten Freiflächen andererseits in der Nacht gekennzeichnet. Unter diesen Bedingungen können nächtliche Kalt- und Frischluftströmungen aus innerstädtischen Grünflächen zum Abbau von Belastungen beitragen. Der vorliegenden Untersuchung geht eine gesamtstädtische Klimaanalyse voraus, die im Rahmen der Aktualisierung des Umweltatlas der Senatsverwaltung durchgeführt wurde (GEO-NET 2009). Methodische Grundlagen für die weitere Modellierung der meteorologischen Grundlagendaten zum Klimawandel für unterschiedliche Zeitschnitte ist das Methoden-Paket „ENVELOPE“. Auf Basis der Informationen des regionalen Klimamodell CLM wurden mit dem Modell FITNAH-3D räumlich hochauflösende Temperatur- Feuchte- und Strömungsfelder modelliert und die sommerliche Wärmebelastung zu aussagekräftigen meteorologischen Parametern aggregiert.

Während es bei der gesamtstädtischen Perspektive um die Untergliederung des Stadtgebietes in die unterschiedlich thermisch belasteten Areale einerseits geht, zielen die durchgeführten hoch aufgelösten, blockbezogenen Modellrechnungen in einem weiteren Schritt auf die Umsetzung konkreter Maßnahmen zur Verringerung der sommerlichen Wärmebelastung andererseits ab. Um die lokalklimatische Wirksamkeit zur Temperaturabsenkung verschiedener Maßnahmen durch die Erhöhung des Grünanteils beurteilen zu können, wurden diese am Beispiel eines Referenzgebietes in Charlottenburg simuliert. Die Maßnahmen wie beispielsweise ebenerdige Entsiegelung oder die Begrünung von Dächern und Fassaden werden im Anschluss sowohl hinsichtlich ihrer Einzelwirkung als auch in den summarischen Effekten beurteilt.

2. Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis

2.1 Gesamtstädtische Ebene

Nutzungsstruktur und Geländehöhe sind wichtige Eingangsdaten für die Klimamodellierung, da über die Oberflächengestalt, die Höhe der jeweiligen Nutzungsstrukturen sowie deren Versiegelungsgrad das Strömungs- und Temperaturfeld entscheidend beeinflusst wird. Die dafür erforderlichen Geodaten wurden von der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung des Landes Berlin im Rahmen der von GEO-NET (2009) durchgeführten gesamtstädtischen Klimaanalyse zur Verfügung gestellt. Das gesamte Untersuchungsgebiet hat bei einer Abmessung von 38 km x 46 km eine Fläche von insgesamt etwa 1750 km^2. Die Modellierung der meteorologischen Parameter erfolgte mit einer Zellengröße von 50 m x 50 m.

Zur Bereitstellung der orographischen Eingangsparameter für die Berechnung des Wind- und Temperaturfeldes wurde aus den Höheninformationen des Informationssystems Stadt und Umwelt (ISU) ein einheitliches Geländehöhenmodell für den Untersuchungsraum generiert.

Für Informationen zur Nutzungsstruktur konnte auf das Informationssystem Stadt und Umwelt (ISU) der Senatsverwaltung zurückgegriffen werden. Für die Aufbereitung der Modelleingangsdaten wurde die digitale Grundkarte Berlin im Maßstab 1:5.000 herangezogen. Sie enthält u.a. block(teil)flächenbezogene Angaben zur realen Flächennutzung und zum Versiegelungsgrad (SenStadt 2008b-c; SenStadt 2007). Um den speziellen Anforderungen der Modellanalyse gerecht werden zu können, wurde die Nutzungsklassifizierung des ISU zu einem 12-klassigen Nutzungsschlüssel aggregiert.

Eine wichtige Modelleingangsgröße stellt die Strukturhöhe dar, welche einen maßgeblichen Einfluss auf das lokale Windfeld ausübt. Die von der Senatsverwaltung zur Verfügung gestellten Höhenangaben beinhaltet sowohl die Geometrie der Gebäude als auch deren Höhe. Auf Grundlage der Einzelgebäude wurde den Blockflächen der digitalen Grundkarte eine mittlere Strukturhöhe zugewiesen.

2.2 Referenzgebiet

Die Modellierung von Maßnahmen zur Absenkung der sommerlichen Wärmebelastung erfolgte mit einer höheren räumlichen Auflösung von 2 m x 2 m. Dafür wurde beispielhaft ein Gebäudeblock in Charlottenburg („Blockbebauung der Gründerzeit mit Seitenflügel und Hinterhäusern“) mit seiner Innenhofstruktur in das Modellraster umgesetzt. Hinsichtlich der Bauhöhen konnte auf die Datenbasis der gesamtstädtischen Untersuchung zurückgegriffen werden.

Im Gegensatz zur gesamtstädtischen Modellrechnung lassen sich im Referenzgebiet nun auch vergleichsweise kleine Strukturen wie Straßenbäume abbilden. Auf Grundlage des digitalen Straßenbaumkatasters konnte der Straßenbaumbestand erfasst und durch weitere Lückenschließungen ergänzt werden. Da für die Innenhofbereiche keine Informationen zum Baumbestand vorliegen, sind die dort vorhandenen Bäume auf Grundlage aktueller Luftbilder (Stand 2009) erfasst und der Datenbasis hinzugefügt worden. Differenzierte Angaben zu Wuchshöhe und Kronendurchmesser, sowie der für Fassadenbegrünung vorgesehenen Bereiche wurde von der Arbeitsgruppe der Technischen Universität Berlin übermittelt. Zudem wurden auf Grundlage der Luftbilder die für eine Dachbegrünung möglichen ebenen Dachflächen ausgewiesen.

3. Methodik

3.1 Das Mesoskalenmodell FITNAH

Allgemeines

Neben globalen Klimamodellen und regionalen Wettervorhersagemodellen wie sie zum Beispiel vom Deutschen Wetterdienst für die tägliche Wettervorhersage routinemäßig eingesetzt werden, nehmen kleinräumige Modellanwendungen für umweltmeteorologische Zusammenhänge im Rahmen von stadt- und landschaftsplanerischen Fragestellungen einen immer breiteren Raum ein. Die hierfür eingesetzten meso- (und) mikroskaligen Modelle erweitern das Inventar meteorologischer Werkzeuge zur Berechnung atmosphärischer Zustände und Prozesse.

Der Großteil praxisnaher umweltmeteorologischer Fragestellungen behandelt einen Raum von der Größenordnung einer Stadt oder einer Region. Die bestimmenden Skalen für die hier relevanten meteorologischen Phänomene haben eine räumliche Erstreckung von Metern bis hin zu einigen Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis hin zu Stunden. Unter Verwendung des üblichen Einteilungsschemas meteorologischer Phänomene müssen diese in die Mikro- und Mesoskala eingeordnet werden. Beispiele für solche mesoskaligen Phänomene sind der Einfluss orographischer Hindernisse auf den Wind wie Kanalisierung und Umströmungseffekte, Land-See-Winde, Flurwinde oder auch Düseneffekte in Straßen, sowie das Phänomen der urbanen Wärmeinsel. Im mikroskaligen Bereich lassen sich hingegen noch feinere Strukturen auflösen, so dass hier z.B. der Einfluss von Begrünungsmaßnahmen auf die thermische Situation im Umfeld eines Gebäudes oder die Ausbreitung von Luftschadstoffen im Straßenraum im Vordergrund stehen.

Obwohl die allgemeine Struktur und die physikalischen Ursachen dieser lokalklimatischen Phänomene im Allgemeinen bekannt sind, gibt es nach wie vor noch offene Fragen hinsichtlich der räumlichen Übertragung auf andere Standorte oder der Sensitivität bezüglich der Wechselwirkungen einzelner Strömungssysteme untereinander. Ein Grund hierfür sind die relativ kleinen und kurzen Skalen der mesoskaligen Phänomene und deren unterschiedlichem Erscheinungsbild in komplexem Gelände, was es extrem schwierig macht, mit Hilfe einer beschränkten Anzahl von Beobachtungen eine umfassende Charakterisierung zu erhalten. Mit Hilfe ergänzender Modelluntersuchungen kann dieser Nachteil überwunden werden.

Beginnend mit einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG 1988) wurden gerade in Deutschland eine Reihe mesoskaliger Modelle konzipiert und realisiert. Der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist sehr hoch und zusammen mit den über die letzten Dekaden gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit diesen Modellen steht neben Messungen vor Ort und Windkanalstudien ein weiteres leistungsfähiges und universell einsetzbares Werkzeug zur Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen in kleinen, stadt- und landschaftsplanerisch relevanten Landschaftsausschnitten zur Verfügung.

Grundlagen mesoskaliger Modelle

Die Verteilung der lokalklimatisch relevanten Größen wie Wind und Temperatur können mit Hilfe von Messungen ermittelt werden. Aufgrund der großen räumlichen und zeitlichen Variation der meteorologischen Felder im Bereich einer komplexen Umgebung sind Messungen allerdings immer nur punktuell repräsentativ und eine Übertragung in benachbarte Räume selten möglich. Mesoskalige Modelle wie FITNAH können zu entscheidenden Verbesserungen dieser Nachteile herangezogen werden, indem sie physikalisch fundiert die räumlichen und/oder zeitlichen Lücken zwischen den Messungen schließen, weitere meteorologische Größen berechnen, die nicht gemessen wurden und Wind- und Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden Struktur ermitteln.

Die Modellrechnungen bieten darüber hinaus den wertvollen Vorteil, dass sich Planungsvarianten und Ausgleichsmaßnahmen in ihrer Wirkung und Effizienz studieren lassen und auf diese Art und Weise optimierte Lösungen gefunden werden können.

Grundgleichungen

Für jede meteorologische Variable wird eine physikalisch fundierte mathematische Berechnungsvorschrift aufgestellt. Alle mesoskaligen Modelle basieren daher, wie Wettervorhersage- und Klimamodelle auch, auf einem Satz sehr ähnlicher Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (Navier-Stokes Bewegungsgleichung), der Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung) und der Energieerhaltung (1. Hauptsatz der Thermodynamik).

Je nach Problemstellung und gewünschter Anwendung kann dieses Grundgerüst noch erweitert werden um z.B. die Effekte von Niederschlag auf die Verteilung der stadtklimatologisch wichtigen Größen zu berücksichtigen. In diesem Falle müssen weitere Bilanzgleichungen für Wolkenwasser, Regenwasser und feste Niederschlagspartikel gelöst werden. Die Lösung des Gleichungssystems erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom mesoskaligen Modell erfasst werden können. Je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst (vgl. Abb. 1).

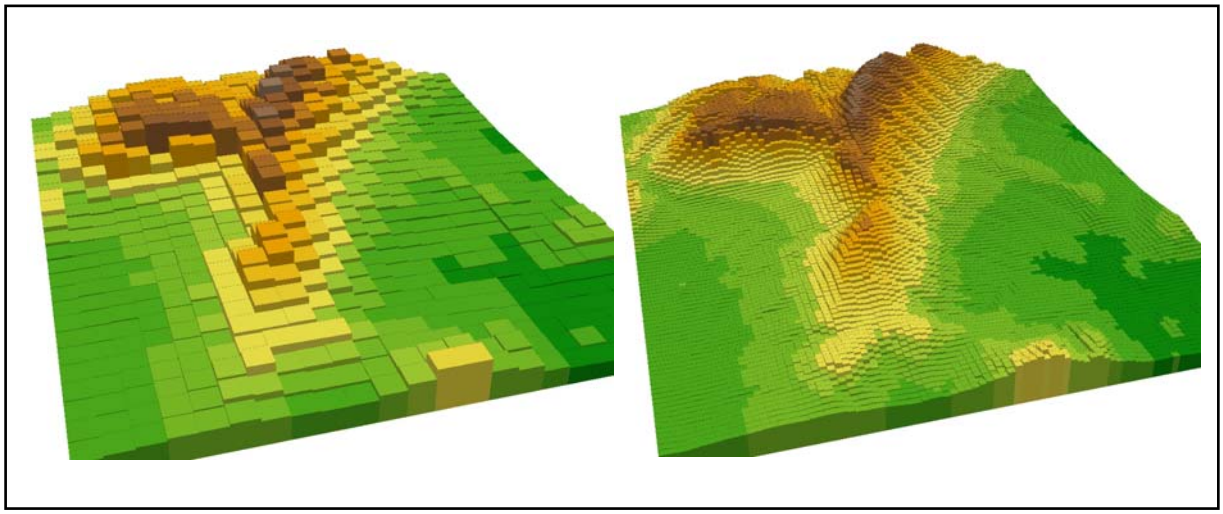


Abb. 1: Unterschiedliche Rasterweiten (links: 500 m x 500 m; rechts: 125 m x 125 m) bei einem digitalen Geländehöhenmodell

Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und an die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. Die für die Modellierung mit FITNAH verwendete räumliche Maschenweite Δx beträgt in der gesamtstädtischen Untersuchung 50 m. Bei allen Modellrechnungen ist die vertikale Gitterweite nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre sind die Rechenflächen besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 70 m. Nach oben hin wird der Abstand Δz immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m über Grund. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Die Auswertungen der FITNAH-Modellierung beziehen sich auf das bodennahe Niveau der Modellrechnung (2 m über Grund = Aufenthaltsbereich der Menschen). Die mikroskalige Modellierung der

Maßnahmenwirksamkeit im Referenzgebiet wird dagegen in einer Rasterauflösung von konstant 2 m x 2 m durchgeführt.

Parametrisierungen

Das mesoskalige Modell FITNAH berechnet alle meteorologischen Variablen als repräsentative Werte für das entsprechende Raster. Mit der Rasterweite wird somit auch die Dimension der räumlich noch auflösbaren Strukturen festgelegt. Typische Rasterweiten sind 25m x 25m bis 1000m x 1000m. Sie decken damit den Maßstabsbereich von 1:20 000 bis 1:100 000 ab. Dies korrespondiert mit der Planungsebene Flächennutzungsplan bzw. Regionalplan. Sind diese Strukturen von ihrer räumlichen Ausprägung her kleiner als die Rasterweite, ist das Modell nicht in der Lage diese zu berechnen (beispielsweise können einzelne Wolken in globalen Klimamodellen nicht berechnet werden). Ist nun aber bekannt, dass solche vom Modell nicht erfassbaren Strukturen relevante Auswirkungen auf die lokalklimatischen Größen haben die berechnet werden sollen, so müssen diese in geeigneter Weise berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit ist dabei die Darstellung der summarischen Effekte der nicht aufgelösten Strukturen durch die vom Modell berechneten Variablen (Parametrisierung).

Die beiden wichtigsten Strukturen, die bei stadtklimatischen Fragestellungen berücksichtigt werden müssen, sind einzelne Gebäude und der Baumbestand. Diese sind von ihrer räumlichen Dimension allerdings so klein, dass sie üblicherweise durch das gewählte Rechengitter nicht erfasst werden können und somit parametrisiert werden müssen. In bebautem Gelände stellen sich die einzelnen Gebäude der Strömung in den Weg und verzögern diese. Lokal kann es zwar durch Düseneffekte auch zu einer Beschleunigung des Windes kommen, die summarische Wirkung über eine Rasterzelle mit Gebäuden ist aber eine Verzögerung. Gleichzeitig wird durch die Vielzahl der unterschiedlichen Hindernisse die Turbulenz verstärkt. Auch die Temperaturverteilung wird in starkem Maße modifiziert, da die in die bodennahe Atmosphäre ragenden Baukörper bis zur mittleren Bauhöhe in einem Wärmeaustausch mit der Umgebung stehen. Diese Effekte können über einen Porositätsansatz berücksichtigt werden. Einzelne Gebäude füllen nur einen Anteil des Volumens aus, welches durch das horizontale Raster und die Anordnung der Rechenflächen in der Vertikalen aufgespannt wird. Dieses Verhältnis bestimmt dann die Porosität (Abb. 2). Das Rastervolumen kann folglich nur noch zu einem geringen Anteil durchströmt werden, wobei die Porosität als gleichmäßig verteilt angenommen wird.

Abb. 2: Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit

Eine Strömung ist nur noch in den offenen Poren möglich, was für die mittlere Geschwindigkeit eine deutliche Verzögerung bedeutet. Die Temperatur wird durch die gebäudespezifischen Parameter wie Gebäudehöhe, Überbauungsgrad oder anthropoge Abwärme bestimmt und damit das Temperaturfeld der bodennahen Atmosphäre bis in die mittlere Höhe der Bebauung modifiziert (Grundlagen und Beschreibung: Groß, 1989).

Ein vorhandener Baumbestand kann über die Baumhöhe, die Bestandsdichte und die Baumart charakterisiert werden. Auch diese Bestandsstrukturen sind in der Regel so klein, dass sie nicht vom Raster des Modells aufgelöst werden können und damit parametrisiert werden müssen. Eine solche Parametrisierung muss in der Lage sein, die Windberuhigung im Bestand, die Erhöhung der Turbulenz im oberen Kronenraum und die nächtliche Abkühlung bzw. die mittägliche Erwärmung im oberen Kronendrittel in Übereinstimmung mit Beobachtungen zu erfassen (Abb. 3). Bei FITNAH werden zusätzliche Terme in das Gleichungssystem eingeführt, die zum einen über einen Widerstandsterm die Modifizierung des Windfeldes gewährleistet und zum anderen den Strahlungshaushalt im Bereich eines Baumbestandes modifiziert (Grundlagen und Beschreibung: Groß, 1993).

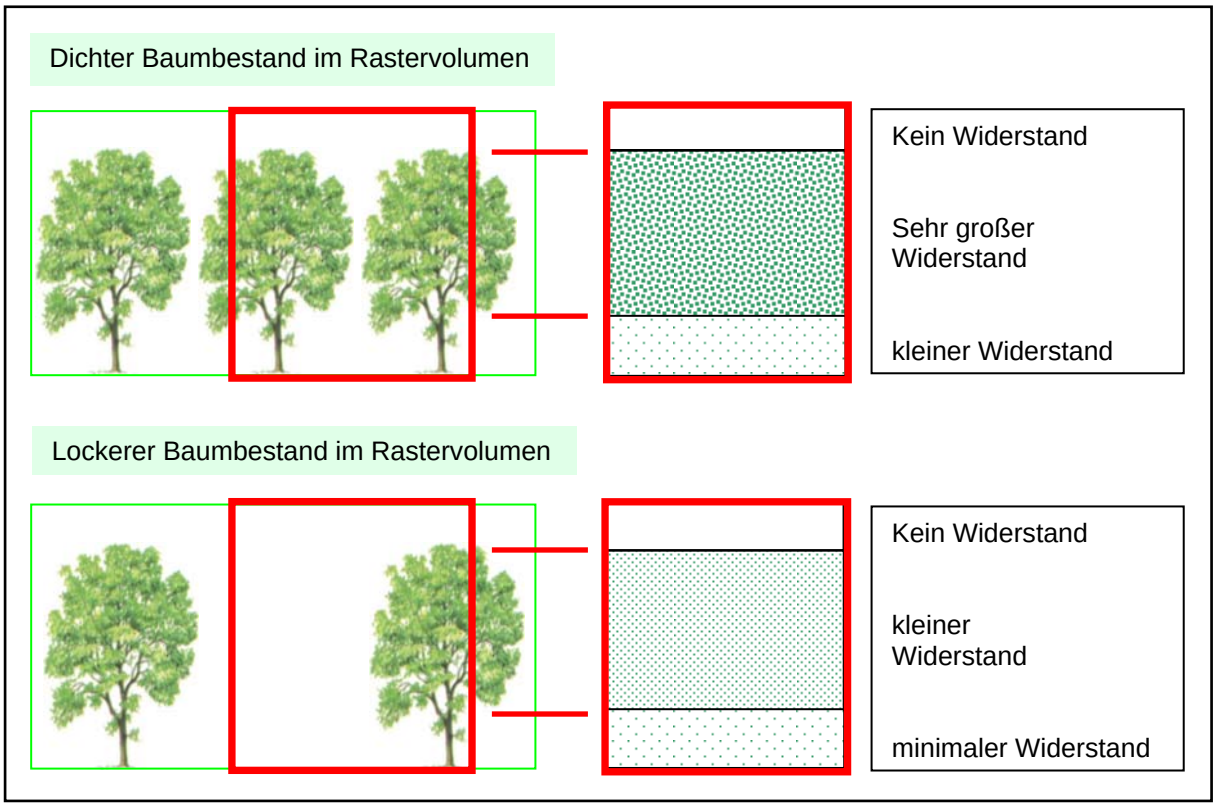


Abb. 3: Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle

Die beschriebenen Parametrisierungen sind geeignet, die aus Beobachtungen her bekannten, charakteristische Veränderungen der verschiedenen meteorologischen Variablen im Bereich von Städten und Wäldern mit FITNAH zu berechnen.

In Abb. 4 sind schematisch die simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt.

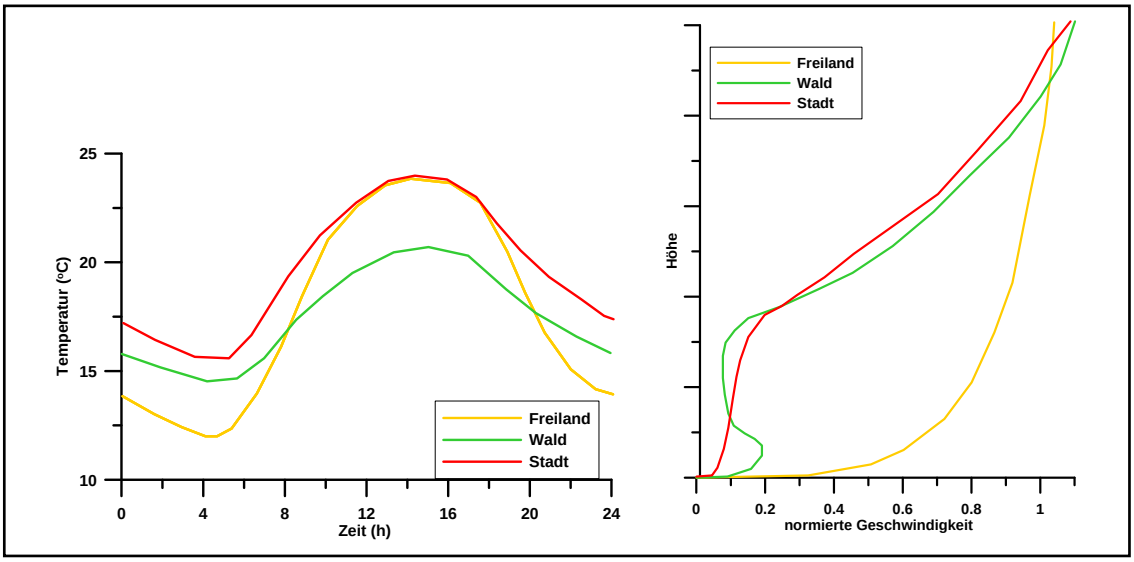


Abb. 4: Exemplarischer Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen

Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass sowohl Freiflächen wie z.B. Wiesen als auch Bebauung ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, die nächtliche Abkühlung der Siedlungsflächen hingegen deutlich geringer ist. Waldflächen nehmen eine vermittelnde Stellung ein. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird der Einfluss von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich, während sich über dem Freiland ein weitgehend ungestörtes Windprofil ausprägen kann.

Eingangsdaten

Bei numerischen Modellen wie FITNAH muss zur Festlegung und Bearbeitung einer Aufgabenstellung eine Reihe von Eingangsdaten zur Verfügung stehen (Abb. 5). Diese müssen zum einen die Landschaft charakterisieren, für welche die lokalklimatische Studie durchgeführt werden soll, und zum anderen auch die größerskaligen meteorologischen Rahmenbedingungen wie Wetterlage oder Klimaszenario definieren.

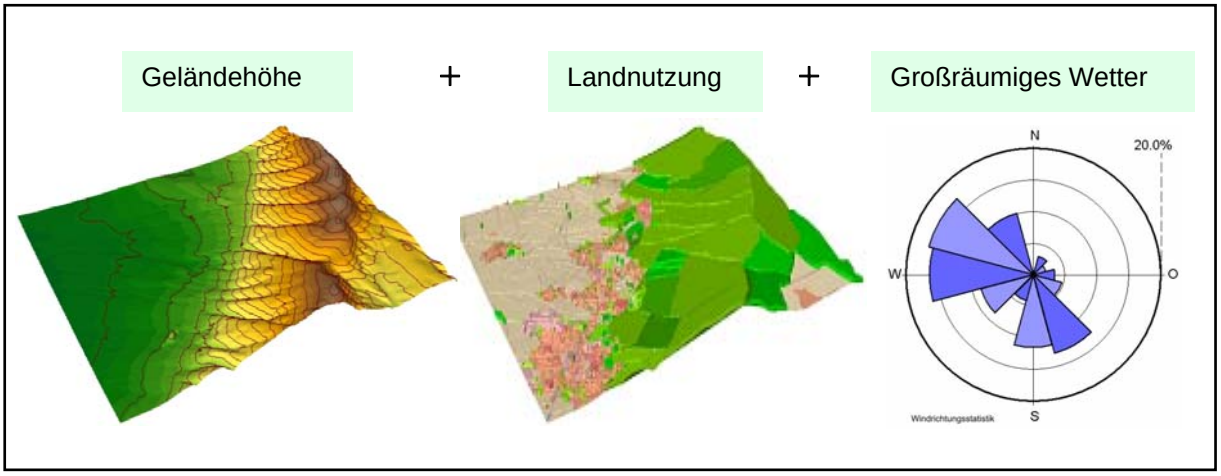


Abb. 5: Eingangsdaten für die Modellrechnung

Alle Eingangsdaten sind jeweils als repräsentativer Wert für eine Rasterzelle bereit zu stellen:

- Geländedaten (z.B. Geländehöhe, Neigung, Orientierung)
- Nutzungsdaten (Verteilung der Landnutzung)
    - Bei urbanen Räumen: z.B. Gebäudehöhe, Überbauungsgrad, anthropogene Abwärme, Albedo,.....
    - Bei Bewuchs: z.B. Bestandshöhe, bestandsdichte, Blattflächenverteilung,...
- Wetter-/Klimadaten (z.B. großräumige Anströmungsrichtung und –Geschwindigkeit, Luftmassencharakteristiken wie Temperatur und Feuchte).

Synoptische Rahmenbedingungen

Während autochthoner Wetterlagen können sich die lokalklimatischen Besonderheiten in einer Stadt besonders gut ausprägen. Eine solche Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwachen überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet. Bei den hier durchgeführten numerischen Simulationen wurden die großräumigen synoptischen Rahmenbedingungen entsprechend festgelegt:

- Bedeckungsgrad 0/8,
- kein überlagernder geostrophischer Wind,
- relative Feuchte der Luftmasse 50%.

Die vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten bei einer austauscharmen Wetterlage bedingen einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht. Bei gleichzeitiger hoher Ein- und Ausstrahlung können sich somit lokal bioklimatische und lufthygienische Belastungs-, aber auch Gunsträume besonders prägnant ausbilden. Charakteristisch für diese (Hochdruck-) Wetterlage ist die Entstehung eigenbürtiger Kaltluftströmungen (Flurwinde), die durch den Temperaturgradienten zwischen kühlen Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden.

3.2 ENVELOPE-Methode

Im 4. Sachstandsbericht des IPCC 2007 über Klimaänderungen wird der aktuelle wissenschaftliche Kenntnisstand zusammengefasst. Danach ist davon auszugehen, dass sich die globale Mitteltemperatur bis zum Jahre 2100 um etwa 2 bis 4 K verändern wird. Damit einher wird auch eine Zunahme von extremen Wetterereignissen wie Hitze, Dürre oder auch eine Veränderung in der Intensität und Verteilung von Niederschlägen erwartet.

In dem Sachstandsbericht wird auch festgestellt, dass das Vertrauen in regionale Klimaprojektionen größer geworden ist da die Aussagen der globalen Szenarienrechnungen nunmehr belastbarer sind, die regionalen Modelle besser geworden sind und die nötige Rechnerkapazität zur Verfügung steht.

Aus diesem Grunde können die in Deutschland verfügbaren Ergebnisse regionaler Klimamodell als sehr guter Hinweis für die wahrscheinliche Klimaentwicklung in den nächsten 100 Jahren angesehen werden. Modellergebnisse stehen derzeit zur Verfügung mit den Modellen CLM und REMO, sowie den statistischen Verfahren WETTREG und STAR. Die Ergebnisse dieser verschiedenen Verfahren unterscheiden sich zwar im Detail, insbesondere bei der Ab-

schätzung der Extremwerte, zeigen aber gerade für die klimatologischen Mittelwerte eine recht einheitliche Tendenz. Danach ergibt sich für Deutschland, durchaus mit regionalen Unterschieden, für das Emissionsszenario A1B eine Änderung der bodennahen Jahresmitteltemperatur für das Ende des Jahrhunderts von plus 2-3 K.

Während gleichzeitig für die Summe des Jahresniederschlages nur geringe Veränderungen gegenüber dem heutigen Zustand simuliert werden, findet man eine deutliche saisonale Verschiebung. Im Sommer ist mit einer Abnahme von typischerweise 20-30% zu rechnen, im Winter dagegen mit einer Zunahme von 10-20%.

Diese zu erwartenden Veränderungen bei Temperatur und Niederschlag werden Auswirkungen auf verschiedenste gesellschaftliche Bereiche haben wie etwa in der Land- und Forstwirtschaft, der Wasserwirtschaft, der Energieversorgung oder auch der menschlichen Gesundheit insbesondere in urbanen Räumen.

Obwohl die Ergebnisse von CLM und REMO auf einem, verglichen mit dem globalen Maßstab, sehr feinen Rechengitter vorliegen, werden für die Abschätzung von Klimafolgen im städtisch geprägten Bereich detailliertere Aussagen benötigt, zumal die Städte mit ihren veränderten Landnutzungen in der Regel gar kein Bestandteil der Regionalmodelle sind. Daher sind regionale Modelle mit einer für ihren Zweck sehr guten räumlichen Auflösung von 10 - 20 km nicht in der Lage, die relevanten lokalen Handlungsfelder wie fein strukturierte Wälder, unterschiedliche landwirtschaftliche Kulturen oder auch Städte räumlich aufzulösen und daher in den Klimaprojektionen ausreichend zu berücksichtigen.

Diese Aufgabe können kleinräumige, an den entsprechenden Raum angepasste mesoskalige Simulationsmodelle übernehmen. Diese sind aufgrund ihrer feinen räumlichen Auflösung in der Lage, die Vielfalt und Heterogenität der naturräumlichen Gliederung einer Landschaft auf die Verteilung der meteorologischen Größen zu erfassen.

Mesoskalige dreidimensionale Simulationen werden dabei nicht parallel zu einem regionalen Klimamodell ausgeführt, vielmehr erfolgt die Übertragung der regionalen Ergebnisse auf die lokale Ebene durch ein statistisch-dynamisches Verfahren. Dabei werden die größerskaligen Ergebnisse statistisch ausgewertet und mit den Ergebnissen einer Vielzahl von mesoskaligen Simulationen verknüpft. Es werden keine lokalen Klimaszenarienrechnung für die nächsten Dekaden durchgeführt, sondern die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle „intelligent“ auf kleinere Raumeinheiten interpoliert, wobei eine Berücksichtigung der lokalen Besonderheiten einer Landschaft mit unterschiedlicher Landnutzung und Relief erfolgt.

Ausgehend von einer definierten Fragestellung, werden die Ergebnisse der regionalen Klimaszenarienrechnungen problemspezifisch ausgewertet, so dass sie als übergeordnete Eingangsdaten für das mesoskalige Modell verwendet werden können. Beispielhaft soll das Vorgehen anhand der Fragestellung:

Wie ändert sich die Wärmebelastung (Hitzestress) in Städten in der Zukunft? Wie viele Tage mit Hitzestress sind in der Zukunft zu erwarten?

beschrieben werden.

Die Wärmebelastung für den Menschen kann anhand eines Wärmehaushaltsmodells abgeschätzt werden (Klima-Michel), bei dem der Wärmeaustausch einer Norm-Person mit seiner Umgebung berechnet wird. Als Kriterium wird dabei ein PMV-Wert berechnet (PMV = „Predicted Mean Vote“), der eine Maßzahl für die thermischen Komfortbedingungen des Menschen darstellt.

Die PMV-Skala reicht dabei (in der Regel) von −3 für Kältestress bis +3 (Hitzestress). Nach VDI (1998) sind Umgebungsbedingungen, die einen PMV-Wert von größer 2,5 bedingen, mit Hitzestress für den Menschen verbunden. Bei der Berechnung des PMV-Wertes müssen als wichtigste meteorologische Eingangsgrößen die Lufttemperatur, die Windgeschwindigkeit, der Dampfdruck und die Strahlungstemperatur am Aufenthaltsort bekannt sein. Diese meteorologischen Parameter unterscheiden sich innerhalb städtischer Strukturen in weiten Grenzen. In Abhängigkeit von den stadtspezifischen Faktoren (z.B. Bebauungshöhe, Versiegelung, Durchgrünungsgrad) und der Charak-

terisierung der großräumigen Wettersituation (z.B. Wind, Luftmasseneigenschaften), können mit Hilfe eines mesoskaligen Modells diese Verteilungen innerhalb eines urbanen Raumes detailliert berechnet werden.

Während die stadtspezifischen Eingangsgrößen bekannt sind oder für die Zukunft vorgegeben werden müssen, können die Wetterlageninformationen aus den Ergebnissen der regionalen Klimamodelle abgeleitet werden.

Zur Beantwortung der Ausgangsfrage kann die Auswertung der regionalen Klimaszenarienrechnungen problemspezifisch eingeengt werden. Die regionalen Klimamodelle liefern aufgrund interner Variabilität für verschiedene Rechenläufe bei gleichem Emissionsszenario (z.B. A1B) durchaus unterschiedliche Resultate.

Um sich von den Zufälligkeiten einer bestimmten Realisierung eines regionalen Klimaszenarios zu lösen ist es empfehlenswert, die Ergebnisse dieser Rechnungen statistisch zu analysieren und daraus die notwendigen Eingangsgrößen für das mesoskalige Modell zu generieren. Die aus den Zeitreihen berechneten Häufigkeitsverteilungen für Wind, Temperatur usw. liefern neben der Aufteilung in entsprechende Werteabschnitte auch die Eckpunkte (niedrigster Wert, höchster Wert), innerhalb derer sich die regionalen Ergebnisse für alle Tage der nächsten 100 Jahr bewegen (Abb. 6).

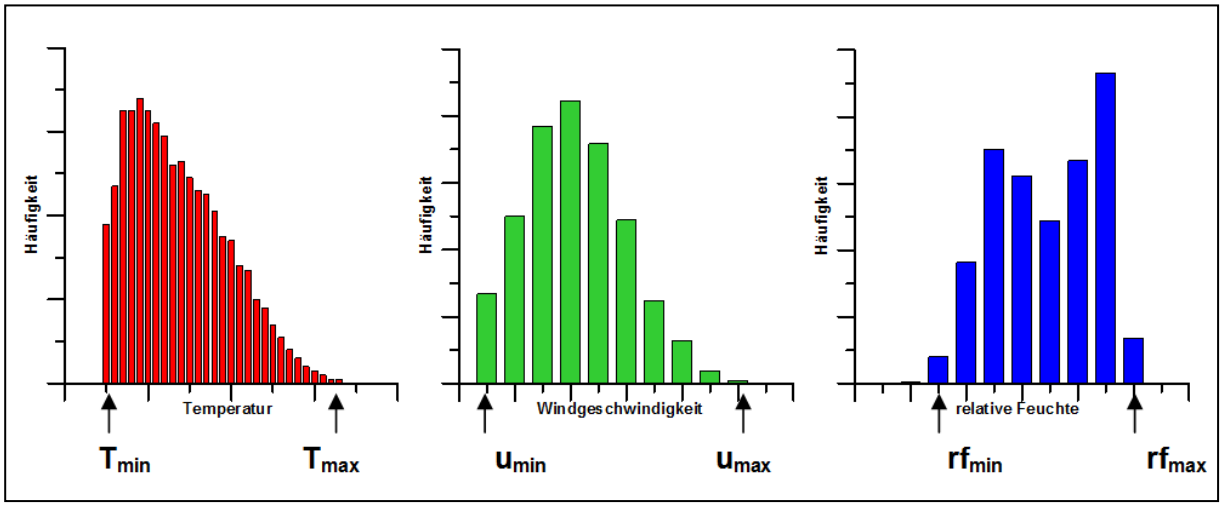


Abb. 6: Häufigkeitsverteilungen von Temperatur, Wind und relativer Feuchte für den Zeitraum bis 2100

Werden diese Auswertungen für die regionalen Variablen Wind, Temperatur und Dampfdruck durchgeführt, so spannen die daraus abgeleiteten Extremwerte (Minimum und Maximum) einen Raum auf, in dem sich z.B. die 14 Uhr Situationen in der Zukunft im Sommer abspielen (Abb. 7). Alle berechneten regionalen meteorologische Situationen liegen innerhalb dieses Raumes und werden von den Seitenflächen eingehüllt (engl.: „envelope"=Umhüllende). In Anlehnung an ein vom Deutschen Wetterdienst vorgestelltes Verfahren (Roos et al. 2009) werden für die größerskaligen meteorologischen Situationen, die durch die acht Eckpunkte des Würfels definiert sind, die Verteilungen der lokalen Wind-, Temperatur- und Feuchteverhältnisse mit dem mesoskaligen Modell berechnet. Dabei bilden die mit dem mesoskaligen Modell berechneten Temperaturen in 2 m über Grund für verschiedene regionale Szenarien (umin, Tmin, rfmin bzw. umax, Tmax, rfmax) die Grundlage für die weitere Bearbeitung.

Basierend auf den Häufigkeitsverteilungen von Wind, Temperatur und relativer Feuchte des Regionalmodells wird eine große Anzahl von meteorologischen Situationen (Wetterlagen) festgelegt (Abbildung 8), die in ihrer statistischen Gesamtheit die Einzelverteilungen (Abbildung 6) wiedergeben. Diese Vorgehensweise befreit von den individuellen Ergebnissen eines Szenarienlaufs des regionalen Modells, die für eine andere Realisierung durchaus abweichen kann.

Die Bestimmung der Verteilungen von Wind, Temperatur und Dampfdruck für ein Stadtgebiet für eine bestimmte meteorologische Situation der regionalen Klimarechnung erfolgt nunmehr nicht durch eine eigene mesoskalige Rechnung für diese Wetterlage, sondern aus der anteilsmäßigen Wichtung der Resultate der mesoskaligen Simulationen für die acht Eckpunkte des Würfels, der die Gesamtheit aller Wetterlagen des ausgesuchten Zeitabschnittes (z.B. Sommer, Dekade) umspannt. (Abbildung 9). Dabei wird jeweils eine lineare Änderung vorausgesetzt, was für einzelne, ausgewählte Situationen möglicherweise nur eine grobe Näherung darstellt.

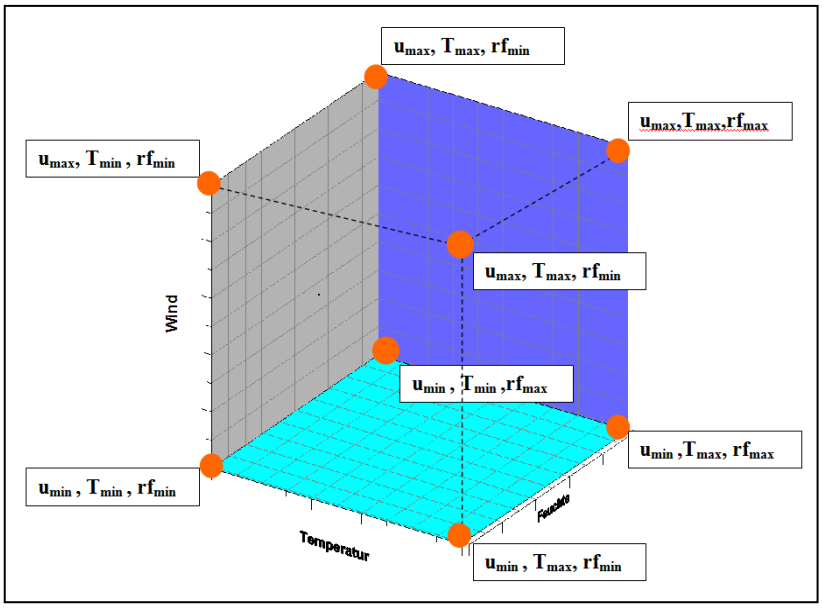


Abb. 7: Begrenzungsraum für die ausgesuchten Wettersituationen

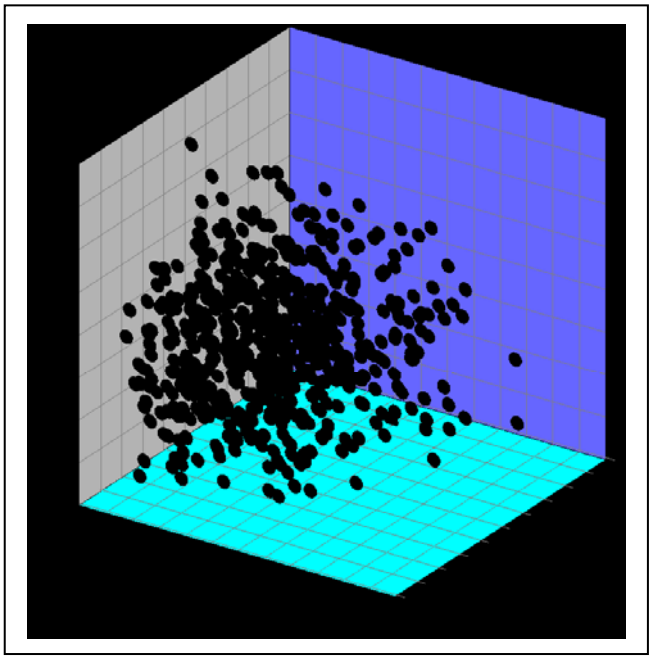


Abb. 8: Verteilung der 14-Uhr Situationen im Zustandsraum

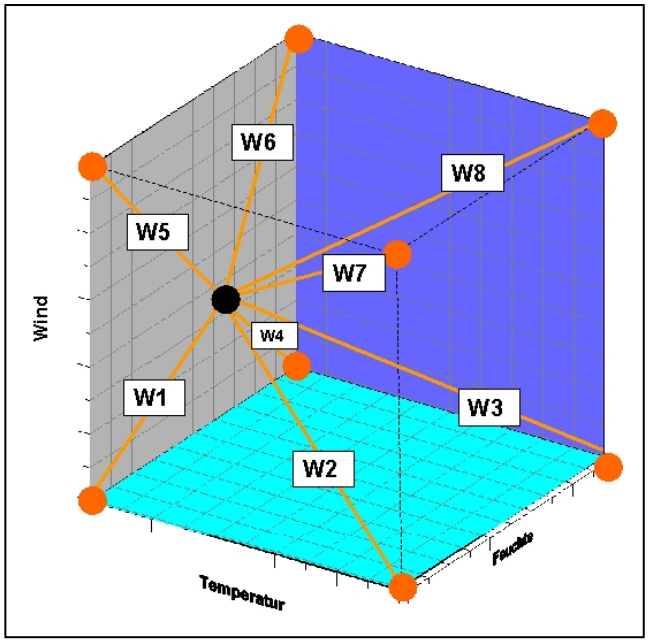


Abb. 9: Schema zur Berechnung der meteorologischen Variablen für einzelne Wettersituationen aus den Ergebnissen der 8 Basis-Simulationen

Für jeden Tag eines ausgesuchten Zeitfensters (z.B. Jahrhundert, Dekade) kann die räumliche Verteilung von beispielsweise Wind, Temperatur und Feuchte in einem Stadtgebiet berechnet und daraus beispielsweise der PMV-Wert als Kriterium für die Wärmebelastung des Menschen abgeleitet werden. Anhand der Einzelergebnisse kann schließlich auch die Gesamtzahl der Tage mit Wärmebelastung pro Jahr bestimmt werden.

Betrachtetes Klimaszenario

Vom Zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) sind verschiedene Zukunftsszenarien entwickelt worden, wie sich der Ausstoß von Treibhausgasen entwickeln könnte. In Abhängigkeit von diesen Emissionsszenarien, in welche u.a. die Bevölkerungsentwicklung und das wirtschaftliche Wachstum eingehen, wurden entsprechende Klimaprojektionsrechnungen durchgeführt (vgl. Abb. 10).

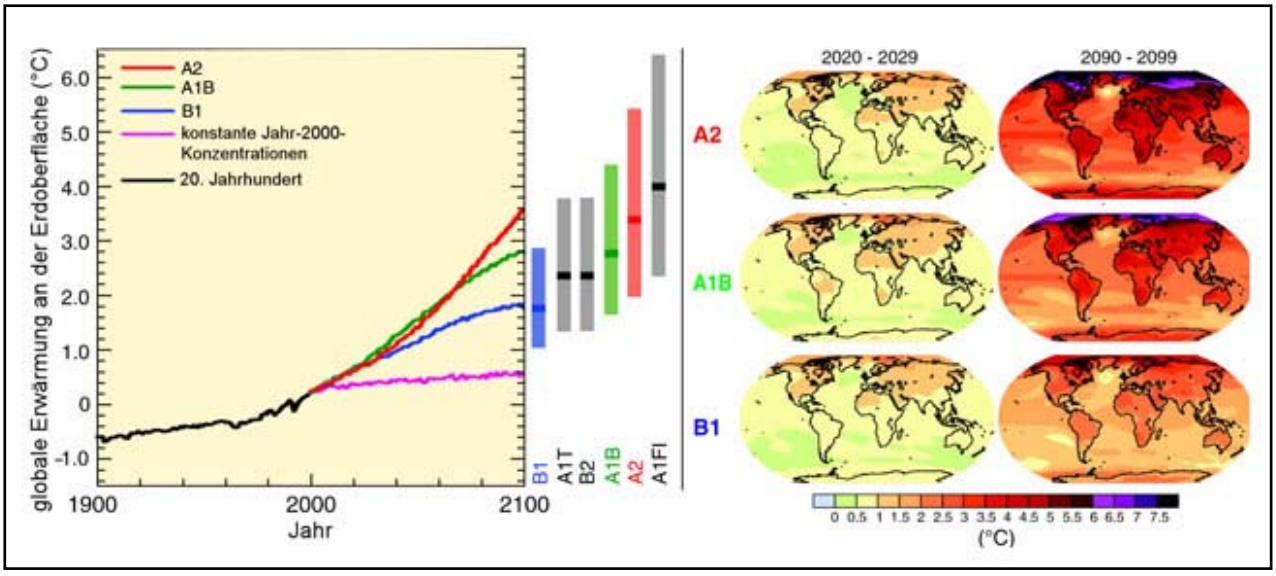


Abb. 10: Klimaszenarien und prognostizierter globaler Temperaturverlauf (Quelle: IPCC 2007)

Das für die Regionalisierung der Klimawandelszenarien auf das Stadtgebiet Berlin zugrunde liegende Szenario „A1B“ geht von einem schnellen wirtschaftlichen Wachstum und einer gleichzeitigen Nutzung fossiler und regenerativer Energieträger aus. Im Hinblick auf die Entwicklung der Treibhausgasemissionen insgesamt nimmt es unter den betrachteten Szenarien eine vermittelnde Stellung ein

Bei den Unsicherheiten von Prognosen muss bedacht werden, dass die Startwerte für komplexe meteorologische Modellrechnungen einen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Dies gilt einerseits für die angenommenen Treibhausgasemissionen, andererseits aber auch für die zukünftige Entwicklung der das Klima bestimmenden natürlichen und anthropogenen Faktoren wie die Landnutzung. Darüber hinaus kann das reale Klimasystem durch ein mathematisches Modell nicht exakt wiedergegeben werden. Mit der Durchführung mehrerer Modellrechnungen mit jeweils leicht veränderten Start- und Randwerten (Ensembletechnik) und der Kombination unterschiedlicher Modelle lassen sich für die Klimaszenarien Grundtendenzen ermitteln und die Unsicherheit eingrenzen.

Für die Regionalisierung von Klimawandelszenarien mit dem Mesoskalenmodell FITNAH werden daher die Ergebnisse nicht für ein einzelnes Jahr sondern für einen längeren Zeitraum von bis zu 10 Jahren berechnet. Da erst durch das Downscaling eine feine Auflösung der Nutzungsstrukturen möglich wird, steht für die Übertragung auf die Mesoskalenebene die Relation der Ausprägung meteorologischer Parameter zwischen den einzelnen Nutzungsstrukturen im Vordergrund.

4. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse zu den durchgeführten Modellrechnungen dargestellt. Es wurden insgesamt fünf meteorologische Parameter zur sommerlichen Wärmebelastung in einem 50 m x 50 m Raster modelliert (Kap. 4.2). Da der gesamtstädtische (*mesoskalige*) Zusammenhang hier im Vordergrund steht, wurden einzelne Gebäude nicht explizit aufgelöst. Modelliert wurde die Situation zum Beginn (2001 - 2010), zur Mitte (2046 - 2055) sowie zum Ende (2090 - 2099) des Jahrhunderts. Anhand eines Ausschnittes aus dem zentralen Stadtgebiet wird die räumliche Ausprägung der Ergebnisse erläutert. In diesem Rahmen wird auch kurz auf den Biotopflächenfaktor (BFF) eingegangen, dessen Umsetzung beispielhaft im Ortsteil Prenzlauer Berg mit einer höheren Rasterauflösung von 25 m x 25 m simuliert wurde.

Darüber hinaus werden auch die Ergebnisse der *mikroskaligen* Simulationen diskutiert, bei denen die Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen auf die sommerliche Wärmebelastung am Tage beispielhaft für einen Baublock in Charlottenburg untersucht wurde (Kap. 4.3). Bei einer räumlichen Auflösung von 2 m x 2 m konnten auch vergleichsweise kleine Strukturen erfasst werden. Zuerst wird aber auf die wichtigsten Trends in der klimatischen Entwicklung bis zum Ende des Jahrhunderts eingegangen (Kap. 4.1).

4.1 Zukünftige Entwicklung ausgewählter meteorologischer Parameter

Der StEP Klima untersucht räumlich differenziert die Auswirkungen des Klimawandels auf Berlin und identifiziert so vier grundlegende Handlungsfelder für die Stadtentwicklung. Diese Dokumentation konzentriert sich auf das Handlungsfeld 1, das Bioklima im Siedlungsraum. Von einer Zunahme der sommerlichen Wärmebelastung sind besonders empfindliche Bevölkerungsgruppen wie kranke und alte Menschen, Schwangere sowie Menschen, die durch schwere körperliche Arbeit besondere physische Belastungen erfahren, betroffen. Die bioklimatische Situation in den Sommermonaten kann über verschiedene meteorologische Parameter sowie jeweils für die Tag- und Nachtsituation ausgedrückt werden.

Um die grundsätzliche regionale Entwicklung bis zum Ende des Jahrhunderts zu verdeutlichen, wurden die CLM-Daten (Szenario A1B) der Gitterpunkte Berlin als Häufigkeitsverteilungen der relevanten Parameter Lufttemperatur, relative Feuchte und Windgeschwindigkeit für drei Zeitschnitte im Zeitraum 2001-2100 ausgewertet.

Lufttemperatur, relative Feuchte und Windgeschwindigkeit

Für die Berechnung des bioklimatischen Bewertungsindex PMV werden u.a. die Einflussgrößen Windgeschwindigkeit, relative Feuchte und Lufttemperatur benötigt. Die Bandbreite der auftretenden Temperaturen in den drei Sommermonaten (Juni - August) zum Zeitpunkt 14 Uhr MEZ ist in Abb. 11 (S. 15) dargestellt. Für die Gegenwart (2001-2010) zeigt sich ein deutliches Maximum zwischen 15°C bis 25°C. Im Wertebereich ≤ 25°C sind 68 % der Werte lokalisiert, lediglich 9 % der auftretenden Temperaturen gehen über 30°C hinaus.

Für die Mitte des Jahrhunderts zeigt sich bereits eine leichte Verschiebung der Werteverteilung hin zu höheren Temperaturen. Während im Zeitraum 2046 - 2055 noch 66 % ≤ 25°C verbleiben, steigt der Anteil >30°C aber nur geringfügig auf 11 % an. Zum Ende des Jahrhunderts weisen dann jedoch 28 % der 14 Uhr-Termine Temperaturen > 30°C auf, während der Anteil ≤ 25°C auf 47% zurück geht.

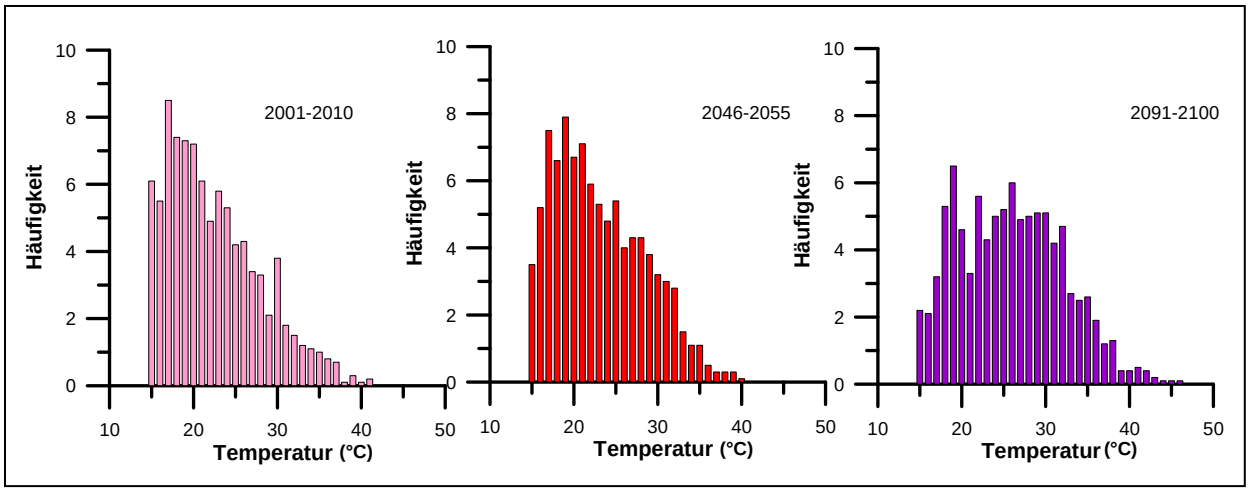


Abb. 11: Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur (Quelle: Institut für Meteorologie und Klimatologie Universität Hannover 2010)

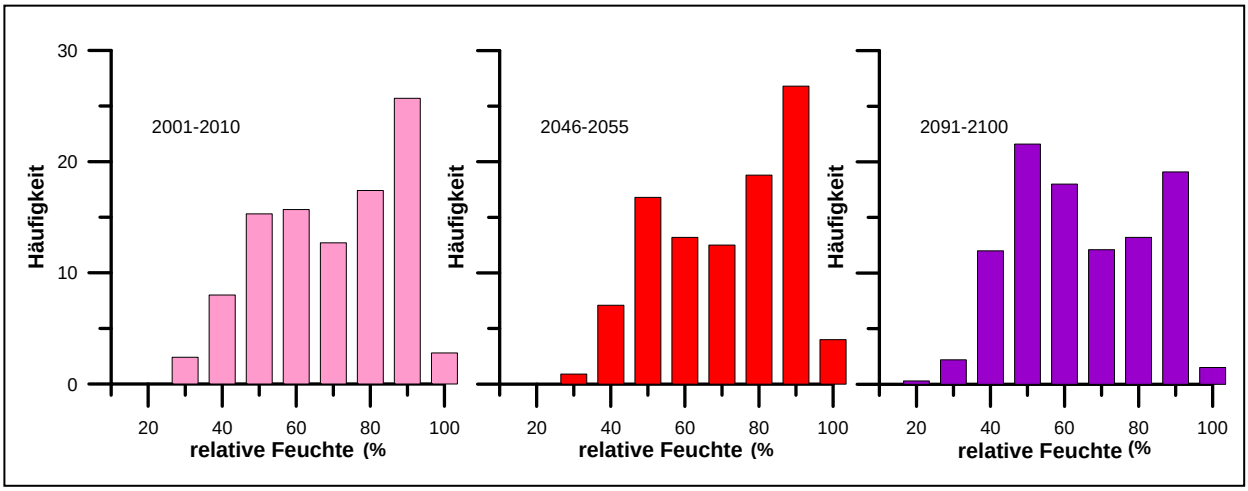


Abb. 12: Häufigkeitsverteilung der relativen Feuchte (Quelle: Institut für Meteorologie und Klimatologie Universität Hannover 2010)

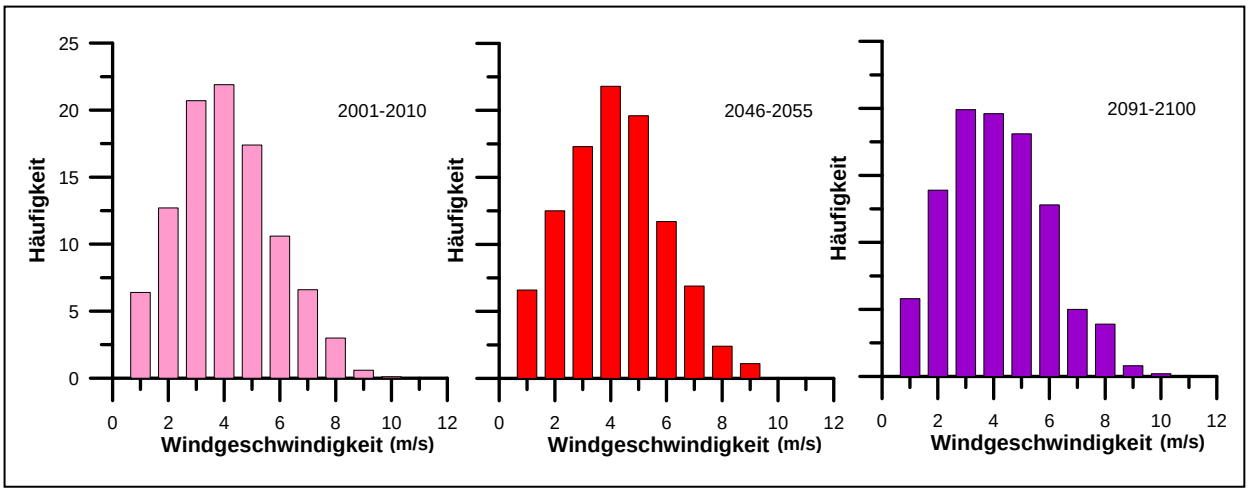


Abb. 13: Häufigkeitsverteilung der mittleren Windgeschwindigkeit (Quelle: Institut für Meteorologie und Klimatologie Universität Hannover 2010)

Die relative Feuchte beschreibt, zu welchem %-Anteil die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist. Die Ausprägung der relativen Feuchte ist dabei eng an die der Lufttemperatur gekoppelt, da sie maßgeblich das Aufnahmevermögen von Wasserdampf bestimmt. Ganz allgemein nimmt die Wasserdampfmenge, die zur Sättigung benötigt wird, mit steigender Temperatur eines Luftpakets zu. Daher nimmt die relative Luftfeuchte einer Luftmasse bei Erwärmung ab. Dieser Zusammenhang spiegelt sich bei der Häufigkeitsverteilung der relativen Feuchte in den Sommermonaten Juni bis August wider (Abb. 12). Während die Verteilung für den Beginn und die Mitte des Jahrhunderts noch recht ähnlich ausgeprägt ist, kann für den Zeithorizont 2091 bis 2100 eine deutliche Verschiebung hin zu geringerer relativer Feuchte beobachtet werden. So nimmt die Häufigkeit des Auftretens von Werten ≤ 50% rel. Feuchte um 11 Prozentpunkte von 25 % auf 36 % bis 2100 zu, was auf das insgesamt höhere Temperaturniveau zurückzuführen ist. Die Häufigkeit des Auftretens einer höheren relativen Feuchte > 70 % nimmt dabei in einer ähnlichen Größenordnung ab.

Die Häufigkeitsverteilung der mittleren Windgeschwindigkeit weist dagegen keine deutliche Entwicklung auf und unterscheidet sich zwischen Beginn und Mitte des Jahrhunderts kaum. Eine leichte Zunahme scheint sich bei den Windgeschwindigkeiten ≥ 8 m/s abzuzeichnen, welche bis 2100 um etwa 1,5 % ansteigt. Insgesamt gesehen überwiegen aber auch zum Ende des Jahrhunderts in den Sommermonaten moderate Geschwindigkeiten zwischen 3 und 5 m/s.

Hitze- und Trockenperioden

Für die Bilanzierung der Dauer und der Häufigkeit des Auftretens von Hitzeperioden und von Trockenperioden wurden die DWD-Daten der Station Potsdam (1893-2009) sowie CLM Daten (A1B; Gitterpunkte Berlin 127-139) ausgewertet. Bei einer *Hitzeperiode* handelt es sich um die Anzahl von Sommertagen, an denen in Folge eine Maximumtemperatur von 25°C überschritten wird. Eine *Trockenperiode* ist hier als eine Witterungssituation definiert, an der an mehreren Tagen die Tagessumme des Niederschlags geringer als 0,01 mm ist. Für die Darstellung sind Zeiträume von 2, 3 sowie 4 Wochen abgegrenzt worden. Die Auswertung für die Anzahl der Sommertage zeigt Abb. 14, wobei jeweils die Hitzeperioden für 10-Jahreszeiträume zusammengefasst wurden.

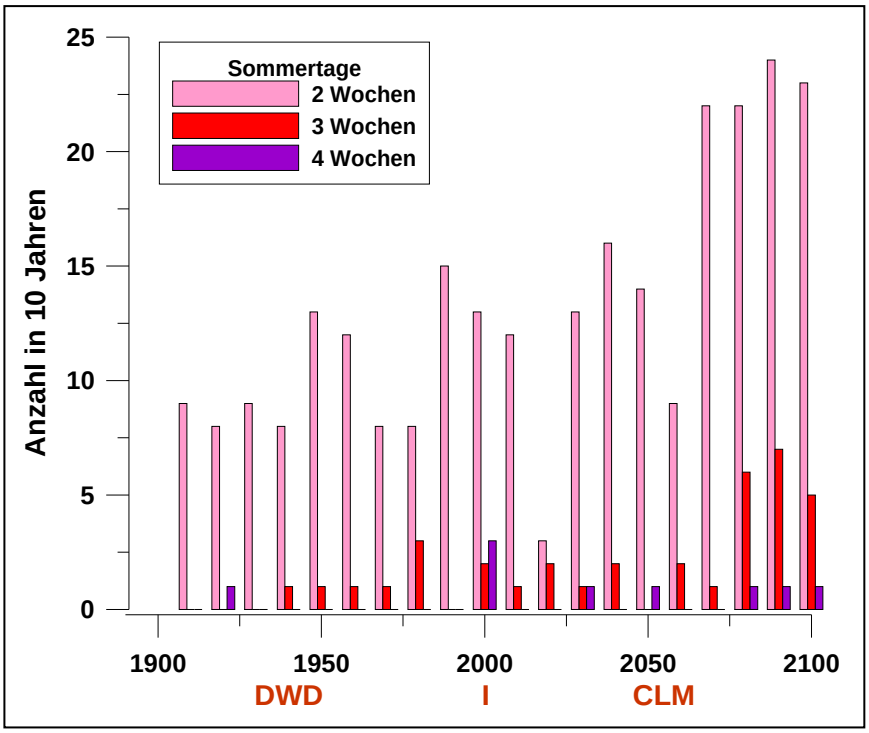


Abb. 14: Anzahl der Hitzeperioden

Für die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts zeigt sich ein recht homogenes Bild hinsichtlich des Auftretens von Hitzeperioden mit einer Dauer von zwei Wochen. Ab den 1940er Jahren sind dreiwöchige Hitzeperioden zu beobachten, deren Anzahl bis in die 70er Jahre ähnlich ausgeprägt ist. In den 90er Jahren sind dreiwöchige Hitzeperioden hingegen kaum anzutreffen, während eine vergleichsweise hohe Anzahl zweiwöchiger Perioden auftritt. Der Übergang in das 21. Jahrhundert ist von einer hohen Anzahl drei- und vierwöchiger Hitzeperioden gekennzeichnet. Hier macht sich insbesondere der Sommer 2003 mit seinem markanten Witterungsverlauf bemerkbar.

Die weitere Perspektive bis zur Mitte des Jahrhunderts erscheint uneinheitlich (Abb. 14). Insbesondere der Zeitraum um das Jahr 2020 herum scheint von einer vergleichsweise geringen Anzahl von Hitzeperioden bis zwei Wochen Dauer gekennzeichnet zu sein, wenngleich auch mehrere Perioden mit einer Dauer von 3 Wochen auftreten. Dies ist ab 2060 durchgängig der Fall, wobei sich die Anzahl ihres Auftretens bis zum Ende des Jahrhunderts mehr als verdreifacht. Zudem ist ein starker Anstieg bei den zweiwöchigen Phasen zu beobachten. Die Anzahl der vierwöchigen Hitzeperioden scheint dagegen bis 2100 nicht markant anzusteigen.

Auch bei der Anzahl von Trockenperioden/Jahr lassen sich keine klaren Tendenzen erkennen (Abb. 15). So scheinen die kurzfristigen Trockenphasen von zwei Wochen Dauer in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts mit 50 bis 60 Fällen in 10 Jahren vergleichsweise stark vertreten zu sein, um dann bis 2050 wieder auf eine Anzahl von 40 bis 50 zurück zu gehen.

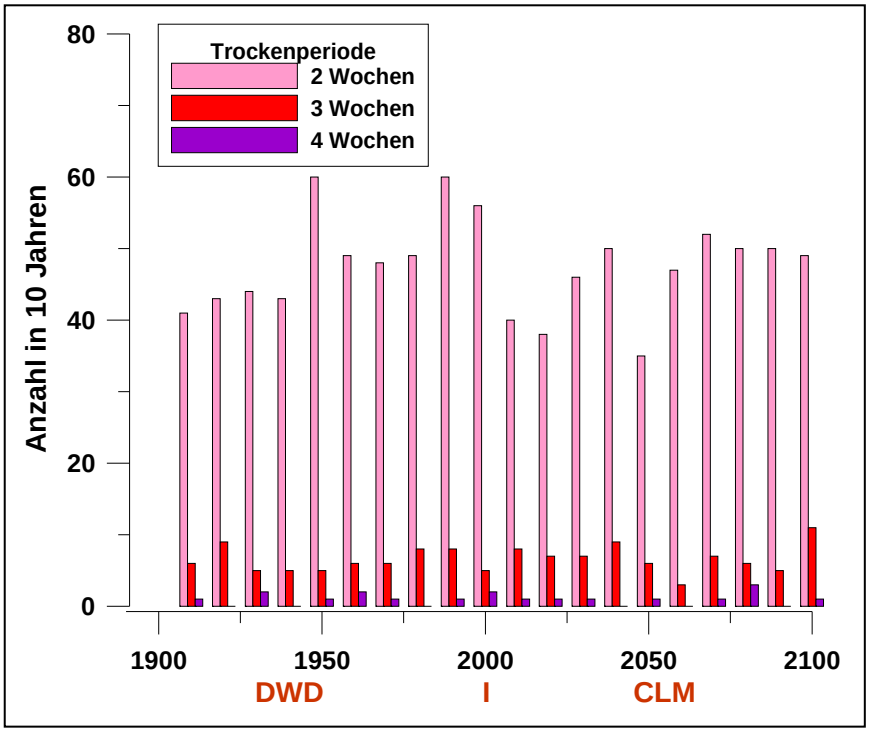


Abb. 15: Anzahl der Trockenperioden

Die mittelfristigen Trockenperioden bis 3 Wochen Dauer weisen hinsichtlich ihrer Anzahl keine signifikanten Abweichungen auf. Allerdings ist deren Anzahl im Zeitraum von 1980 bis 2040 ähnlich hoch ausgeprägt, während gleichzeitig die Anzahl von Trockenperioden mit zwei Wochen Dauer stärker schwankt. Die Anzahl von Trockenphasen mit vier Wochen Dauer sind über den gesamten betrachteten Zeitrahmen sehr heterogen.

4.2 Gesamtstädtische Simulation ausgewählter meteorologischer Kennwerte zur Wärmebelastung

Die höchsten bioklimatischen Belastungen treten dort auf, wo sich der Effekt der „Städtischen Wärmeinsel" besonders gut ausprägen kann. Dabei handelt es sich meist um Siedlungsflächen, welche besonders dicht überbaut sind, eine starke Versiegelung aufweisen und nur über wenige Grünflächen verfügen. Gerade hier kommt der Vermeidung von Gesundheitsbelastungen, die insbesondere durch höhere Tages- und Nachttemperaturen ausgelöst werden können, und damit der Gewährleistung gesunder bioklimatischer Verhältnisse auch unter den Bedingungen des Klimawandels besondere Bedeutung zu.

Das Auftreten hoher Wärmebelastungen ist an sommerliche austauschschwache (autochthone) Wetterlagen mit vorwiegendem Hochdruckeinfluss gebunden. Die Häufigkeit des Auftretens dieser Wettersituation in Berlin wurde auf Grundlage der Berechnungen des Regionalen Klimamodells CLM für die Sommermonate Juni bis August in % der Tage ausgewertet (Abb. 16). Dabei zeigt sich eine leichte Zunahme bis zum Ende des Jahrhunderts (rote Trendlinie).

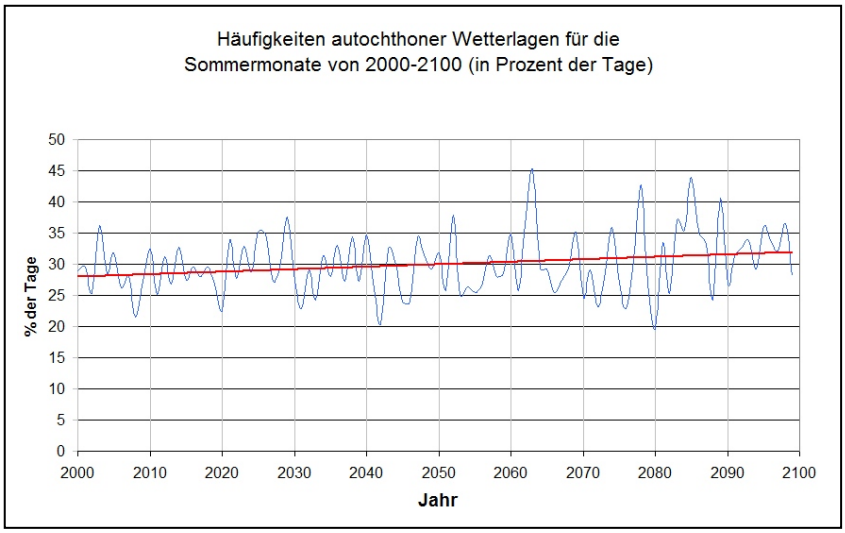


Abb. 16: Häufigkeiten autochthoner Wetterlagen 2000 bis 2100 (berechnet mit CLM)

Während im Jahr 2000 in den Sommermonaten an 27 Tagen eine autochthone Wetterlage auftritt, erhöht sich diese Zahl bis 2100 auf 32 Tage. Eine markante Zunahme lässt sich aus der bislang vorhandenen Datengrundlage somit nicht ableiten. Allerdings nimmt ab Mitte des Jahrhunderts die Schwankungsbreite deutlich zu. Damit sind die übergeordneten meteorologischen Rahmenbedingungen für das Auftreten bioklimatisch belastender Situationen beschrieben.

Die lokale Ausprägung des Belastungspotenzials im Stadtgebiet hängt jedoch ganz wesentlich von der Nutzungsstruktur und der Zuordnung bebauter und begrünter Flächen sowie speziell den damit einhergehenden Einflussfaktoren Bebauungsdichte und -höhe, Versiegelungsgrad und Grünstruktur ab. An dieser Stelle findet methodisch der Übergang von der Ebene der regionalen Klimamodellierung (hier CLM) auf die kleinräumigere (mesoskalige) Modellebene statt, die in dieser Arbeit mit FITNAH bewältigt wurde.

Im Folgenden werden daher die Ergebnisse zu verschiedenen, bei autochthonen Wetterlagen auftretenden Parametern in einem repräsentativen Stadtausschnitt Berlins erläutert. Der für die Darstellung gewählte Ausschnitt deckt den Großteil des in Berlin auftretenden Spektrums an Nutzungsstrukturen ab. Mit dem nördlichen Grunewald, dem Großen Tiergarten sowie dem Bereich des ehemaligen Flughafens Tempelhof sind auch unterschiedlich geprägte Grünflächentypen enthalten. Für alle Betrachtungszeiträume gilt, dass jeweils von unveränderten Nutzungs- und Freiraumstrukturen ausgegangen wird, d.h. somit z.B. auch für das Tempelhofer Feld keine grünplanerischen Maßnahmen angenommen wurden.

4.2.1 Anzahl der Sommertage

Als Sommertage werden Tage eingeordnet, sofern sie eine Maximumtemperatur von mehr als 25°C aufweisen. Eine statistische Verteilung der für den Raum Berlin relevanten Gitterpunkte der CLM-Daten ist in Abb. 17 dargestellt, wobei die Trendlinie blau dargestellt ist. Es zeigt sich, dass bei Analyse der Regionalmodellierung, d.h. ohne differenzierte Betrachtung der städtischen Nutzungsstruktur, in den ersten Jahrzehnten des Jahrhunderts bis 2035 eine mittlere Zunahme an Sommertagen von etwa 12 Tagen zu beobachten ist, auf die im Anschluss eine etwa zehnjährige Stagnationsphase folgt. Ab 2050 nimmt die Anzahl stetig zu und erreicht eine Anzahl von 60 Tagen bis zum Jahr 2100.

Die Darstellung für die drei Bezugszeiträume macht deutlich, dass die Zunahme bis zum Zeithorizont 2046 - 2055 mit etwa fünf Tagen moderat ist und erst in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts markant auf über 60 Sommertage/Jahr ansteigt. Diese Größenordnungen geben somit die Basisdaten wider, vor deren Hintergrund nun die städtische Nutzungsstruktur mäßigend, aber auch verstärkend wirken kann.

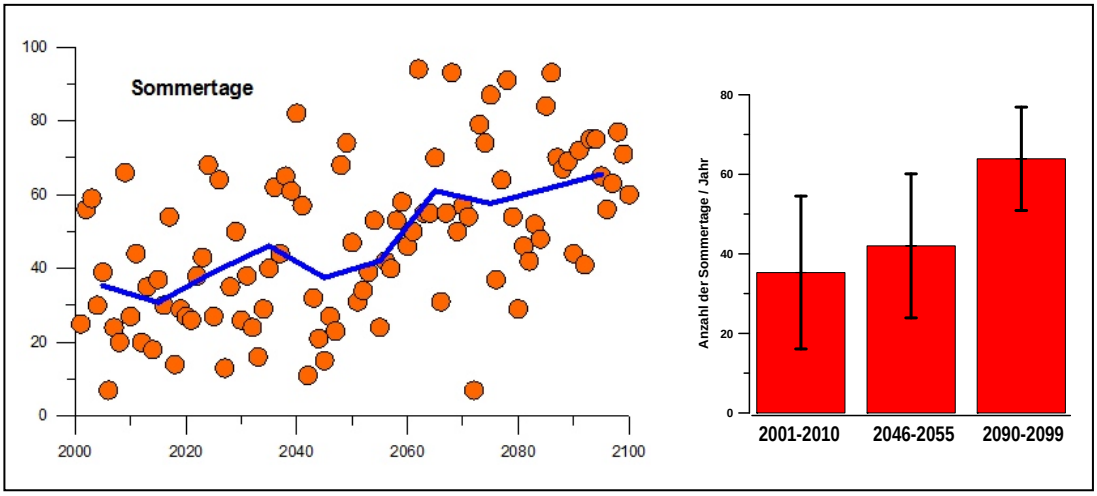


Abb. 17: Verteilung der Sommertage pro Jahr auf Grundlage der regionalen Modellierung mit CLM (ohne Berücksichtigung der städtischen Nutzungsstruktur)

Anzahl der Sommertage im Zeitraum 2001 - 2010

Der Einfluss der Nutzungsstrukturen auf die Anzahl der Sommertage im Stadtgebiet wird durch den Einsatz des mesoskaligen Modells FITNAH sichtbar. Ganz maßgeblich ist in diesem Zusammenhang der Einfluss der jeweiligen Nutzungsstrukturen auf den Energiehaushalt, der über Einflussgrößen wie z.B. Albedo, Versiegelungsgrad und Bauvolumen gesteuert wird. Demnach weisen die dicht überbauten Siedlungsflächen eine höhere Anzahl an Tagesmaxima der Lufttemperatur >25°C auf als locker bebaute Areale (Abb. 18). Während im Ortsteil Mitte bis zu 53 Sommertage/Jahr auftreten (gemittelt für 2001-2010), sind in den durchgrünten Siedlungsflächen von Grunewald nur noch bis zu 23 Tage/Jahr zu beobachten. Hier trägt der hohe Vegetationsanteil der Villenbebauung zur Dämpfung der Lufttemperatur bei.

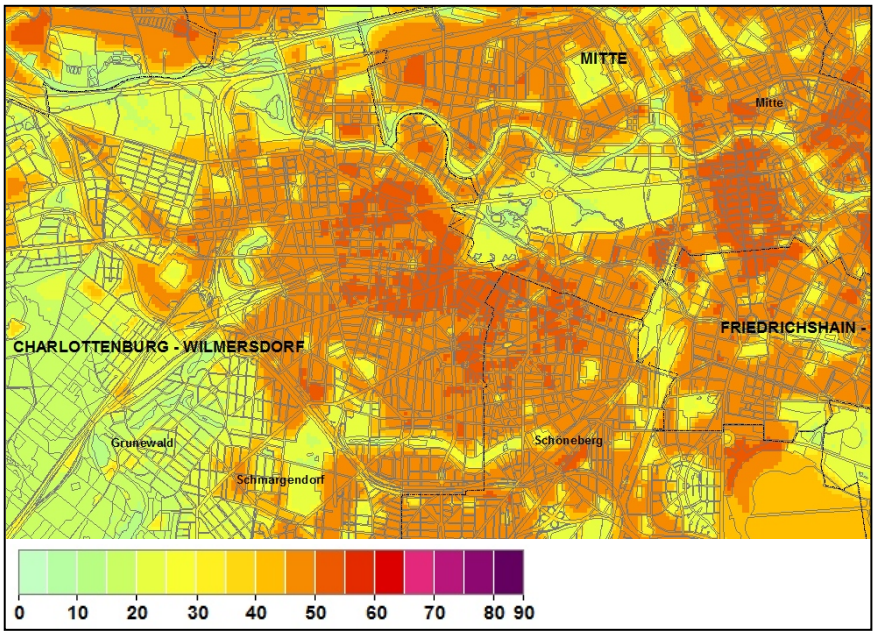


Abb. 18: Sommertage im Zeitraum 2001 bis 2010

Grünflächen weisen ebenfalls eine breite Spanne an Werten auf, was unmittelbar auf den Grünflächentyp zurückzuführen ist. Eine vergleichsweise hohe Anzahl an Sommertagen bis 42 Tage/Jahr ist über dem durch Wiese geprägten Tempelhofer Feld anzutreffen. Während hier in der Nacht eine ungehinderte (langwellige) Ausstrahlung verbunden mit starker Abkühlung der darüber lagernden Luftmasse erfolgen kann, ist andererseits am Tage ein hoher (kurzwelliger) solarer Strahlungsinput mit starker Erwärmung der Bodenoberfläche die Folge (vgl. Temperaturverlauf Abb. 4). Eine mit 16 bis 17 Tagen/Jahr weniger als halb so hohe Anzahl an Sommertagen ist dagegen im Bereich des Grunewalds anzutreffen (Abb. 18). Hier führt das Bestandsklima des Waldes zu einem ausgeglichenen Tagesgang der Temperaturen, wobei am Tage durch Verschattung und Verdunstungswirkung der Bäume ein insgesamt deutlich niedrigeres Temperaturniveau als über dem Tempelhofer Feld vorliegt.

Der Große Tiergarten dagegen nimmt eine vermittelnde Stellung ein, da er sowohl durch Rasen geprägte und damit besonnte Flächenanteile als auch Gehölze und Baumbestände mit entsprechender Verschattung aufweist. Die Anzahl an Sommertagen liegt hier in einer Größenordnung von 20 bis 21/Jahr, bezogen auf den Zeitraum von 2001-2010. Damit zeigt sich auch bei Grünflächen die wichtige Rolle des Schattens auf den Energiehaushalt einer Nutzungsstruktur und damit auf die Temperatursituation am Tage.

Anzahl der Sommertage im Zeitraum 2046 - 2055

Die Ergebnisse für den Zeithorizont 2046 bis 2055 lassen den Einfluss des globalen Klimawandels allmählich sichtbar werden (Abb. 19). So liegt die Anzahl an Sommertagen in den stark überbauten Siedlungsflächen von Berlin-Mitte nun bei bis zu 60/Jahr, während er im Bereich Charlottenburg mit bis zu 55 etwas geringer ausgeprägt ist. Die niedrigste Anzahl von Sommertagen innerhalb der Siedlungsflächen liegt u.a. in der Villenbebauung von Grunewald mit bis zu 24 vor. Im Vergleich zum Zeitraum 2001-2010 ist die Zunahme an Sommertagen damit in den durchgrünten Siedlungstypen am niedrigsten ausgeprägt.

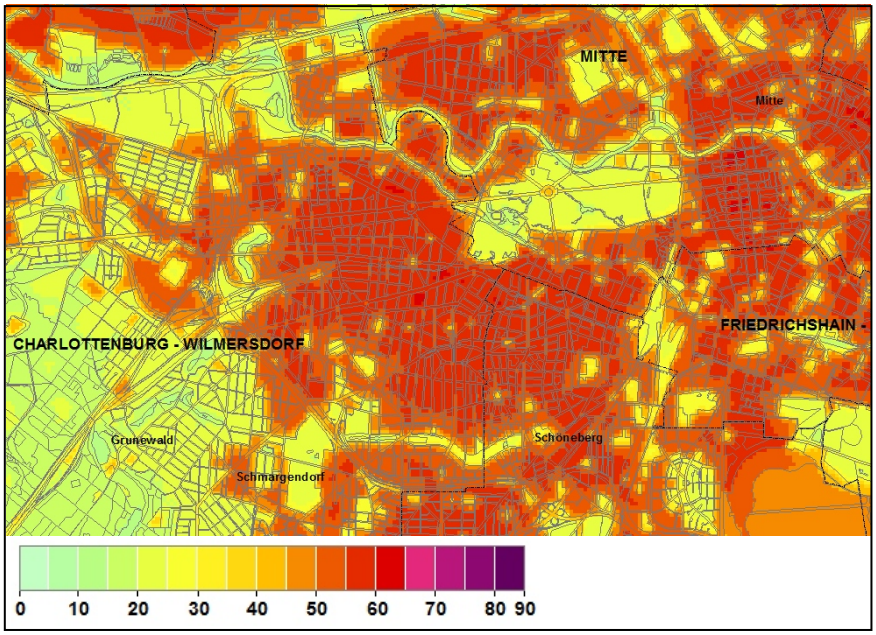


Abb. 19: Sommertage im Zeitraum 2046 bis 2055

Auch innerhalb der größeren Grünflächen ist eine Zunahme an Sommertagen mit mehr als 25°C zu beobachten. Über dem Tempelhofer Feld sind nun 48 Tage/Jahr anzutreffen, während die Zunahme im Tiergarten mit 22 Tagen/Jahr deutlich niedriger ist. Im Bereich des Grunewalder Forstes bleibt die Anzahl der Sommertage stabil oder steigt nur marginal an.

Anzahl der Sommertage im Zeitraum 2091 - 2099

Entsprechend der in Kap. 4.1 dargestellten Entwicklung der meteorologischen Parameter ist auch ein markanter Anstieg der Anzahl von Sommertagen bis zum Ende des Jahrhunderts zu erwarten. Die höchsten Werte sind mit bis zu 85 Sommertagen/Jahr innerhalb der innerstädtischen Bebauung wie der von Berlin-Mitte zu beobachten (Abb. 20). In der Block- und Blockrandbebauung von Charlottenburg treten noch bis zu 81 Tage/Jahr auf. Dem beschriebenen räumlichen Muster folgend liegt in den durchgrünten Siedlungsflächen mit etwa 43 Tagen noch ein vergleichsweise niedriges Niveau vor, wobei sich auch hier im Vergleich zum Zeitraum 2001-2010 die Werte fast verdoppelt haben.

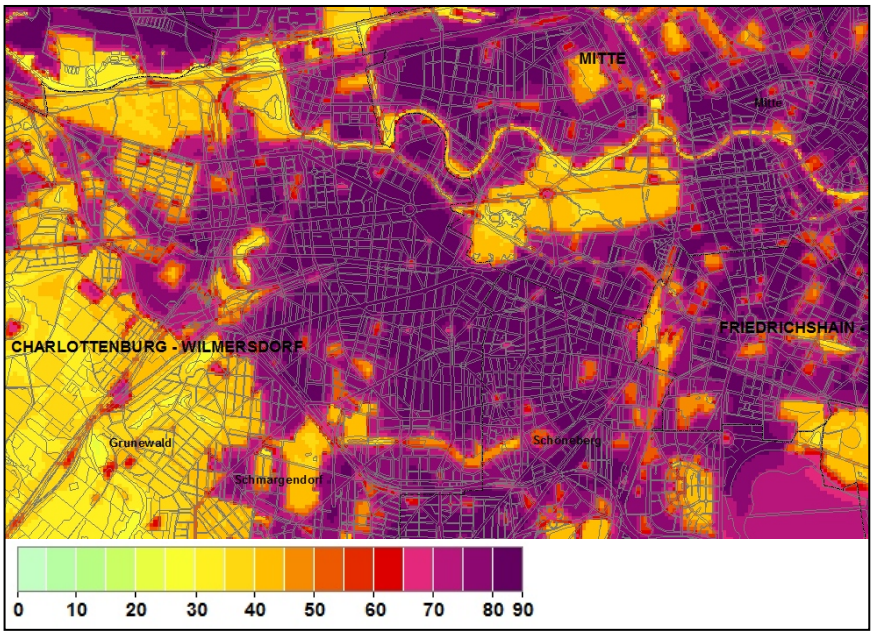


Abb. 20: Sommertage im Zeitraum 2090 bis 2099

Auch die großen Grünflächen sind in ähnlicher Weise von einer Erhöhung der Anzahl an Sommertagen betroffen. Mit 72 Tagen/Jahr liegt über dem Tempelhofer Feld der höchste Wert vor, aber auch im Tiergarten sind bis zu 42 Tage/Jahr zu erwarten. In der weitläufigen Waldfläche des Grunewalds liegen mit 35 Tagen/Jahr die niedrigsten Werte vor.

4.2.2 Anzahl der heißen Tage

Als heiße Tage werden Witterungssituationen bezeichnet, an denen die Tageshöchsttemperatur über 30°C hinaus geht. Abbildung 21 zeigt den Werteverlauf vom Jahr 2000 bis 2100 sowie die Bilanzierung für die betrachteten Zeitschnitte der CLM-Gitterpunkte Berlin. Analog zur Ausprägung der Sommertage (Kap. 4.2.1) spiegelt sich für diesen Parameter ein ähnliches Verlaufsmuster wider. Auch hier gilt, dass für diese Darstellung noch nicht die lokalen nutzungsbedingten Einflussfaktoren berücksichtigt wurden.

Auf eine abnehmende Anzahl an heißen Tagen bis 2018 folgt ein Anstieg bis zum Jahr 2035. Der sich anschließende erneute Rückgang bis etwa 2045 wird abgelöst von einem kontinuierlichen Anstieg bis zum Ende des Jahrhunderts. Die absolute Anzahl an heißen Tagen insgesamt erhöht sich von weniger als 20 am Anfang des Jahrhunderts auf etwa 30 Tage/Jahr bis 2100. Das Balkendiagramm (Abb. 21) verdeutlicht den geringen Anstieg vom Zeitraum 2001-2010 bis 2046-2055 und die danach folgende starke Zunahme bis 2091-2099.

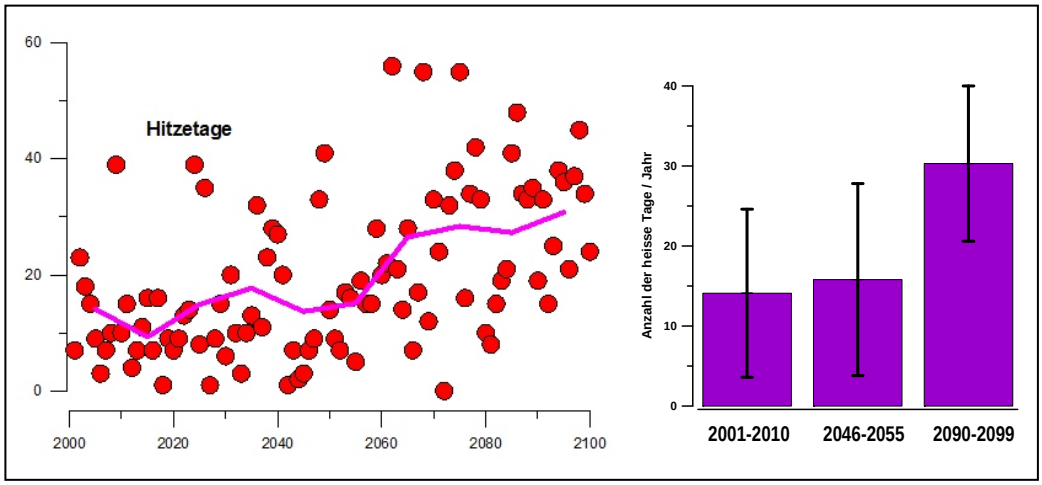


Abb. 21: Verteilung der heißen Tage pro Jahr auf Grundlage der regionalen Modellierung mit CLM (ohne Berücksichtigung der städtischen Nutzungsstruktur)

Anzahl der heißen Tage im Zeitraum 2001 - 2010

Die mit dem Klimamodell FITNAH modellierte Ausprägung der heißen Tage für den Beginn des Jahrhunderts zeigt Abb. 22, wobei in den stark versiegelten Arealen von Berlin-Mitte die höchsten Werte von bis zu 17 heißen Tagen/Jahr auftreten. Mit bis zu 13 Tagen/Jahr ist das Auftreten von heißen Tagen in der Block- und Blockrandbebauung von Charlottenburg/Wilmersdorf etwas geringer, während in den grüngeprägten Siedlungsflächen nur noch bis zu 6 Tage mit mehr als 30°C zu beobachten sind.

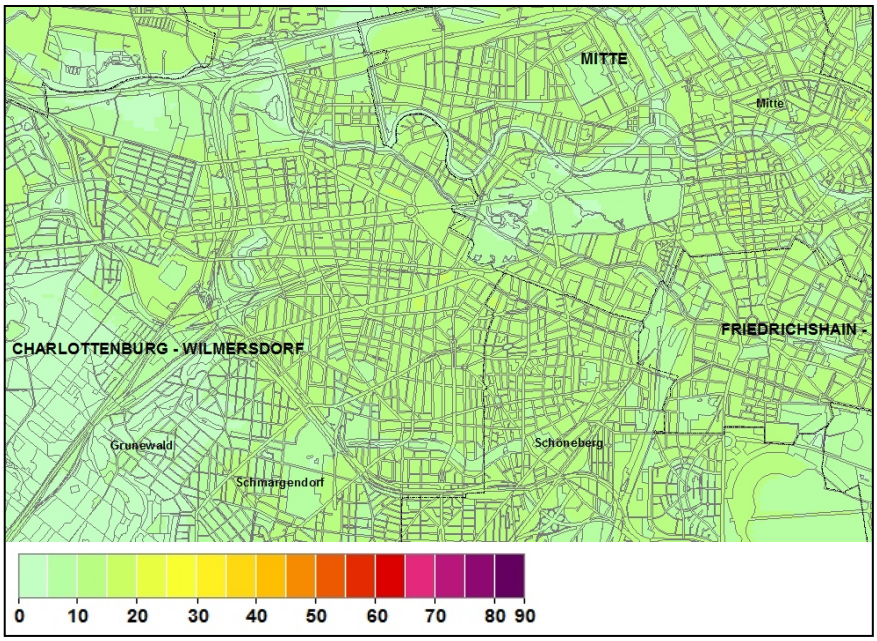


Abb. 22: Heiße Tage im Zeitraum 2001 bis 2010

Auch für die Grünflächen zeigt sich hier eine räumlich abgestufte Werteausprägung. Augrund der hohen solaren Einstrahlung und der damit einher gehenden Erwärmung der Luft ist im Bereich Tempelhofer Feld eine vergleichsweise hohe Anzahl von bis zu 10 Tage/Jahr zu beobachten. Während für den Großen Tiergarten mit 5 Tagen/Jahr eine nur halb so hohe Anzahl von Werten simuliert wurden, gehen diese im Grunewald auf 4 Tage/Jahr noch weiter zurück.

Anzahl heißer Tage im Zeitraum 2046 – 2055

Die beschriebene relativ geringe Zunahme der Witterungssituationen bis zum Zeitschnitt 2046-2055 mit mehr als 30°C Tageshöchsttemperatur spiegelt sich auch in den flächenhaft modellierten Ergebnissen wider (Abb. 23). Die Zunahme beträgt lediglich in den stärker verdichteten Siedlungsflächen bis zu 1,5 Tage/Jahr, in den übrigen bebauten Arealen liegt sie meist darunter.

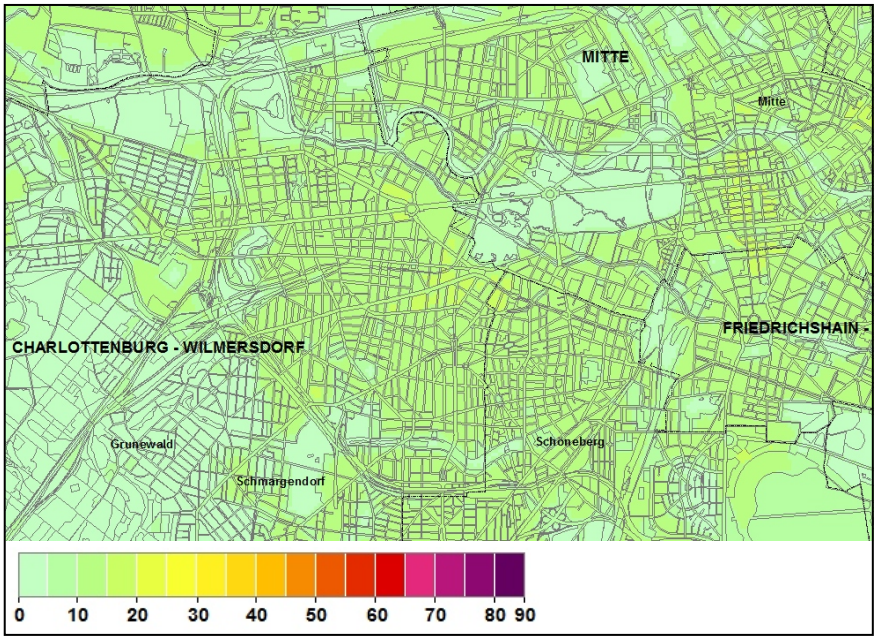


Abb. 23: Heiße Tage im Zeitraum 2046 bis 2055

Innerhalb der größeren Grünflächen ist gegenüber dem Zeitraum 2001 - 2010 kein Anstieg in der Anzahl der heißen Tage zu verzeichnen.

Anzahl der heißen Tage im Zeitraum 2091 - 2099

Der markante Anstieg in der Anzahl der heißen Tage bis 2100 bildet sich hingegen deutlich in den Ergebnissen ab (Abb. 24).

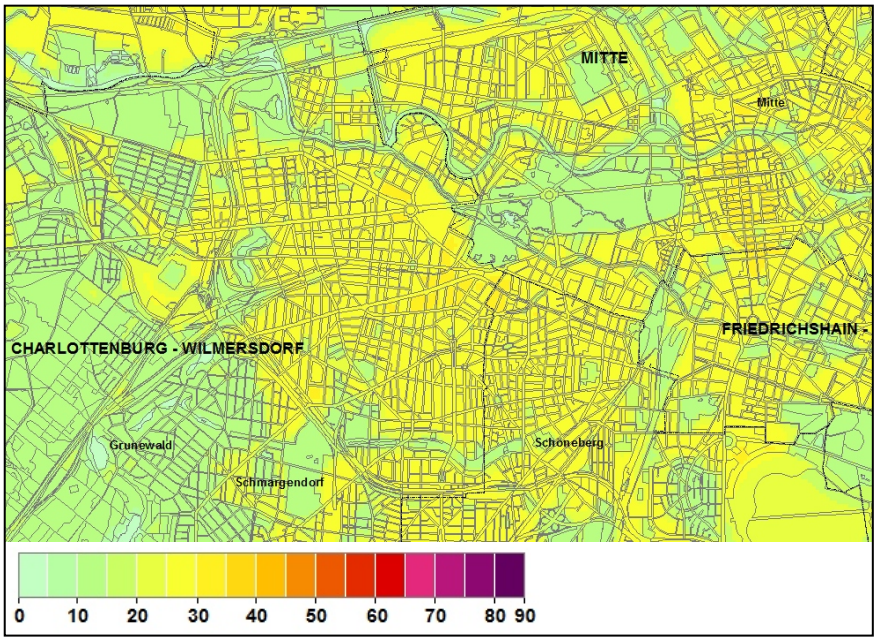


Abb. 24: Heiße Tage im Zeitraum 2091 bis 2099

Die höchste Anzahl an heißen Tagen ist mit bis zu 32/Jahr vor allem in Mitte sowie den dicht bebauten Quartieren in Wilmersdorf/Charlottenburg anzutreffen. Innerhalb der etwas weniger dicht bebauten Flächen von Charlottenburg sind noch 27 Tage/Jahr zu verzeichnen, während sie in den durchgrünten Siedlungstypen im Randbereich zum Grunewald weiter auf 13 absinken. Auch für die Grünflächen sind deutliche Zunahmen zu beobachten, wobei die Anzahl heißer Tage im Bereich Tempelhofer Feld mit bis zu 21/Jahr am höchsten ausfällt. Mit 12 bzw. 10 Tagen/Jahr ist die Anzahl im Tiergarten bzw. Grunewald wieder niedriger.

Damit bildet sich die Heterogenität der Nutzungsstrukturen mit ihren jeweiligen thermischen Eigenschaften deutlich in den Ergebnissen ab. Gegenüber dem Zustand am Anfang des Jahrhunderts bedeutet dies in etwa eine Verdopplung der Anzahl heißer Tage unter dem Einfluss des Klimawandels bis 2100 und der Annahme unveränderter Nutzungsstrukturen im bebauten und begrünten Bereich.

4.2.3 Anzahl der Tropennächte

Als Tropennacht wird eine Situation bezeichnet, bei der die nächtliche Minimaltemperatur 20°C nicht unterschreitet. Damit geht eine erhebliche Wärmebelastung in den Siedlungsflächen einher. Die modellierte Anzahl der Tropennächte/Jahr für den Raum Berlin auf Basis der Regionalmodellierung bis zum Jahr 2100 ist in Abb. 25 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Häufigkeit der Tropennächte von durchschnittlich weniger als 1 am Anfang des Jahrhunderts bis etwa 2025 auf 2 leicht zunimmt und dann in den Folgejahren wieder zurückgeht.

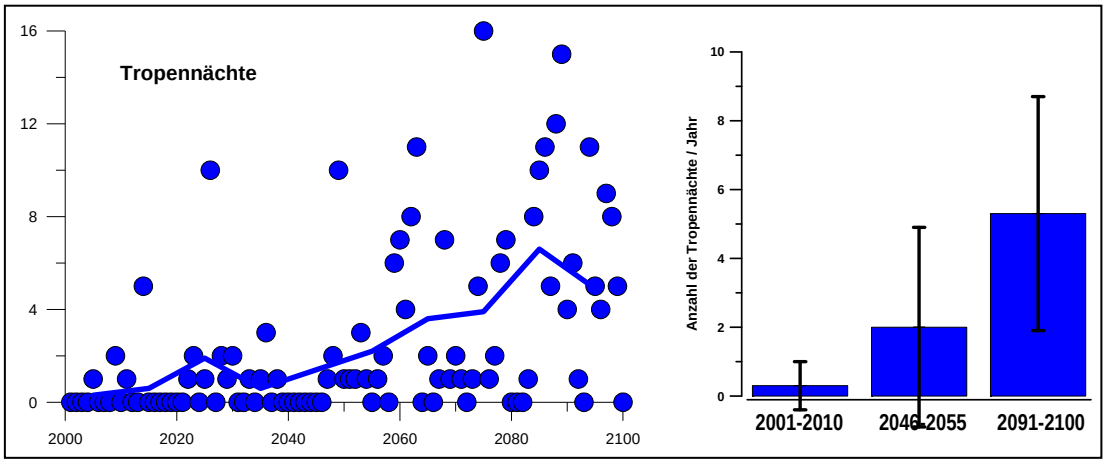


Abb. 25: Verteilung der Tropennächte pro Jahr auf Grundlage der regionalen Modellierung mit CLM (ohne Berücksichtigung der städtischen Nutzungsstruktur)

Ab ca. 2035 nimmt die Anzahl an Tropennächten aber kontinuierlich zu, um Mitte der 2080er Jahre mit durchschnittlich 6 Nächten einen Höhepunkt zu erreichen. Zugleich wird aber auch die hohe Streuung der modellierten Einzelwerte deutlich. Letztendlich lässt sich aber jeweils mindestens eine Verdopplung der Anzahl an Tropennächten von 2001-2010 bis 2046-2055 und dann bis Ende des Jahrhunderts ableiten. Die durch die Nutzungsstruktur im Stadtgebiet Einfluss nehmenden Faktoren werden nachfolgend dargestellt.

Anzahl der Tropennächte im Zeitraum 2001 - 2010

Die räumliche Ausprägung der Tropennächte für den Zeithorizont 2001 - 2010 ist in Abb. 26 dargestellt. Dabei zeigt sich eine recht homogene Verteilung der Werte innerhalb der Siedlungsflächen, wobei flächenhaft eine Anzahl von 4 bis 5 Tropennächte/Jahr beobachtet werden kann (beige Farbe). Lediglich innerhalb der durchgrünten Wohnge-

biete liegt mit bis zu 1 Nacht eine deutlich geringere Anzahl vor. Die Abstufung, die für die Parameter Sommertage und heiße Tage im innerstädtischen Bereich tagsüber sichtbar wurde, ist hier aufgrund des niedrigeren Ausgangsniveaus weniger deutlich vorhanden. Die größeren Grünflächen weisen ebenfalls ein recht einheitliches Niveau auf, wobei die Anzahl an Tropennächten zu den Randbereichen vom Tiergarten und Tempelhofer Feld mit Nähe zu den Siedlungsflächen wieder zunimmt (blaue Farbe). Mehr als 0,5 Tage/Jahr sind aber nicht zu verzeichnen.

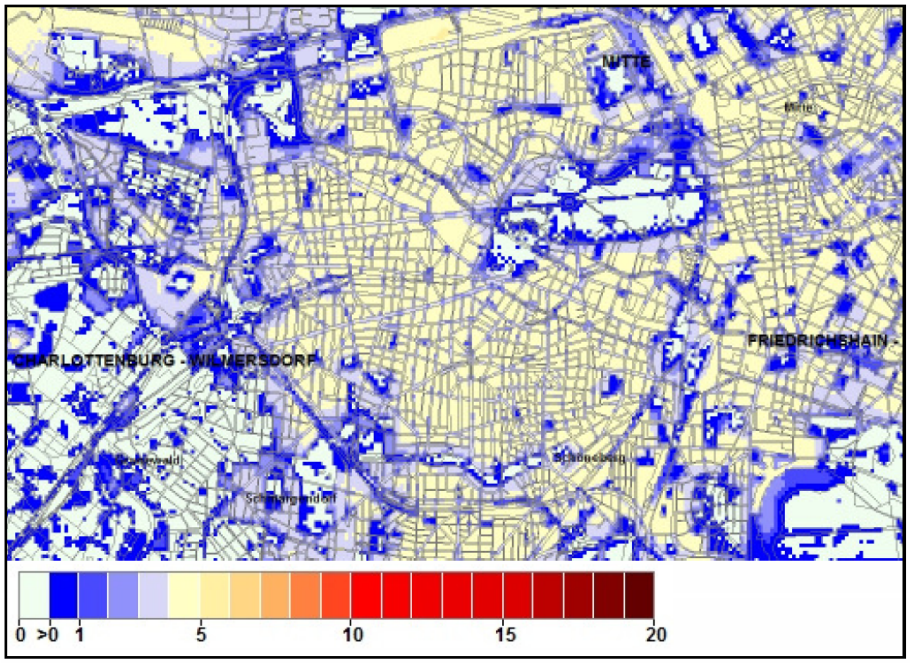


Abb. 26: Tropennächte im Zeitraum 2001 bis 2010

Anzahl der Tropennächte im Zeitraum 2046 - 2055

Der beschriebene Anstieg in der Anzahl an Tropennächten spiegelt sich im insgesamt höheren Werteniveau bis zur Mitte des Jahrhunderts wider (Abb. 27). Zugleich bleibt die geringe Varianz der räumlichen Ausprägung des Zeitraums 2001-2010 im Siedlungsraum erhalten, wobei nun Werte zwischen 8 und 8,5 Tropennächte/Jahr auftreten.

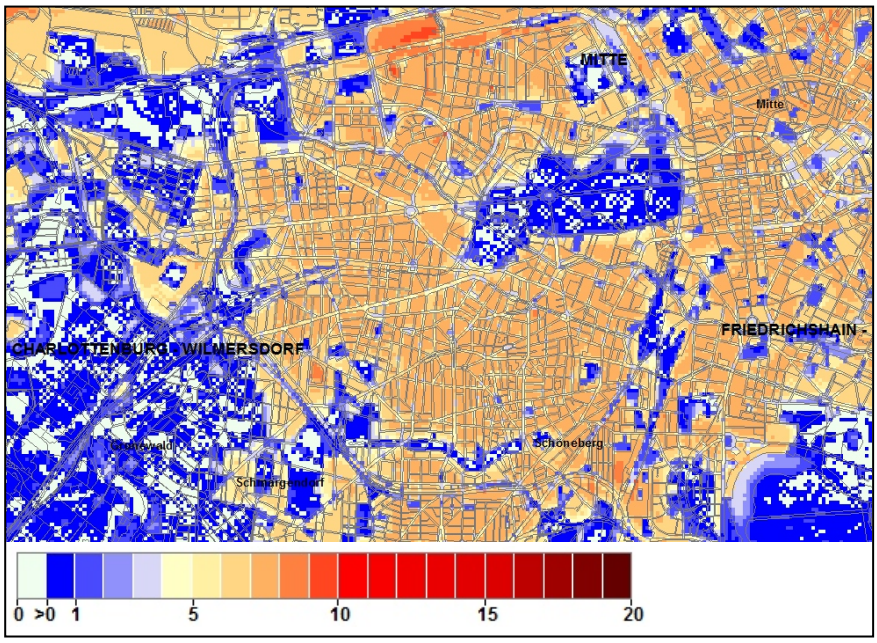


Abb. 27: Tropennächte im Zeitraum 2046 bis 2055

Lediglich innerhalb der ausgedehnten Gewerbeflächen im Bereich Beusselstraße / A100 steigen diese auf bis zu 9 an. In den durchgrünten Siedlungsräumen bleibt die Anzahl der Tropennächte mit ca. 1/Jahr weiterhin gering.

Auch innerhalb der Grünflächen ist im Zeitraum 2046-2055 eine ähnliche Häufigkeit von Tropennächten zu beobachten, wobei die Anzahl zwischen 0 und 1,2 schwankt.

Anzahl der Tropennächte im Zeitraum 2091 - 2099

Ausgehend vom Zeitraum 2046-2055 hat sich zum Ende des Jahrhunderts die Anzahl der Tropentage quasi verdoppelt. So sind nun innerhalb der dichten Bebauung von Mitte und den größeren Gewerbearealen bis zu 17 Tropennächte anzutreffen, während die Anzahl in den übrigen Siedlungsflächen von Charlottenburg auf bis zu 15/Jahr leicht zurück geht (Abb. 28).

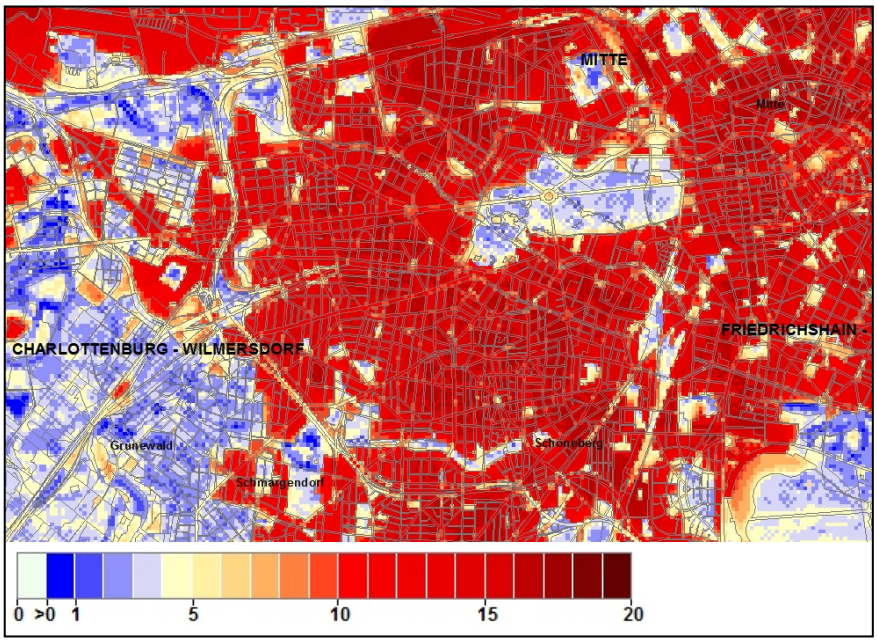


Abb. 28: Tropennächte im Zeitraum 2091 bis 2099

Innerhalb der bioklimatisch günstigen, durchgrünten Siedlungen bleibt die Anzahl von Tropennächten mit bis zu 5 vergleichsweise niedrig. Die Bandbreite der in den Grünflächen auftretenden Anzahl an Tropennächten bleibt weiterhin schmal und geht nicht - je nach Standort und damit Art und Struktur der Vegetation innerhalb der Grünareale - über 4 hinaus.

4.2.4 Integrierende Bewertung der Wärmebelastung am Tag

Eine wichtige Grundlage für die Beurteilung der bioklimatischen Belastung ist in der durchgeführten Untersuchung der Bewertungsindex PMV (Predicted Mean Vote; vgl. FANGER 1972) als dimensionsloses Maß für die Wärmebelastung. Dieser basiert auf der Wärmebilanzgleichung des menschlichen Körpers und gibt den Grad der Unbehaglichkeit bzw. Behaglichkeit als mittlere subjektive Beurteilung einer größeren Anzahl von Menschen in Wertestufen

wieder. Als bedeutende, den PMV mitbestimmende Parameter sind Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und relative Feuchte zu nennen.

Als ein Tag mit Wärmebelastung wird ein auftretender PMV-Wert von > 2.5 definiert, was einem „heißen" thermischen Empfinden am Tage entspricht und beim Menschen eine Wärmebelastung bewirkt. Im Folgenden wird nun die Auswertung zur Anzahl der Tage mit einer Überschreitung dieser 2.5-Grenze im Jahr für die drei Zeitschnitte erläutert.

Anzahl der Tage/Jahr mit PMV > 2.5 am Tage im Zeitraum 2001 - 2010

Die räumliche Ausprägung der Anzahl an Tagen mit einem PMV >2.5 geht eng mit der baulichen Dichte der Siedlungsstrukturen einher, wobei ein hohes Bauvolumen in Verbindung mit einer geringen Grünausstattung das Auftreten von Wärmebelastungen begünstigt. So tritt im Istzustand die höchste Anzahl von bis zu 32 Tage/Jahr flächenhaft vor allem im Bereich der Kerngebietsbebauung in Mitte sowie dem östlichen Kurfürstendamm auf (Orange). In der innerhalb des inneren S-Bahnrings vorhandenen Bebauung liegt die Anzahl an Belastungstagen meist zwischen 20 und 24 pro Jahr. Die grüngeprägten Siedlungsflächen weisen unter den Siedlungsräumen die geringste Anzahl an Tagen mit einer Wärmebelastung auf.

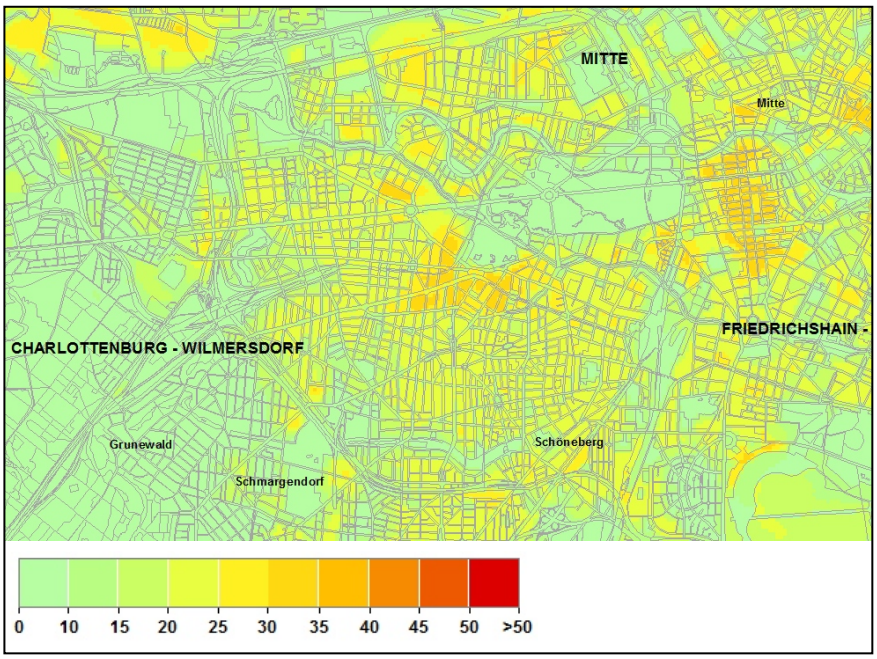


Abb. 29: Anzahl der Tage/Jahr mit PMV > 2.5 am Tage im Zeitraum 2001 bis 2010

Im Gegensatz zu den Tropennächten spiegeln sich die Eigenschaften der verschiedenen Grünflächen stärker in den Ergebnissen wider. So weist das Tempelhofer Feld mit bis zu 17 Tagen/Jahr ein vergleichsweise hohes Belastungspotenzial auf, was auf den durch Wiese geprägten Flächentyp mit starker Erwärmung am Tage zurück zu führen ist. Während im Großen Tiergarten an 6 bis 7 Tagen im Jahr ein PMV >2.5 auftritt, geht er in den größeren Waldflächen des Grunewalds aufgrund des ausgeprägteren Bestandesklimas nicht über 5 hinaus.

Anzahl der Tage/Jahr mit PMV > 2.5 am Tage im Zeitraum 2046 - 2055

Zur Mitte des Jahrhunderts wird sich die Anzahl an Tagen mit Wärmebelastung vor allem in den dichteren Siedlungsflächen auf 35 bis 38 Tage im Jahr erhöhen (Abb. 30). In der übrigen Wohnbebauung innerhalb des inneren S-

Bahn-Rings wird die Anzahl der Tage um etwa 1,5 Tage aber weniger stark zunehmen und dann bis zu 26 Tage/Jahr betragen. Die Anzahl der Tage mit Wärmebelastung am Tage wird sich über dem Tempelhofer Feld auf bis zu 23 erhöhen, während sie sich innerhalb des Tiergartens kaum verändert und bei etwa 6 Tagen/Jahr verbleibt. Innerhalb des Grunewalds sind keine Zunahmen zu beobachten.

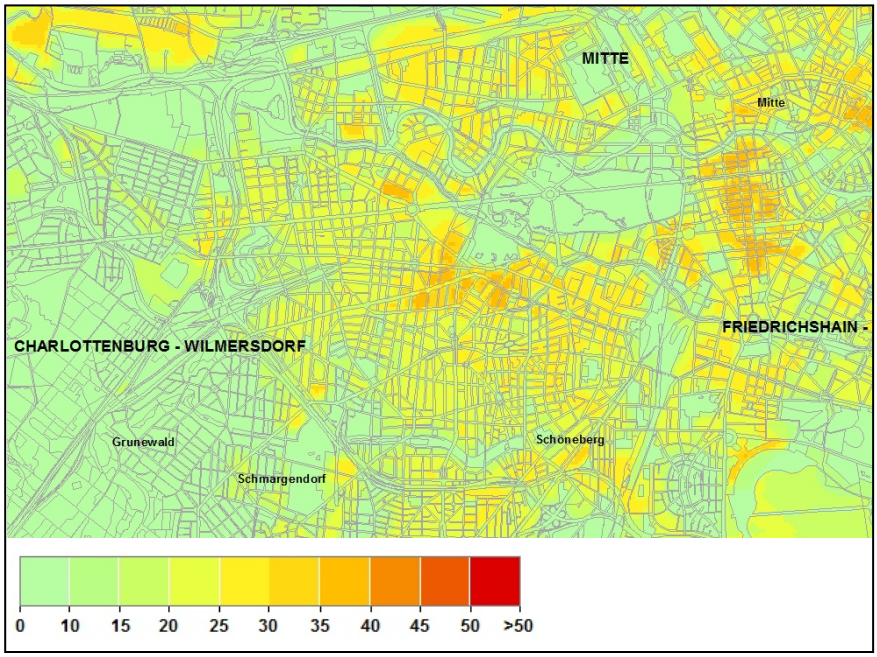


Abb. 30: Anzahl der Tage/Jahr mit PMV > 2.5 am Tage im Zeitraum 2046 bis 2055

Anzahl der Tage/Jahr mit PMV > 2.5 am Tage im Zeitraum 2091 - 2099

Die Anzahl der Tage mit einer Wärmebelastung ist bis zum Ende des Jahrhunderts durch einen markanten Anstieg charakterisiert, wobei dann bis zu 61 Tage/Jahr im innerstädtischen Raum auftreten können (rote Farbe, Abb. 31). In den übrigen Siedlungsflächen des inneren S-Bahn-Rings können durchschnittlich 40 bis 45 Tage beobachtet werden. Auch in den grüngeprägten Wohngebieten ist die Anzahl der Tage auf 17 angestiegen, womit sie aber auch weiterhin auf einem vergleichsweise niedrigen Belastungsniveau verbleiben.

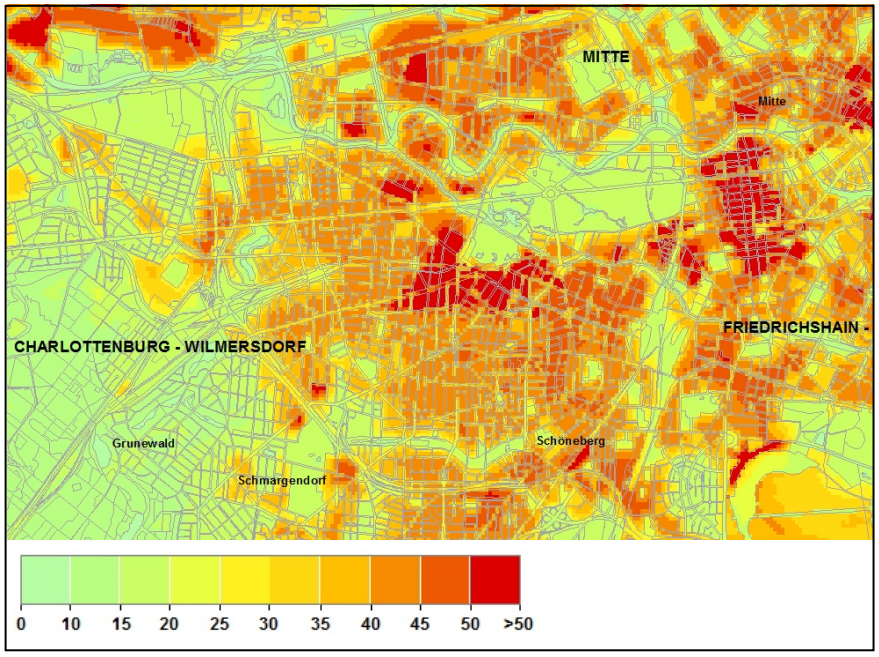


Abb. 31: Anzahl der Tage/Jahr mit PMV > 2.5 am Tage im Zeitraum 2091 bis 2099

Innerstädtische Grün- und Freiflächen heben sich, abhängig vom Flächentyp, ebenfalls durch deutlich niedrigere Werte ab, wobei der Grunewald ca. 13 Tage und der Tiergarten etwa 16-17 Tage mit Wärmebelastung aufweist. Das Tempelhofer Feld hingegen besitzt mit bis zu 41 Tagen/Jahr aufgrund seiner offenen Einstrahlungssituation ein relativ hohes Belastungsniveau.

Belastungskarten „Wärmebelastung in Siedlungsflächen am Tage“

Als ein weiteres Ergebnis der Modellrechnungen wurden für die Zeitschnitte 2001-2010 und 2046-2055 Bewertungskarten erarbeitet, welche zum Ziel haben, diejenigen Siedlungsflächen hervorzuheben, welche voraussichtlich am stärksten von einer Zunahme der sommerlichen Wärmebelastung am Tage betroffen sein werden und somit als Handlungsschwerpunkte identifiziert werden können. Für die weitere Bearbeitung wurden die rasterbasierten Ergebnisse der Klimamodellierung als Flächenmittelwerte auf die ISU5-Block(teil)flächen übertragen und mittels einer statistischen Analyse (Z-Transformation) die Ausprägung der Anzahl der Belastungstage innerhalb der Blockflächen untergliedert. Die Magentafarben kennzeichnen dabei diejenigen Siedlungsflächen, welche die höchste Wärmebelastung am Tage erwarten lassen. In der Karte sind für die Klassen „Mittel“ und „Hoch“ zusätzlich das 25. und 75. Perzentil als Übergangsbereiche der Klassengrenzen mit ausgewiesen worden (s. Abb. 32). So wird durch die zusätzliche Differenzierung innerhalb einer Wertestufe eine genauere Verortung von Handlungsschwerpunkten zusätzlich ermöglicht.

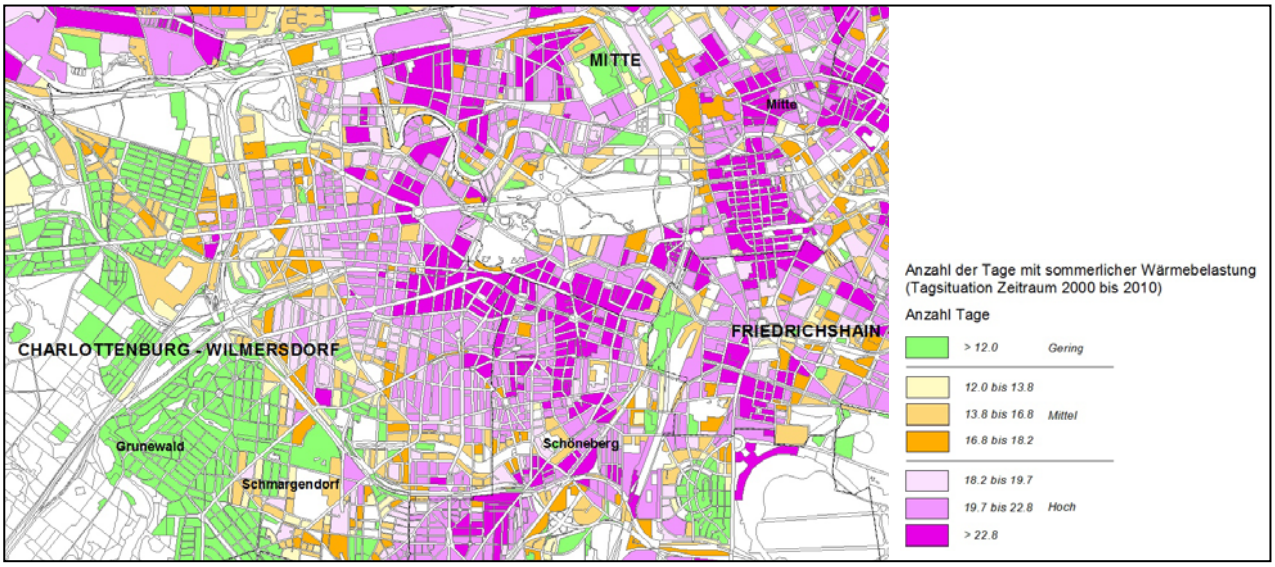


Abb. 32: Anzahl der Tage mit Wärmebelastung am Tage im Zeitraum 2001 bis 2010

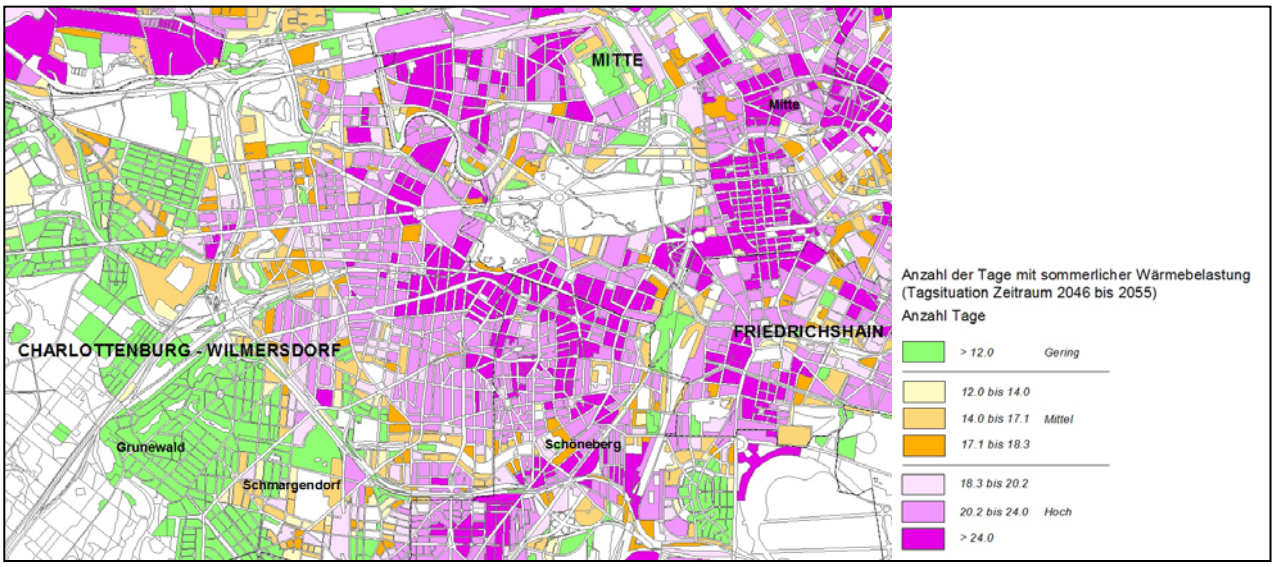


Abb. 33: Karte Wärmebelastung Tagsituation 2046 bis 2055

In den Abb. 32 und 33 lassen sich die Aussagen zur Ausprägung der Tage mit einer Wärmebelastung am Tage besser verorten, wobei das auftretende Wertespektrum des jeweiligen Zeithorizonts bewertet wurde. In der bewerteten Ist-Situation weist ein Großteil der Siedlungsflächen innerhalb des Inneren S-Bahn-Rings, jeweils in Abhängigkeit von ihrer Bebauungsstruktur bzw. Nähe zu entlastenden Grünflächen, eine mittlere bis hohe bioklimatische Belastung an Sommertagen auf. Ausgehend vom Istzustand, wird sich dieser Flächenanteil in Richtung auf die Peripherie vergrößern. Die durchgrünten Siedlungsflächen im Bereich Grunewald sowie beispielsweise auch in der Tempelhofer Vorstadt westlich des Tempelhofer Feldes weisen auch zur Mitte des Jahrhunderts mit einer geringen Belastungssituation noch meist günstige bioklimatische Bedingungen auf.

4.2.5 Integrierende Bewertung der Wärmebelastung in der Nacht

Die Belastungskarten für die Nachtsituation zeigen die bioklimatischen Bedingungen während einer sommerlichen Strahlungswetterlage auf. Im Gegensatz zur Tagsituation, welcher bereits eine Auswertung zur *Anzahl* von Belastungstagen (mit einem PMV > 2.5) zugrunde liegt, wird hier der originäre PMV-Wert für eine typische Sommernacht mit geringem Luftaustausch und ungehinderter langwelliger Ausstrahlung bei einem wolkenlosem Himmel herangezogen. Dabei wirken lokal auftretende Kaltluftströmungen modifizierend auf die räumliche Ausprägung des PMV. Es handelt sich somit um eine, wenn auch typische, Einzelsituation.

Die Bewertung der nächtlichen PMV-Situation unterscheidet sich somit auch methodisch von der am Tage. Während für die Tagsituation ein PMV-Wert von > 2.5 als Schwellenwert vorliegt, ist so ein Grenzwert für die Nacht nicht definiert. Daher wird das lokale (PMV-) Werteniveau im Untersuchungsraum herangezogen, ohne dass eine konkrete Anzahl von Belastungstagen angegeben wird. Um die Abweichungen von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum zu charakterisieren, wurde eine Z-Transformation des PMV-Ergebnisrasters der Klimamodellierung durchgeführt.

Über das in der VDI-RL 3785 Blatt 1 beschriebene Verfahren zur Ermittlung der bioklimatischen Situation wird mittels der Z-Transformation das Modellgebiet in günstige und ungünstige Areale untergliedert. Die bioklimatischen Belastungsklassen entsprechen den insgesamt vier Kategorien gemäß der VDI-Richtlinie3785 (vgl. Tabelle 1).

Bioklimatische Belastungsstufe	Wert Z-Transformation
4 ungünstig	> 1 (obere S_1-Schranke)
3 weniger günstig	0 bis 1
2 günstig	-1 bis 0
1 sehr günstig	<-1 (untere S_1-Schranke)

Tab. 1: Klassifizierung der bioklimatischen Situation

Analog zur Tagsituation wurden für den Zeitschnitt 2050 in den Klassen „Weniger günstig“ und „Ungünstig“ das 25. und 75. Perzentil als Übergangsbereiche ausgewiesen (s. Abb. 35). Je dunkler der Farbwert, desto höher ist die mögliche Belastungssituation. Sowohl für den Istzustand als auch für die Mitte des Jahrhunderts kann festgestellt werden, dass im innerstädtischen Siedlungsgebiet eine große Anzahl an Baublöcken als bioklimatisch ungünstig eingeordnet werden kann. Zwischen beiden Zeithorizonten wird der bioklimatisch ungünstige Anteil am gesamten Siedlungsraum Berlins von 10,3 % auf 26,5 % ansteigen. Gleichzeitig wird der weniger günstige Flächenanteil von 44,8 % (2010) auf 34,2 % (2050) zurückgehen und diese 10,6 % des Siedlungsgebietes werden in die bioklimatisch ungünstige Kategorie übergehen. Für die Ausweisung von Handlungsschwerpunkten im Hinblick auf Anpassungsmaßnahmen stehen, in Ergänzung zur Tagsituation, auch diese Siedlungsflächen im Vordergrund.

Stärker noch als während des Tages wird das Auftreten von Belastungen durch nächtliche Flurwinde modifiziert, welche von den größeren Kaltluft produzierenden Grün- und Freiflächen im Stadtgebiet Berlins ausgehen. Diese machen sich im gewählten Kartenausschnitt als „Saum“ im Umfeld des Großen Tiergarten und des Tempelhofer Feldes bemerkbar, so dass auch im Zeitschnitt 2044-2055 z.B. einzelne Siedlungsflächen noch in der Kategorie „weniger günstig“ verbleiben und nicht als bioklimatisch ungünstig bewertet werden.

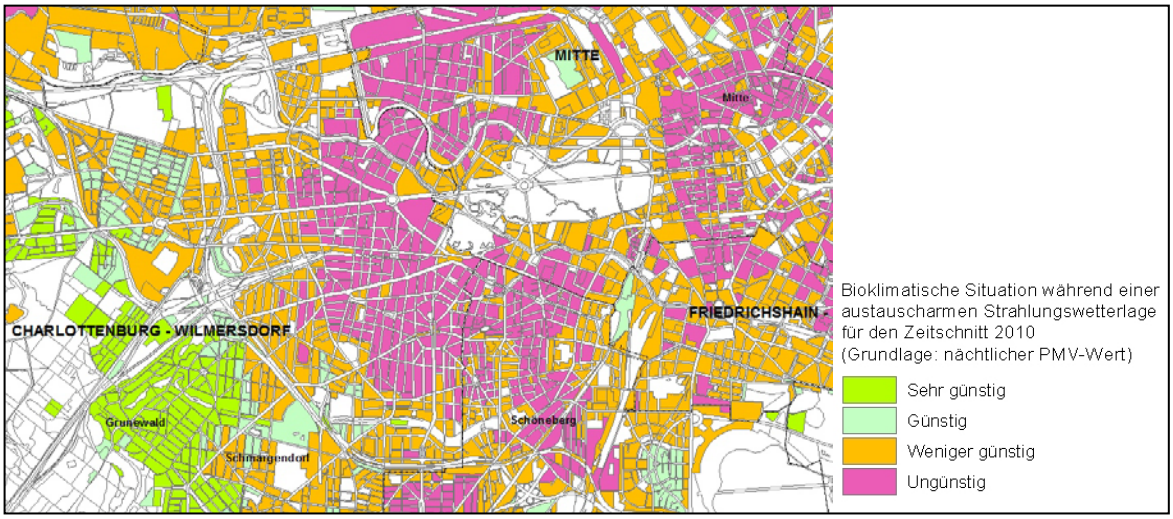


Abb. 34: Bewertung der Wärmebelastung in der Nacht für den Zeitschnitt 2010

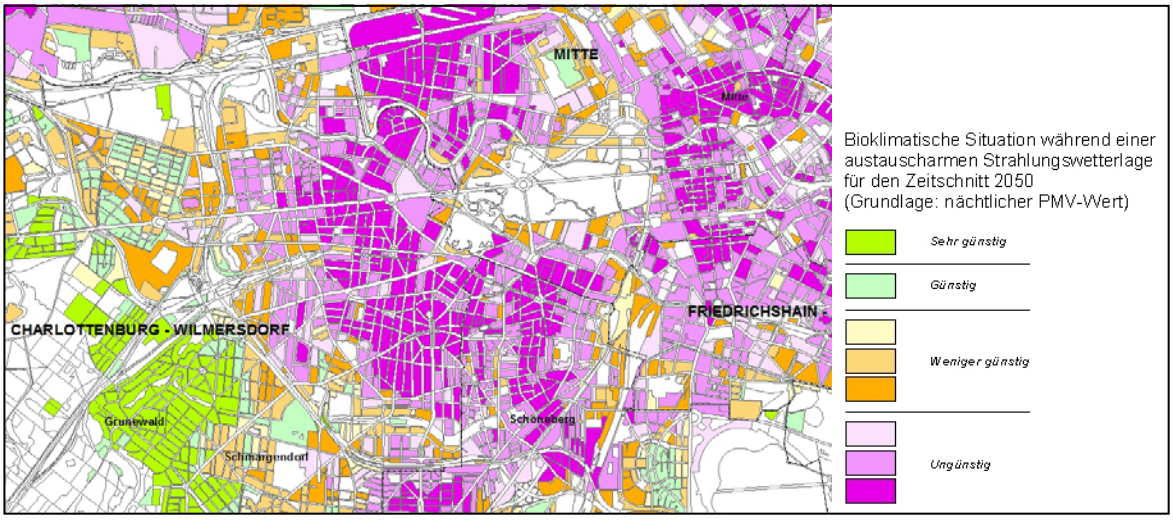


Abb. 35: Bewertung der Wärmebelastung in der Nacht für den Zeitschnitt 2046 bis 2055

In beiden betrachteten Zeithorizonten treten die grüngeprägten Wohnareale als die Bereiche mit dem günstigsten Bioklima unter den Siedlungsflächen hervor. Der hohe Vegetationsanteil führt in Verbindung mit einem niedrigen Versiegelungsgrad zu einer geringen Wärmeaufnahme am Tage. Im Umkehrschluss wird in den Nachtstunden wieder wenig Wärme von der Baumasse an die Luft abgegeben, was in einem entsprechend geringen Temperaturniveau resultiert. Durch diese Eigenschaften wird sich hier die unter dem Einfluss des Klimawandels ansteigende sommerliche Wärmebelastung deutlich weniger stark ausprägen als in den innerstädtischen Siedlungsflächen.

4.2.6 Biotopflächenfaktor am Beispiel Prenzlauer Berg

Der Biotopflächenfaktor (BFF) beschreibt das Verhältnis von naturhaushalts-wirksamer Flächen zur gesamten Grundstücksfläche und zielt darauf ab, alle potenziellen Begrünungsmöglichkeiten in die Stadtentwicklung einzubeziehen. Neben naturbelassenen ebenerdigen Flächen sollen auch Fassaden- und Dachbegrünung je nach standörtlichen Gegebenheiten u.a. zur Verbesserung des lokalen Klimas, des Wasserhaushalts sowie der Bodenfunktionen beitragen. In Abhängigkeit der jeweiligen städtischer Nutzungsform werden spezifische BFF-Werte formuliert, welche von 0,3 bei gewerblicher Nutzung bis 0,6 bei Wohnnutzung betragen. Mit Blick auf die stadtklimatischen Fragestellungen dient der BFF im Wesentlichen dazu, den Versiegelungsgrad im urbanen Raum zu reduzieren und damit den Energiehaushalt günstig zu beeinflussen.

Im Rahmen der Arbeiten zum StEP Klima wurde auch die Umsetzung des BFF für eine sommerliche, windschwache Wetterlage beispielhaft simuliert und die Größenordnung der Veränderungen gegenüber dem Ausgangszustand ermittelt. Dabei wurde eine Tagsituation (14 Uhr; Abb. 37) sowie eine Nachtsituation (4 Uhr; Abb. 38) simuliert.

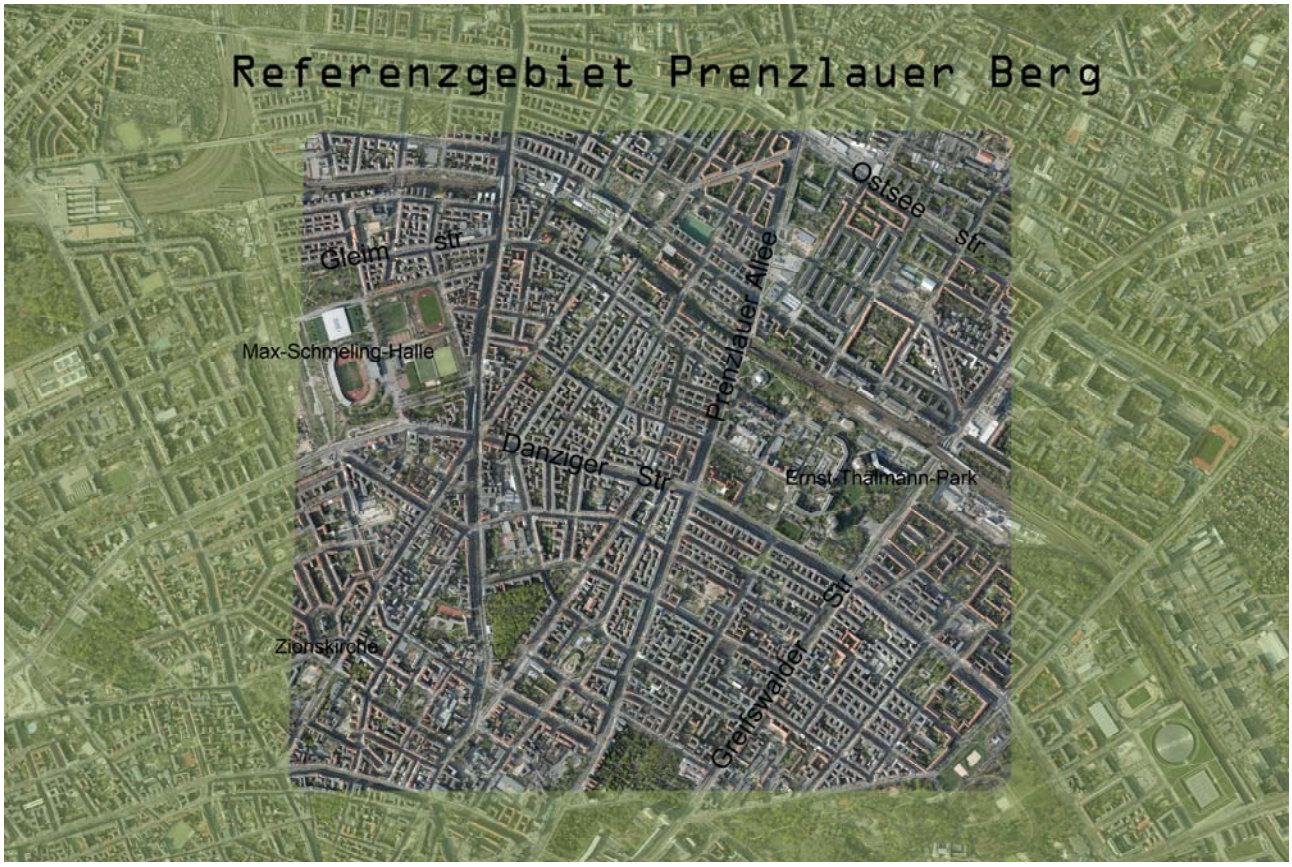


Abb. 36: Luftbild und Lage des Referenzgebietes im Ortsteil Prenzlauer Berg des Bezirks Pankow

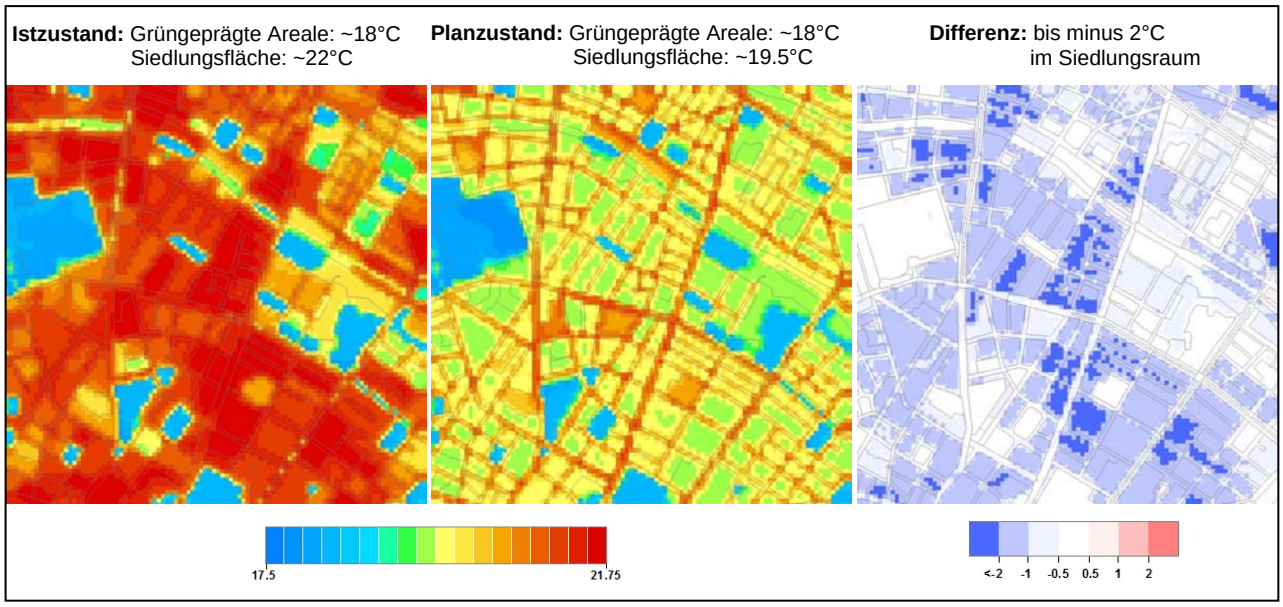


Abb. 37: Lufttemperatur in 2 m Höhe um 14 Uhr im Ist- und Plan-Zustand sowie Differenz bei Umsetzung der BFF-Zielsetzung

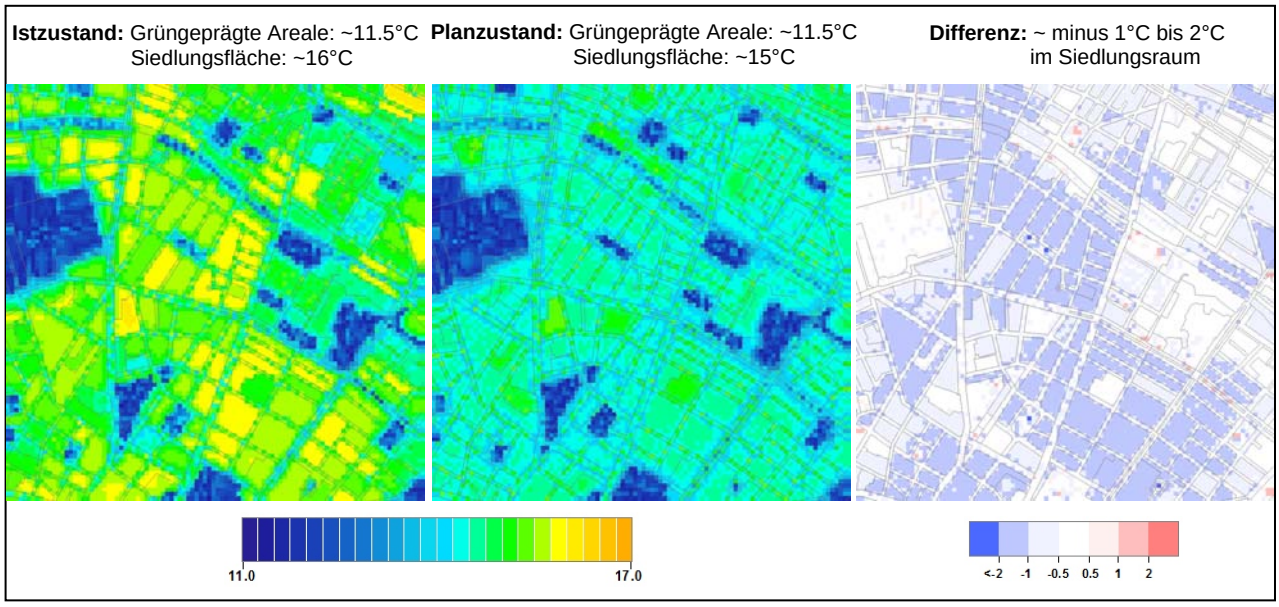


Abb. 38: Lufttemperatur in 2 m Höhe um 4 Uhr im Ist- und Plan-Zustand sowie Differenz bei Umsetzung der BFF-Zielsetzung

Zu beiden Zeitpunkten treten die Grünflächen mit den niedrigsten Temperaturen hervor (blaue Farben), während die überbauten Flächen grundsätzlich die höchsten Werte aufweisen. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen der Modellrechnung erwärmt sich die bodennahe Luft innerhalb der Siedlungsflächen am Tage auf bis zu 22°C, wobei die räumliche Ausprägung innerhalb der Nutzungsstrukturen von ihrem jeweiligen Überbauungs- und Versiegelungsgrad mitbestimmt wird. Die grüngeprägten Flächen bleiben mit ca. 18°C dagegen deutlich kühler. In der Nacht kühlen die Grünflächen stärker ab als die überbauten Bereiche, so dass sich ein Temperaturunterschied von bis zu 5°C ergeben kann.

Die Umsetzung des BFF geht mit der Erhöhung des unversiegelten Flächenanteils einher, welche sich am Tage und in der Nacht unterschiedlich stark auswirkt. Für den 14 Uhr-Zeitpunkt kann festgestellt werden, dass die Zunahme an naturhaushaltwirksamer Fläche auch eine geringere Erwärmung am Tage zur Folge hat (Abb. 36). Dies ist darauf zurück zu führen, dass durch Prozesse wie Verschattung und Verdunstung von Pflanzen weniger (Wärme-) Energie

an den Oberflächen der Baumassen umgesetzt wird und sich die oberflächennahe Luftschicht dadurch weniger stark erwärmt. In der Differenzenkarte zeigt sich die absolute Abweichung vom Istzustand nach Umsetzung der BFF-Vorgaben. Sie ist dort am höchsten, wo der Versiegelungsgrad im Istzustand am stärksten ausgeprägt ist, wobei eine Abnahme der Lufttemperaturen in einer Größenordnung von 1°C bis 2°C erzielt werden kann.

Auch für die Nachtsituation kann eine Reduzierung der Lufttemperatur von etwa 1°C festgestellt werden. Da die bebauten Areale tagsüber weniger Energie aufnehmen, ist die nächtliche Wärmeabgabe an die Luft ebenfalls herabgesetzt. Der Biotopflächenfaktor kann daher einen wertvollen Beitrag leisten, die sommerliche Wärmebelastung im Siedlungsraum zu reduzieren.

4.3 Mikroskalige Simulation von Einzelmaßnahmen

Über die Simulation verschiedener Maßnahmen kann die Wirksamkeit zur Reduzierung der Wärmebelastung am Tage innerhalb von Siedlungsflächen ermittelt werden. Dabei kommt das mikroskalige Modell ASMUS zum Einsatz, welches für komplexe urbane Untersuchungsgebiete mit sehr kleinen horizontalen Maschenweiten konzipiert ist. Unterschiedliche Bebauungsstrukturen können detailliert aufgelöst und ihre Auswirkungen auf das Strömungsfeld und den Wärmehaushalt im innerstädtischen Bereich simuliert werden.

Es verfügt darüber hinaus über spezielle Rechenschemata, insbesondere auch zur Berücksichtigung von Baumstrukturen. Das Modell ist in der Lage, mit einer räumlichen Auflösung von 0,5 - 5 m beispielsweise Wind und Temperatur in der Umgebung einzelner Hindernisse (Gebäude, Bäume) unter Vorgabe punktgenauer Informationen (Albedo, Begrünung, Wärmeleitfähigkeit von Wand und Dachflächen) zu simulieren. Als technische Kennwerte für Albedo, Wärmeleitfähigkeit etc. werden Literaturwerte vorgegeben.

Ausgangssituation ist ein Modellgebiet in Charlottenburg, für welches ein Szenario mit vollständiger Versiegelung im Innenhof und ohne Bäume in den Innenhöfen bzw. im Straßenraum angenommen wird. Es stellt somit eine „Worst-Case"-Situation dar, an der die grundsätzliche Größenordnung der Wirksamkeit einer Einzelmaßnahme zur Senkung der Lufttemperatur an einem Sommertag quantifiziert werden soll. Es wurden darüber hinaus die folgenden Maßnahmen simuliert:

Szenario 1 - Ausgangssituation mit Straßen- und Innenhofbäumen (Bestand und Planfall kombiniert)

Szenario 2 - Ausgangssituation mit Albedoerhöhung im Straßenraum sowie an allen Fassaden und Dächern ("Griechisches Dorf")

Szenario 3 - Ausgangssituation mit Fassadenbegrünung

Szenario 4 - Ausgangssituation mit Dachbegrünung

Szenario 5 - Entsiegelung im Innenhof sowie in Teilbereichen der öffentlichen Verkehrsfläche

Szenario 6 - Zusätzliche Dämmung der Fassaden

Szenario 7 - Summenwirkung aller Einzelmaßnahmen

Szenario 8 - Erweiterte Fassadenbegrünung

Schnitte in Nord-Süd- bzw. West-Ost-Richtung durch das Modellgebiet verdeutlichen die vertikale Ausprägung der Lufttemperatur an einem strahlungsreichen wolkenlosen Sommertag für den Zeitpunkt 12 Uhr (Kap. 4.3.1). Dieser Zeitpunkt wurde ausgewählt, da durch den hohen Sonnenstand die Schattenwirkung der Bäume innerhalb des Straßenraums am deutlichsten ist.

Darüber hinaus stellt für die Beurteilung der Effekte von Maßnahmen der Gebietsmittelwert der Lufttemperatur für verschiedene Höhen innerhalb des Modellgebietes eine wichtige Grundlage dar (Kap. 4.3.2). Hierbei handelt es sich um den Wert für das gesamte Luftvolumen vom Grund bis zur angegebenen Höhe z, wobei insbesondere das Höhenniveau bis 2 m über Grund den Aufenthaltsbereich des Menschen repräsentiert. Die Höhe bis 24 m bezieht sich hingegen auf das Dachniveau. Die Wertedifferenz zwischen Maßnahmenumsetzung und Ausgangszustand gibt Aufschluss über die Wirksamkeit der jeweiligen Maßnahme. Um auch die Auswirkungen auf die Nachtsituation mit einzubeziehen, wird ein Zeitraum von 48 Stunden betrachtet.

Das Modellgebiet in Charlottenburg ist in den Abb. 39 und 40 dargestellt, wobei sich der betrachtete Baublock im Zentrum des Modellgebietes befindet.

Abb. 39: Luftbild und Lage des Referenzgebietes im Bezirk Charlottenburg

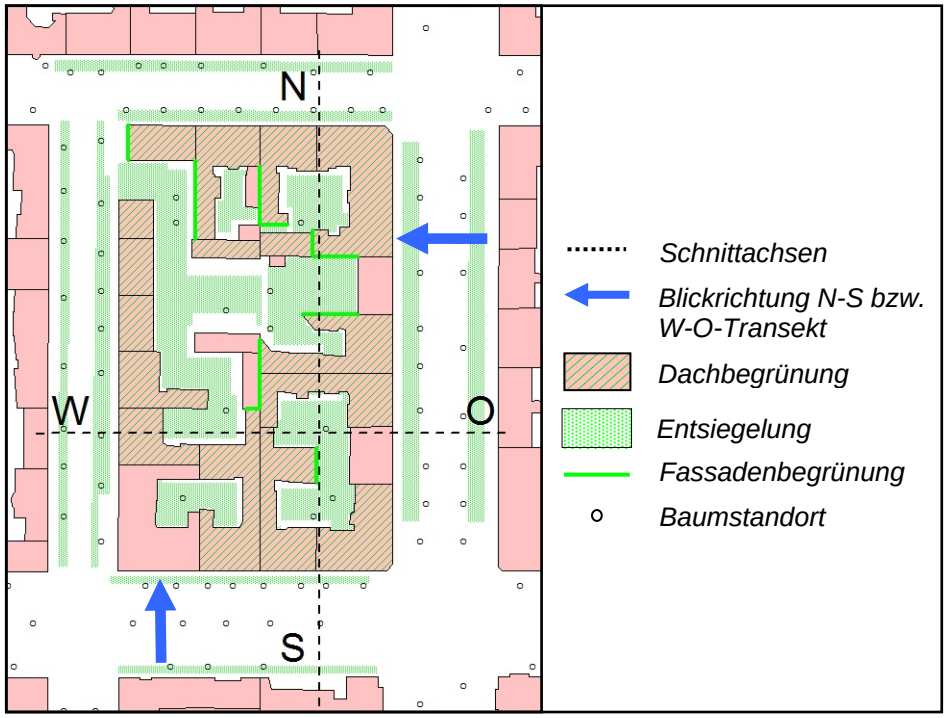


Abb. 40: Übersicht der Schnittachsen im Modellgebiet Charlottenburg

Die Schnittlinien sind so positioniert, dass sie über den betrachteten Block hinaus auch den Straßenraum sowie die angrenzenden Fassaden mit erfassen. Die in den jeweiligen Szenarien simulierten Einzelmaßnahmen sind in Abb. 40 verortet.

4.3.1 Vertikalschnitte

Als Ergebnis der Simulationen sind *Vertikalschnitte* angefertigt worden, welche den Temperaturverlauf mit der Höhe in einer Nord-Süd- bzw. West-Ost-Ausrichtung zeigen. Mit der Berechnung von Differenzen zwischen einer Maßnahme und dem Ausgangszustand lassen sich die räumlichen Ausprägungen bzw. die Höhenbereiche der von Maßnahmen ausgehenden Effekte ermitteln. In den Abbildungen haben die Gebäude- und Baumstrukturen eine graue Farbe. Im Folgenden wird auf die modellierten Maßnahmen zum Zeitpunkt 12 Uhr Mittags eingegangen, wobei die Rasterauflösung der Simulation 2 m x 2 m beträgt.

4.3.1.1 Ausgangszustand

Für den Ausgangszustand wird eine vollständige Versiegelung der ebenerdigen Flächen angenommen, welcher somit einer „Worst-Case“ Situation entspricht. Die Spannweite der auftretenden Lufttemperaturen reicht von ca. 30°C an den unbesonnten Nordfassaden bis auf lokal über 50°C an den südexponierten Fassaden (Abb. 41). Dabei treten die höchsten Temperaturen im bodennahen Übergangsbereich von Gebäuden und Straßenraum auf, da es hier zu Mehrfachreflexionen der solaren Einstrahlung durch die rechtwinklig zueinander ausgerichteten Flächen kommt.

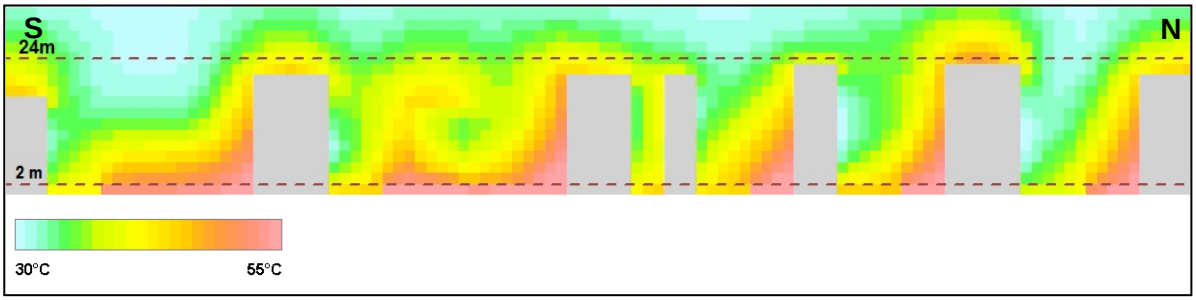


Abb. 41: Nord-Süd-Schnitt Ausgangssituation (vollständig versiegelt)

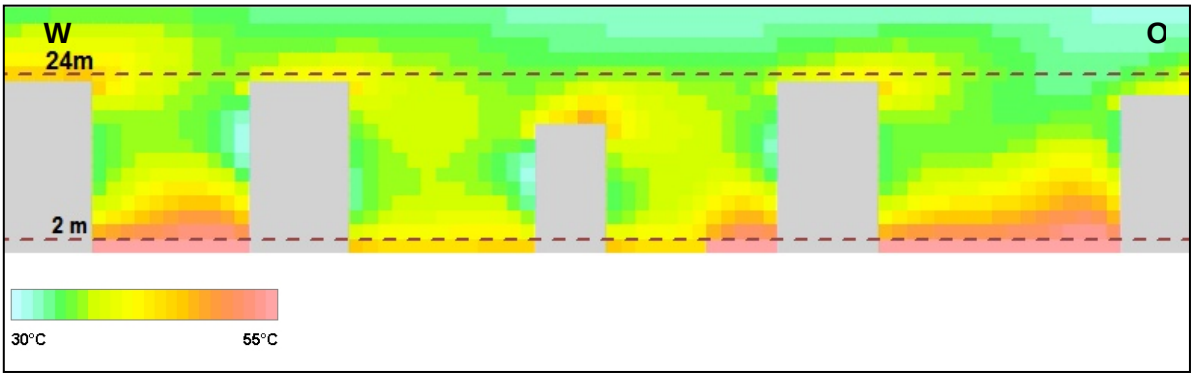


Abb. 42: West-Ost-Schnitt Ausgangssituation (vollständig versiegelt)

Auf den Dachflächen ist das Temperaturniveau mit bis zu 49 °C etwas niedriger. Über der ebenerdig versiegelten Fläche sind im Schatten noch Temperaturen von etwa 40°C anzutreffen.

4.3.1.2 Szenario 1: Straßen- und Innenhofbäume

Die Situation mit Straßen- und Innenhofbäumen zeigt Abb. 41. Dabei handelt es sich um den derzeitigen Baumbestand sowie um die angenommene Ergänzung von Bäumen im Straßenraum (Lückenschließung/Neupflanzung). Im Vergleich zum Ausgangszustand zeigt sich eine deutliche Verringerung der oberflächennahen Lufttemperaturen, wobei hohe Werte von mehr als 50°C nur noch kleinräumig auftreten. Die ist vor allem auf die Schattenwirkung der Bäume zurück zu führen, wobei sich zugleich auch die Verdunstung von Wasser durch die Bäume dämpfend auf die Temperatur auswirkt.

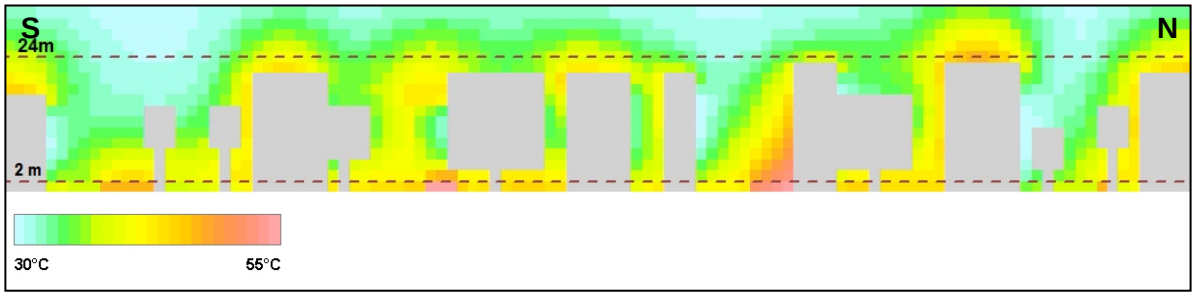


Abb. 43: Nord-Süd-Schnitt Szenario 1 (Straßen- und Hofbäume)

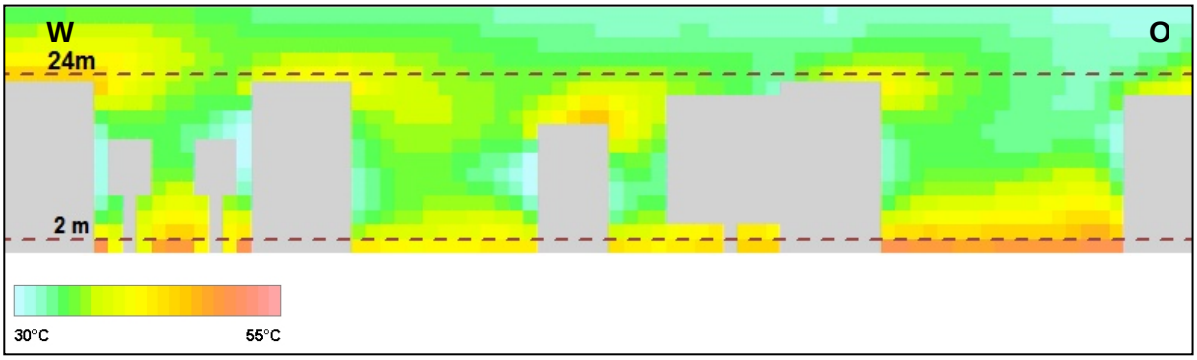


Abb. 44: West-Ost-Schnitt Szenario 5 (Straßen- und Hofbäume)

In den Abb. 45 und 46 sind die Abweichungen der Lufttemperaturen nach Umsetzung des Szenarios 1 im Vergleich zur Ausgangssituation als Absolutwerte dargestellt, wobei hier mehrere Baumstandorte sowohl im Straßenraum als auch im Innenhofbereich direkt angeschnitten werden.

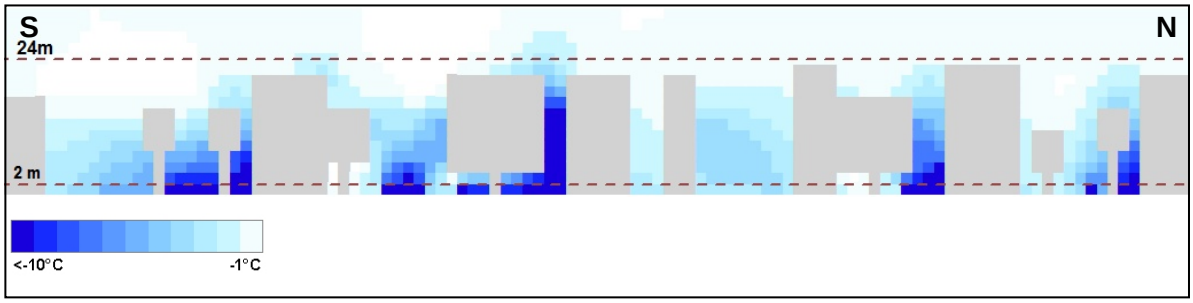


Abb. 45: Differenz Szenario 1 zur Ausgangssituation (Nord-Süd-Schnitt)

Es zeigt sich, dass in den durch Bäume verschatteten Bereichen die höchste Reduktion der Temperatur auftritt. Der Rückgang geht bodennah über 10°C hinaus und beträgt in Höhe des Dachniveaus noch bis zu 3°C.

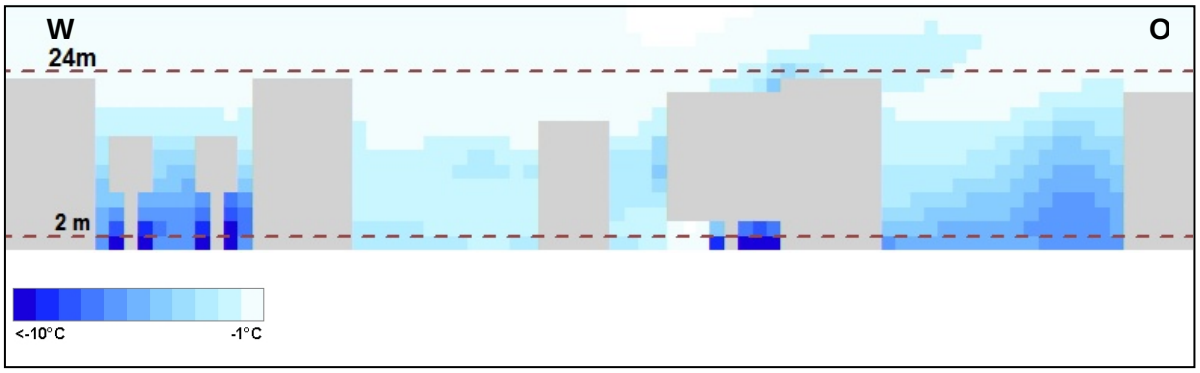


Abb. 46: Differenz Szenario 1 zur Ausgangssituation (West-Ost-Schnitt)

Die von den Bäumen ausgehende Reduzierung der Lufttemperatur ist auch im näheren Umfeld eines Baumstandortes gegeben, wenngleich sie mit nur noch 1°C bis 3°C deutlich geringer ist als direkt unter einem Kronendach (vgl. Abb. 45 und 46). Es kann aber festgehalten werden, dass die alleeartige Ausprägung von Bäumen im Straßenraum einen insgesamt wichtigen Beitrag für die Senkung der bodennahen Lufttemperatur an einem Sommertag erbringen kann.

4.3.1.3 Szenario 2: Albedoerhöhung

Das Szenario 2 umfasst die Erhöhung der Rexflexion des Sonnenlichts (Albedo) sowohl im Straßenraum als auch an den Fassaden und Hausdächern. Die räumliche Verteilung der Temperaturmaxima entspricht dabei im Wesentlichen der des Ausgangszustandes, wenngleich sich die Werte auf einem insgesamt niedrigeren Niveau bewegen (Abb. 47 und 48). So werden wegen des geringeren Energieumsatzes auf den Oberflächen Maximaltemperaturen von mehr als 50°C kaum noch erreicht.

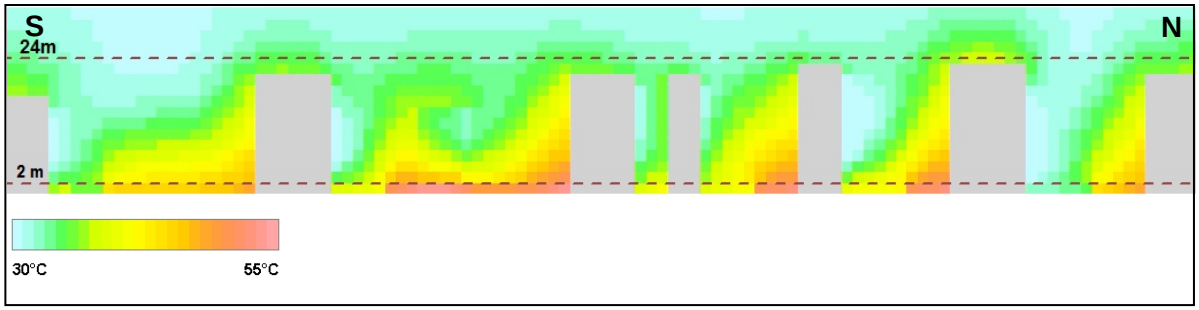


Abb. 47: Nord-Süd-Schnitt Szenario 2 (Albedoerhöhung)

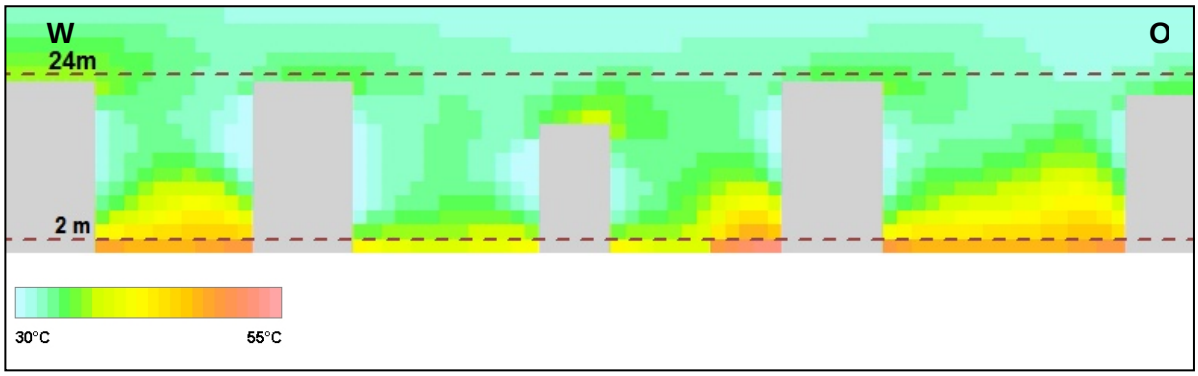


Abb. 48: West-Ost-Schnitt Szenario 2 (Albedoerhöhung)

Die Differenzenabbildungen zeigen die räumlichen Effekte der Albedoerhöhung (Abb. 49 und 50). Wie sich bei der Auswertung der Gebietsmittelwerte bereits gezeigt hat, geht die Wirkung über den bodennahen Bereich hinaus und führt insgesamt zu einer Absenkung der Lufttemperatur, welche sich bis über das Dachniveau hinaus erstreckt.

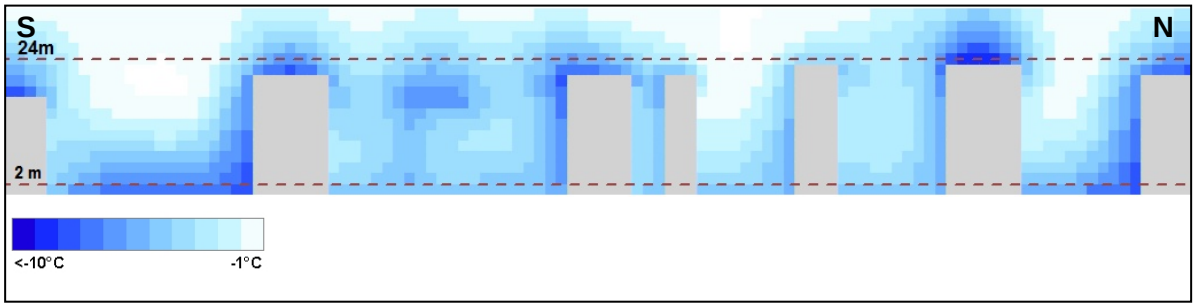


Abb. 49: Differenz Szenario 2 zur Ausgangssituation (Nord-Süd-Schnitt)

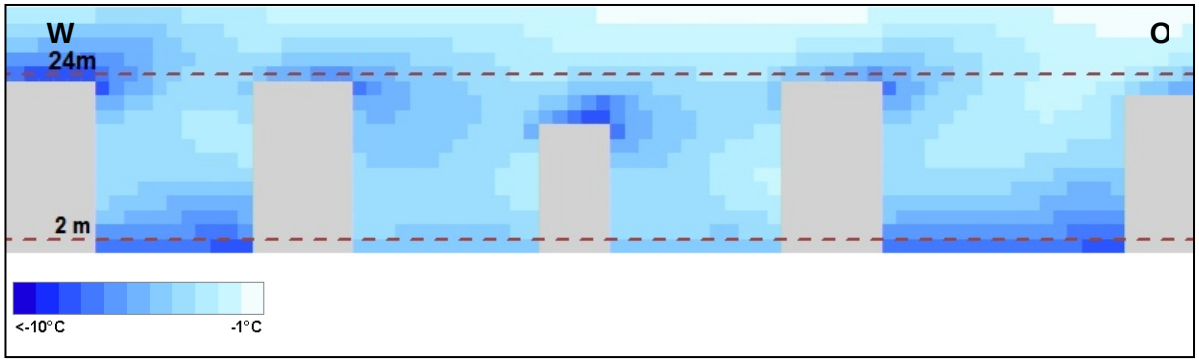


Abb. 50: Differenz Szenario 2 zur Ausgangssituation (West-Ost-Schnitt)

Die höchsten Abnahmen von bis zu 8°C sind im Straßenraum sowie auf den Dachflächen anzutreffen. Aufgrund der flächenhaften Ausprägung dieser Einzelmaßnahme sind für den Aufenthaltsbereich der Menschen im bodennahen Niveau deutliche Wohlfahrtseffekte zu erwarten.

4.3.1.4 Szenario 3: Fassadenbegrünung

Die Fassadenbegrünung als Einzelmaßnahme zeichnet sich im Szenario 3 durch einen vergleichsweise geringen Beitrag zur Senkung der Werte aus (Abb. 51 und 52). Eine Verringerung der Temperatur wird vor allem an der Fassade selbst erzielt und weist eine lediglich kleinräumige Wirkung auf, welche zudem durch die Ausrichtung der Begrünung und damit der Besonnungsintensität modifiziert wird.

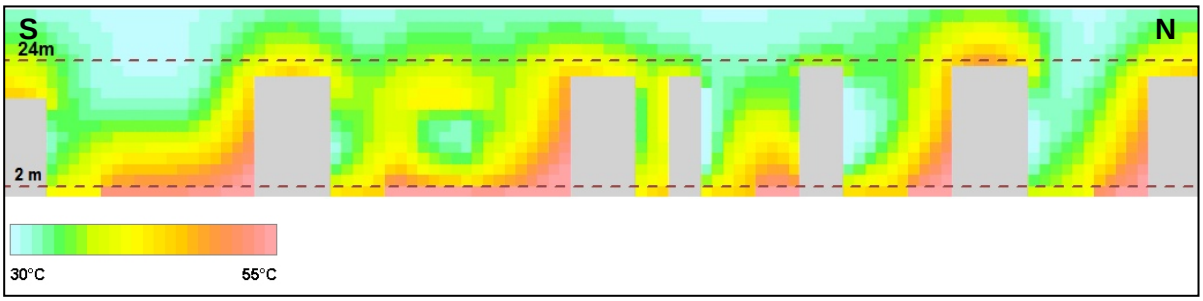


Abb. 51: Nord-Süd-Schnitt Szenario 3 (Fassadenbegrünung)

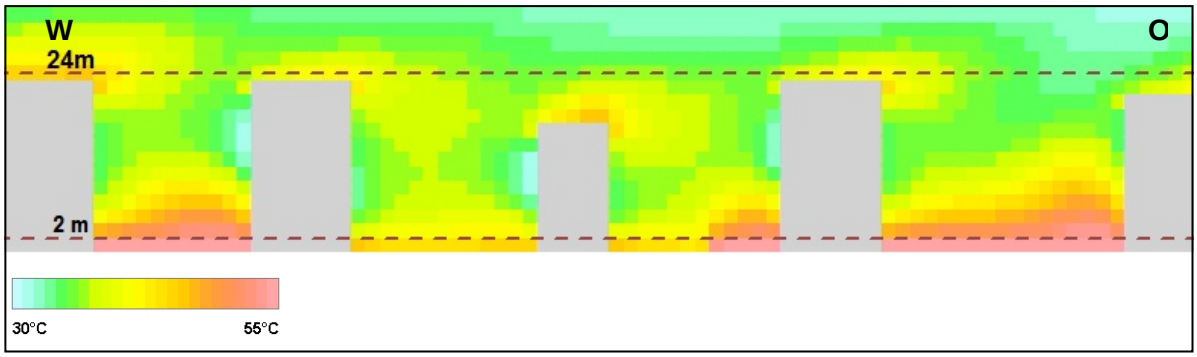


Abb. 52: West-Ost-Schnitt Szenario 3 (Fassadenbegrünung

Diese Aussage wird durch die Darstellung der Differenzen unterstützt, wobei in Abb. 53 sowohl eine Südwand als auch eine Nordwand mit Fassadenbegrünung direkt angeschnitten wird. Während an der südexponierten Fassade ein Temperaturrückgang von bis zu 9°C zu beobachten ist, beträgt er an der nördlichen Fassade lediglich ca. 5°C. Der im südlichen Innenhof auftretende Werterückgang ist auf die Fassadenbegrünung des unmittelbar westlich an die Schnittebene angrenzenden (hier jedoch nicht „angerissenen“) Gebäudes zurück zu führen.

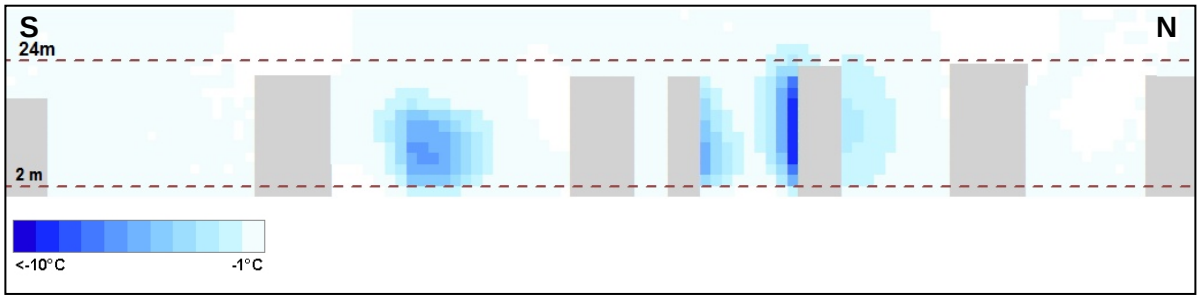


Abb. 53: Differenz Szenario 3 zur Ausgangssituation (Nord-Süd-Schnitt)

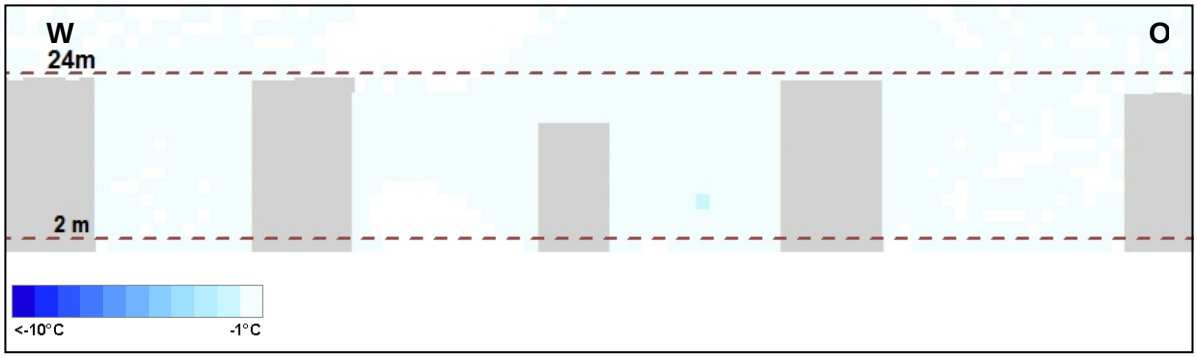


Abb. 54: Differenz Szenario 3 zur Ausgangssituation (West-Ost-Schnitt)

Ergänzend zeigt die Abb. 54 einen kaum von Fassadenbegrünung beeinflussten Querschnitt, was sich in flächenhaften Abnahmen von deutlich weniger als 1°C äußert. In weiterer Entfernung von den begrünten Fassaden ist unter den gegebenen Rahmenbedingungen kaum von einer relevanten Wohlfahrtswirkung auszugehen.

4.3.1.5 Szenario 4: Dachbegrünung

Das Szenario 55 sieht als Einzelmaßnahme die Begrünung der Flachdächer vor. Während die Lufttemperatur über der Dachbegrünung kaum über 40°C hinausgeht, entspricht sie im bodennahen Bereich noch weitestgehend der Ausgangssituation.

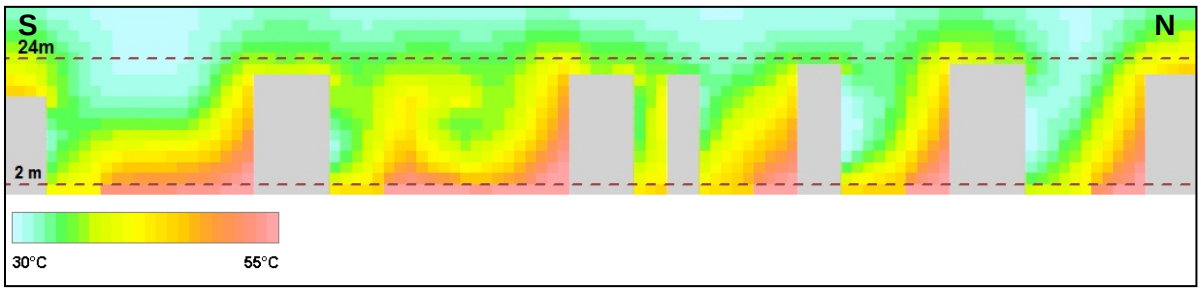


Abb. 55: Nord-Süd-Schnitt Szenario 4 (Dachbegrünung)

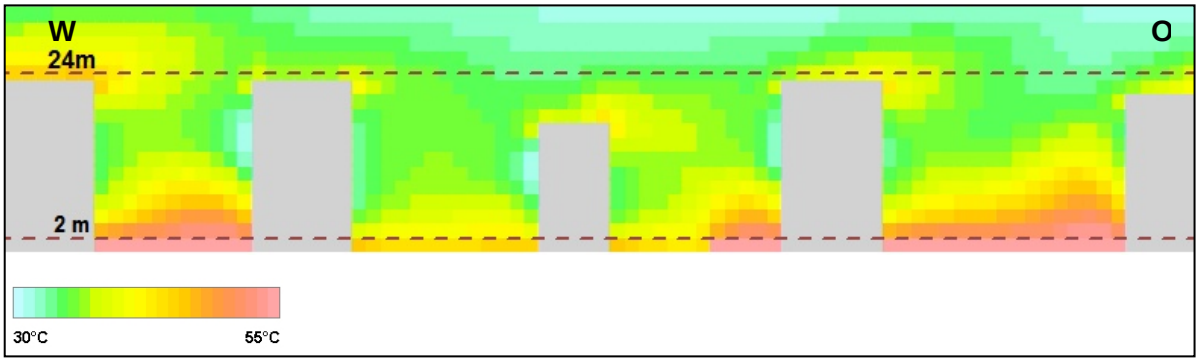


Abb. 56: West-Ost-Schnitt Szenario 4 (Dachbegrünung)

Wie bereits die Auswertungen zur mittleren Lufttemperatur zeigen auch die Differenzenabbildungen, dass die Absenkung der Lufttemperatur vor allem auf Dachniveau wirksam wird. Im Hinblick auf den Ausgangszustand betragen die Abnahmen bis zu 10°C (Abb. 57 und 58).

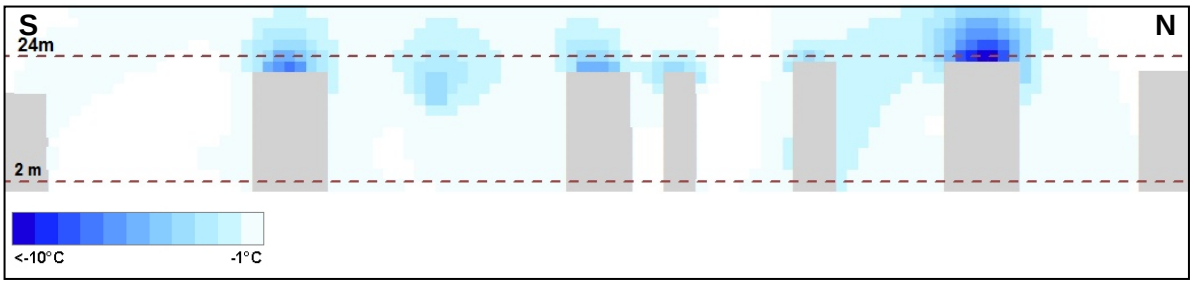


Abb. 57: Differenz Szenario 4 zur Ausgangssituation (Nord-Süd-Schnitt)

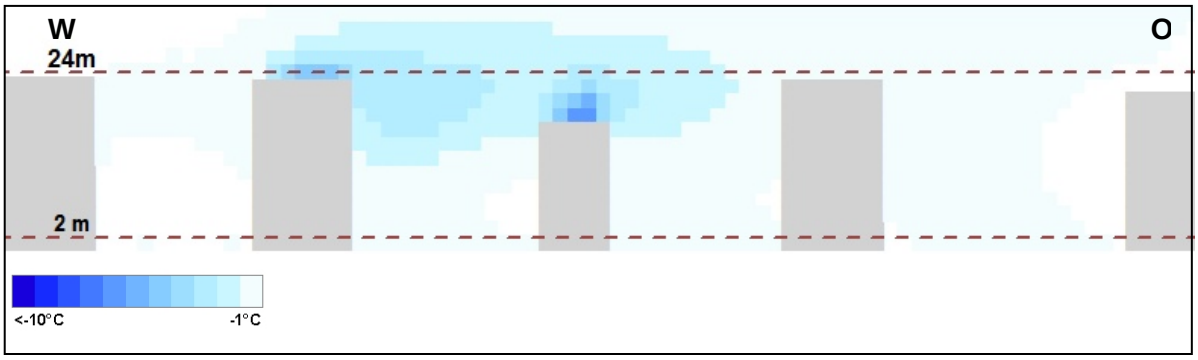


Abb. 58: Differenz Szenario 4 zur Ausgangssituation (West-Ost-Schnitt)

4.3.1.6 Szenario 5: Entsiegelung

Im Szenario 5 ist eine umfangreiche Entsiegelungsmaßnahme modelliert worden, welche sowohl die Innenhöfe als auch die öffentliche Verkehrsfläche einbezieht. Dabei wird einerseits die im Blockinnenhof existierende Versiegelung um 50% reduziert, während im Straßenraum vor allem in den Parkplatzbereichen ein teilversiegelndes Grobsteinpflaster angenommen wurde (Abb. 59 und 60).

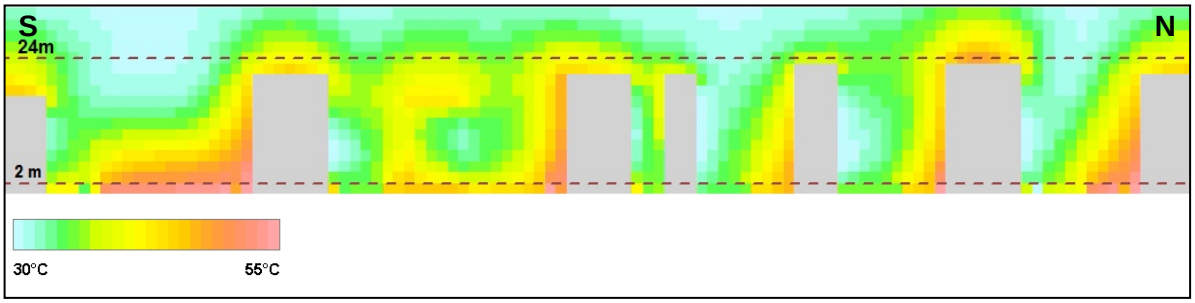


Abb. 59: Nord-Süd-Schnitt Szenario 5 (Entsiegelung)

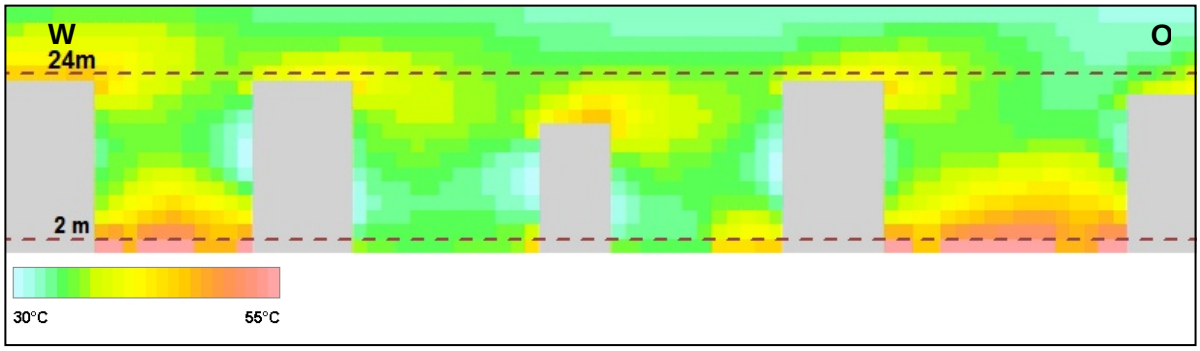


Abb. 60: West-Ost-Schnitt Szenario 5 (Entsiegelung)

Gegenüber dem Ausgangszustand zeigt sich vor allem in den Innenhöfen ein deutlich gedämpftes Temperaturniveau, wobei die bodennahen Werte bis 2 m Höhe nur noch vereinzelt im Bereich versiegelter Flächen 45°C übersteigen. Ansonsten dominieren Temperaturen zwischen 35°C in den verschatteten Bereichen und weniger als 45°C über den besonnten Arealen. Innerhalb des Straßenraums zeichnen sich die teilversiegelten Flächen mit lokal geringeren Temperaturen ab.

Die Differenzen gegenüber dem Ausgangszustand sind in den Abb. 61 und 62 dargestellt. Dabei wird vor allem in den Innenhöfen die Wirkung der Entsiegelung deutlich. Die Abnahmen der Lufttemperatur in 2 m Höhe betragen bis zu 11°C und gehen bis zum Dachniveau auf etwa 1°C bis 2°C zurück.

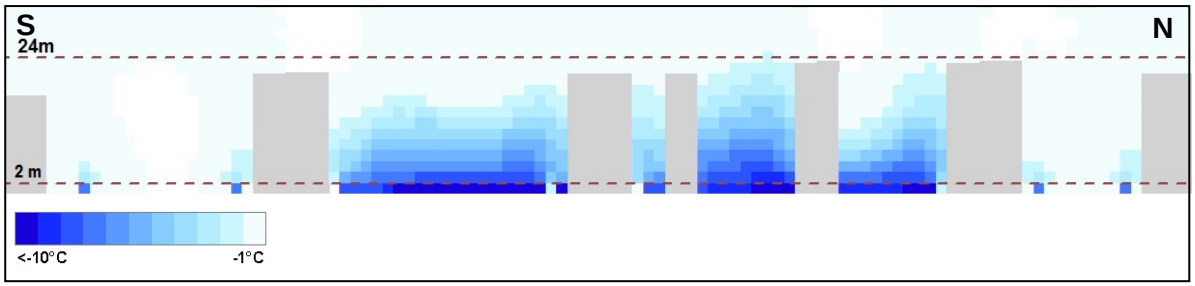


Abb. 61: Differenz Szenario 5 zur Ausgangssituation (Nord-Süd-Schnitt)

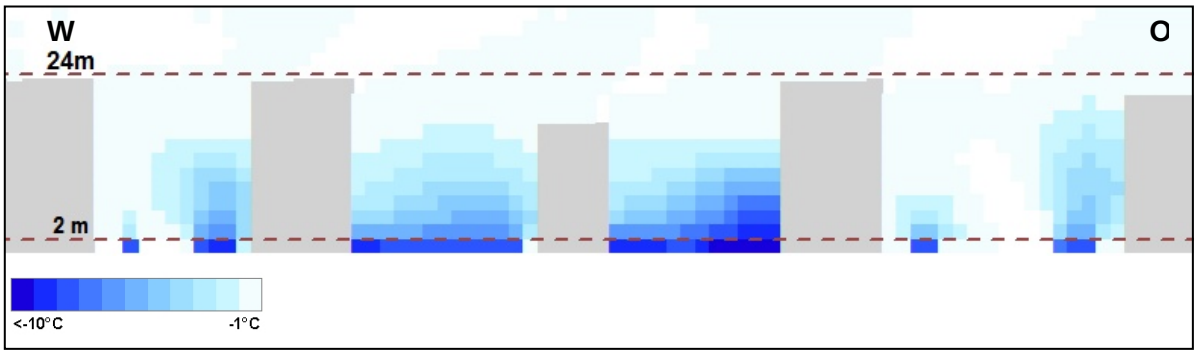


Abb. 62: Differenz Szenario 5 zur Ausgangssituation (West-Ost-Schnitt)

Die Abnahme der Lufttemperatur über den teilversiegelten Flächen innerhalb des Straßenraums ist mit 5°C bis 7°C geringer ausgeprägt als über den vollständig entsiegelten Innenhofflächen. In Abb. 62 zeigt sich aber, dass die vertikale Wirkung mit zunehmender Größe der teilversiegelten Areale ansteigt.

4.3.1.7 Szenario 6: Fassadendämmung

Dem Szenario 6 liegt eine gegenüber dem Ausgangszustand verbesserte Fassadendämmung zugrunde, welche in etwa dem KfW 40-Standard entspricht. Die zusätzliche Ausstattung mit Wärmedämmung führt zu einer herabgesetzten Wärmeleitfähigkeit der Fassaden und beeinflusst somit auch den Energieumsatz innerhalb der Bebauung. Da infolge der verbesserten Dämmung nun weniger Energie durch das Mauerwerk aufgenommen werden kann, führt dies zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur der Fassade und damit auch der angrenzenden Luftschicht. Die auftretenden maximalen Temperaturen liegen hier in einer Größenordnung von 55°C bis 60°C (Abb. 63 und 64).

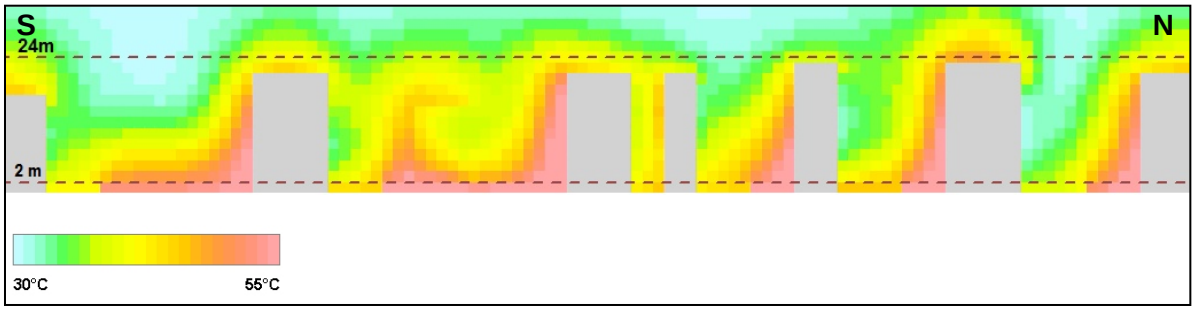


Abb. 63: Nord-Süd-Schnitt Szenario 6 (Fassadendämmung)

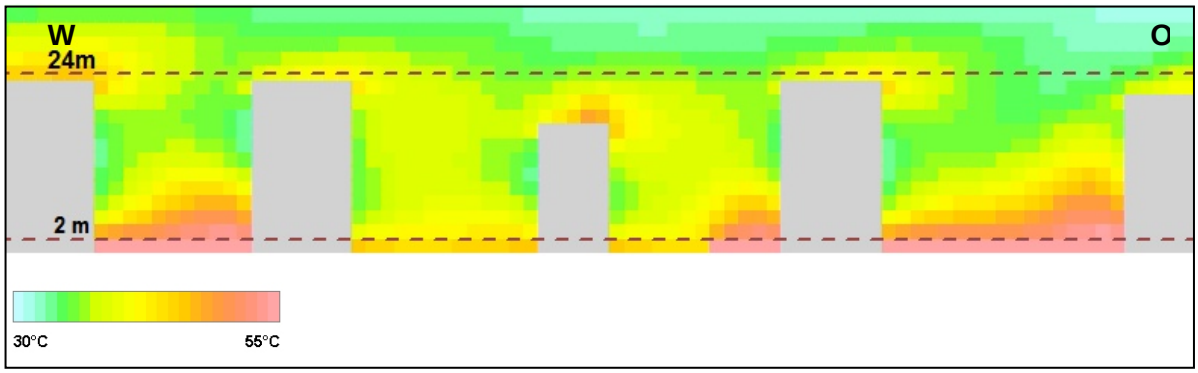


Abb. 64: West-Ost-Schnitt Szenario 6 (Fassadendämmung)

Im Bereich der südexponierten Fassaden beträgt die Temperaturzunahme damit bis zu 7°C und führt in der Summenwirkung zu einem gegenüber dem Ausgangszustand leicht erhöhtem Temperaturniveau (Abb. 65 und 66).

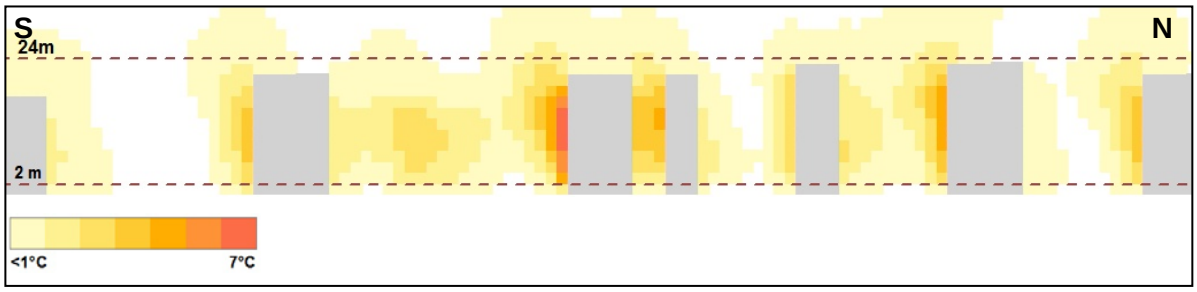


Abb. 65: Differenz Szenario 6 zur Ausgangssituation (Nord-Süd-Schnitt)

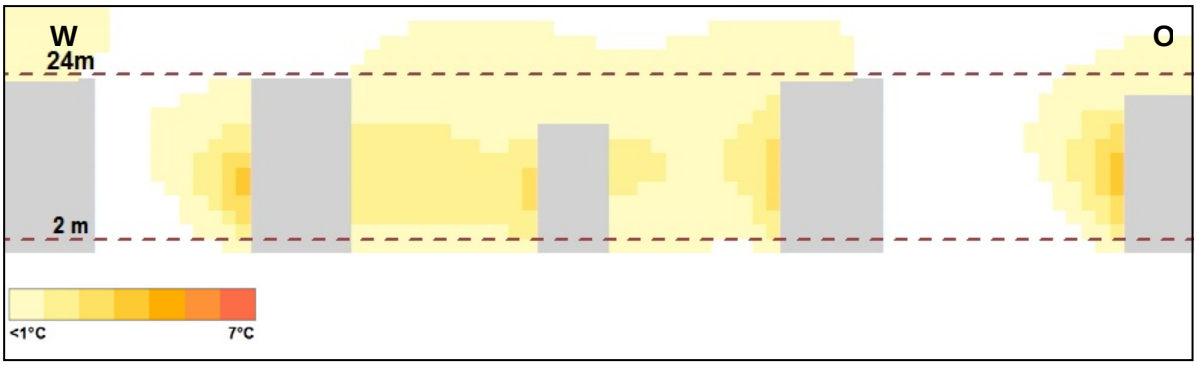


Abb. 66: Differenz Szenario 6 zur Ausgangssituation (West-Ost-Schnitt)

Wie sich bei der Auswertung der mittleren Lufttemperatur im Untersuchungsraum zeigt (vgl. Kap. 4.3.2), führt die zusätzliche Dämmung zu einer geringeren Wärmespeicherung der Baumassen, was wiederum mit geringeren nächtlichen Temperaturen gegenüber dem Ausgangszustand einher geht (vgl. Tab. 2 und 3).

4.3.1.8 Szenario 7: Summenwirkung aller Einzelmaßnahmen

Im Szenario 7 wurden die Maßnahmen 1 bis 6 zusammengefasst, welche in den vorangegangenen Modellrechnungen einzeln für sich betrachtet worden sind. Es schöpft somit den maximal möglichen Maßnahmenumfang aus. Damit ergibt sich die Möglichkeit, die Summenwirkung aller umsetzbaren Maßnahmen für den Untersuchungsraum zu ermitteln. Es zeigt sich, dass die bodennahen Temperaturen auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau verbleiben, wobei Werte von ca. 50°C nur noch lokal im direkt besonnten Straßenraum erreicht werden (Abb. 67 und 68). Im Blockinnenhof führen Entsiegelung sowie Schattenwirkung durch Bäume zu Temperaturen zwischen 30°C bis 40°C.

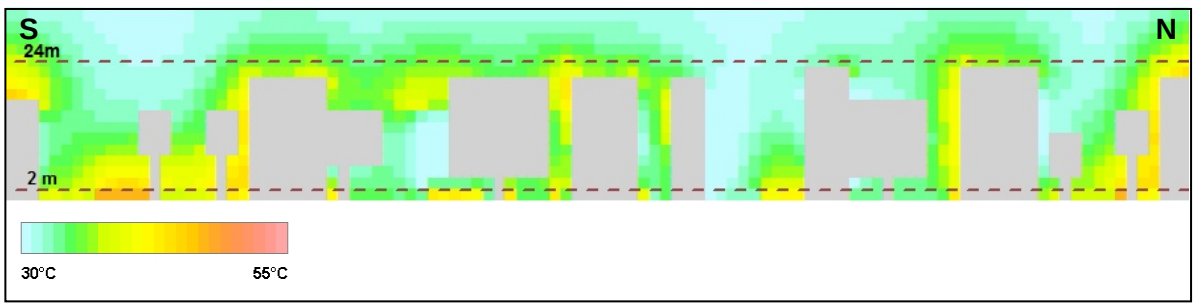


Abb. 67: Nord-Süd-Schnitt Szenario 7 (Summenwirkung aller Einzelmaßnahmen)

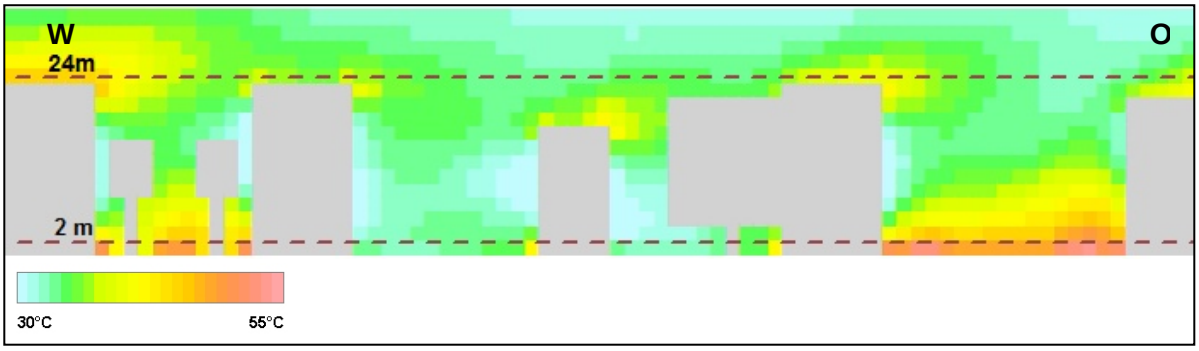


Abb. 68: West-Ost-Schnitt Szenario 7 (Summenwirkung aller Einzelmaßnahmen)

An den Fassaden sowie im Dachniveau macht sich die Wirkung von Albedoerhöhung und Dach- und Fassadenbegrünung bemerkbar, wobei Lufttemperaturen von mehr als 40°C kaum noch angetroffen werden. Lediglich an südexponierte Fassaden gehen die Werte leicht darüber hinaus.

Den Beitrag der zusammengefassten Einzelmaßnahmen auf die Absenkung der Lufttemperatur zeigen die Differenzenabbildungen (Abb. 69 und 70). Dabei wird vor allem die Reduzierung der Temperatur im Blockinnenhof deutlich, welcher im Wesentlichen auf die Schattenwirkung und Verdunstungsleistung der Bäume in Kombination mit Entsiegelungsmaßnahmen zurück zu führen ist.

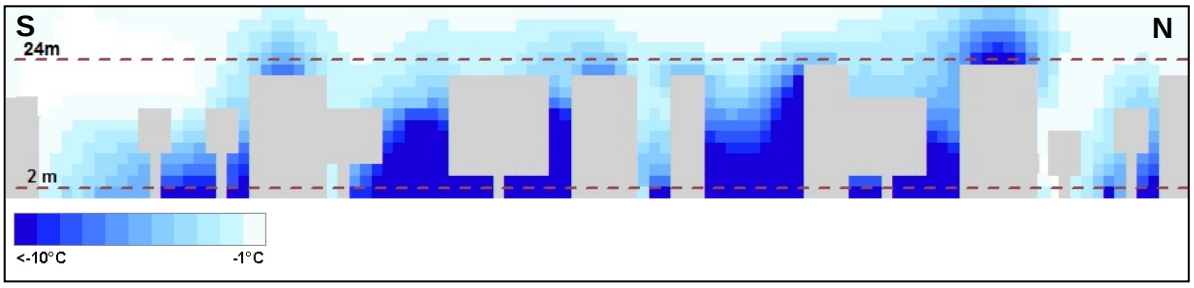


Abb. 69: Differenz Szenario 7 zur Ausgangssituation (Nord-Süd-Schnitt)

Ebenso wird im öffentlichen Straßenraum die Summenwirkung von Straßenbäumen und Entsiegelungsmaßnahmen sichtbar, wobei die Temperaturabnahmen auch hier lokal über 10°C hinausgehen.

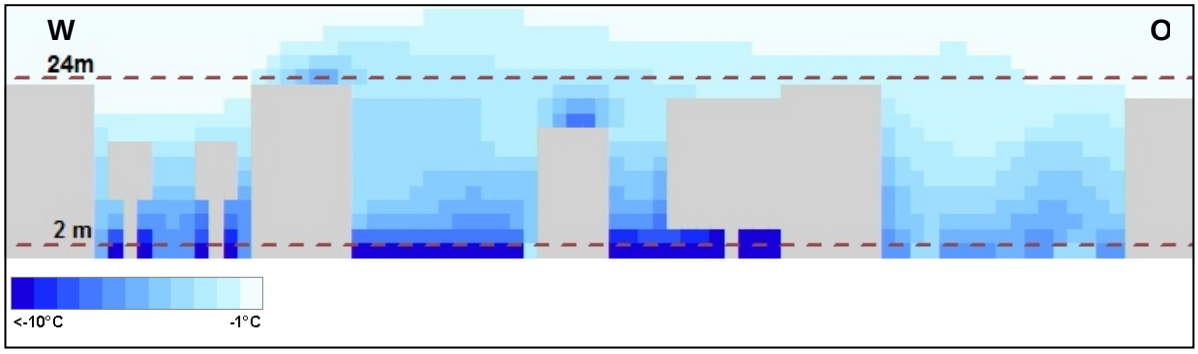


Abb. 70: Differenz Szenario 7 zur Ausgangssituation (West-Ost-Schnitt)

Die Abnahme der Temperatur ist insgesamt gesehen bodennah stärker ausgeprägt als im Dachniveau. Unmittelbar über den begrünten Dachflächen sowie im Bereich von Fassadenbegrünung beträgt der Temperaturrückgang zwischen 5°C und 11°C. In weiterer Entfernung von den begrünten Flächen beträgt die Absenkung in diesem Höhenbereich noch zwischen 1°C und 3°C.

4.3.1.9 Szenario 8: Erweiterte Fassadenbegrünung

In Ergänzung zum Szenario 3, bei dem nur die fensterlosen Giebelwände für eine Fassadenbegrünung vorgesehen waren, wird dem Szenario 8 eine erweiterte Begrünung an allen Fassaden zugrunde gelegt. Während sich die oberflächennahen Lufttemperaturen im Straßenraum gegenüber dem Ausgangszustand nur wenig verändern, ist vor allem im Bereich der südexponierten Fassaden eine markante Dämpfung der Temperatur zu beobachten. Die Werte gehen direkt über der Fassade auf bis zu 35°C zurück (Abb. 71 und 72).

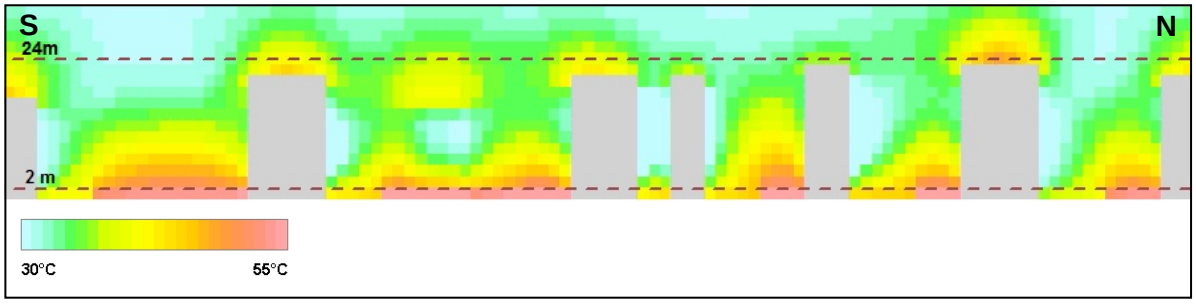


Abb. 71: Nord-Süd-Schnitt Szenario 8 (Summenwirkung aller Einzelmaßnahmen)

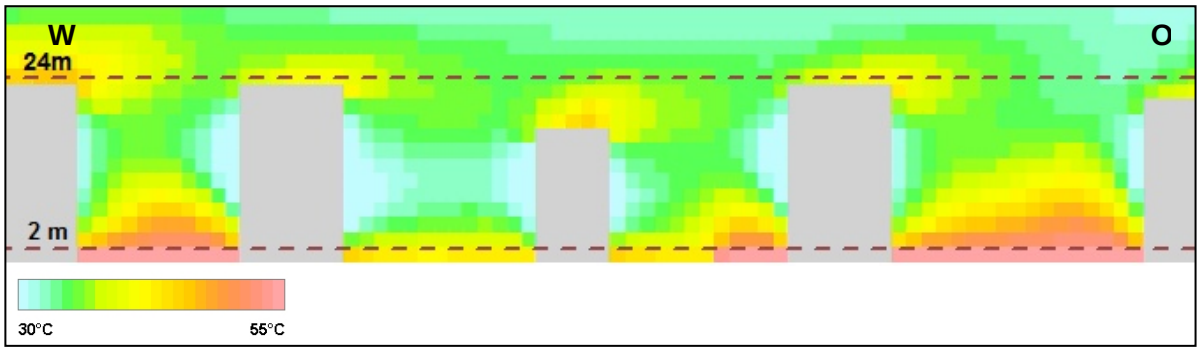


Abb. 72: West-Ost-Schnitt Szenario 8 (Erweiterte Fassadenbegrünung)

In den Differenzenabbildungen wird die Ausprägung der Temperaturabnahme noch sichtbarer. Es zeigt sich, dass der räumliche Schwerpunkt des Effekts vor allem im mittleren Höhenbereich lokalisiert ist (Abb. 73 und 74). Die Abnahmen gehen an den Südfassaden stellenweise über 10°C hinaus und sinken in einer Entfernung von 6 m bis 8 m wieder auf ca. 5°C ab. Allerdings sind die Effekte für den bodennahen Bereich bis 2 m Höhe vergleichsweise niedrig.

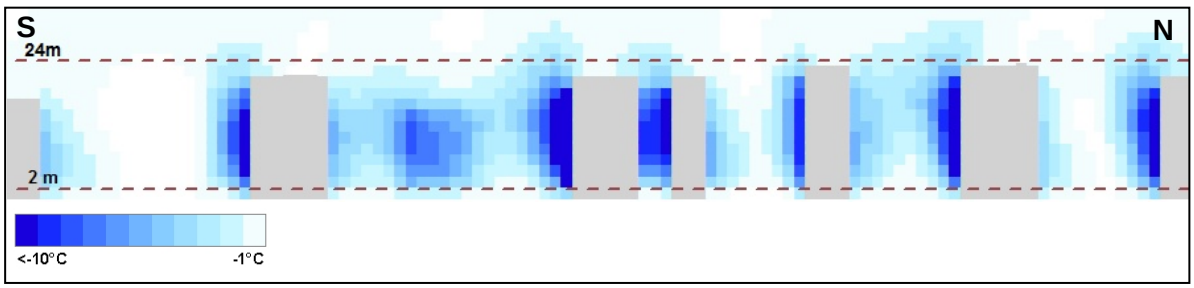


Abb. 73: Differenz Szenario 8 zur Ausgangssituation (Nord-Süd-Schnitt)

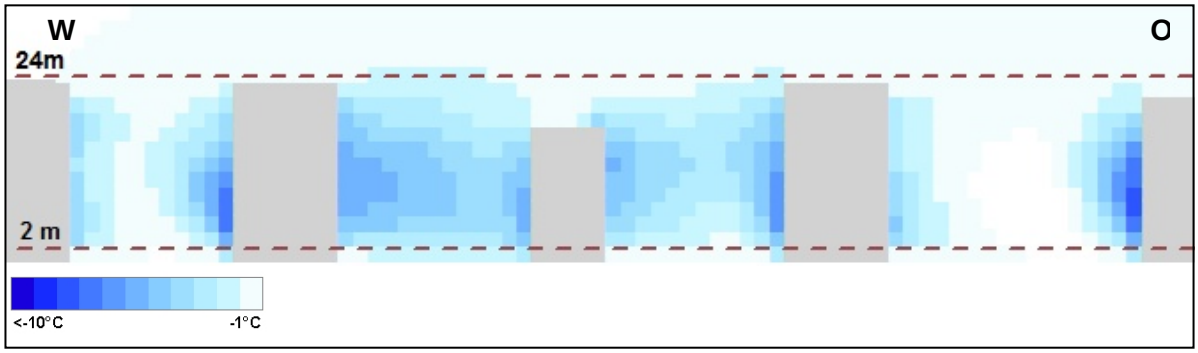


Abb. 74: Differenz Szenario 8 zur Ausgangssituation (West-Ost-Schnitt)

In Abb. 74 lässt sich beobachten, dass an den westlich bzw. östlich orientierten Fassaden die Abnahmen der Lufttemperatur geringer ausfallen. Dies ist darauf zurück zu führen, dass durch die Exposition weniger Sonnenlicht auf die Fassaden fällt, die Erwärmung deshalb niedriger ist und dadurch auch der Betrag der durch die Begrünung erbrachten Temperaturabsenkung geringer ist als bei den südexponierten Flächen.

4.3.2 Bilanzierung der mittleren Lufttemperatur

Die Gebietsmittelwerte der Lufttemperatur beziehen sich auf das Luftvolumen, welches sich über dem betrachteten Baublock sowie dem umgebenden Straßenraums befindet. Sie bilden in einer Auflösung von 2 Stunden den kompletten Tagesgang für einen Sommertag ab. Ausschlaggebend für die Temperaturverteilung im städtischen Raum sind die landnutzungsabhängigen Boden- und Oberflächeneigenschaften, sowie deren Wechselwirkungen mit den atmosphärischen Prozessen in der bodennahen Grenzschicht. Innerhalb der verschiedenen Nutzungsstrukturen sind Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von Bedeutung. Je größer beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit des Bodens oder einer Bebauung ist, umso schneller und tiefer kann Wärme am Tage in das entsprechende Material eindringen, aber in der Nacht auch wieder von diesem abgegeben werden. Ebenso hat die Beschaffenheit der Oberflächen von Gebäuden und ebenerdiger Flächen einen bedeutsamen Einfluss auf die lokale Ausprägung der Lufttemperatur. In diesem Zusammenhang spielt auch die Reflexion des Sonnenlichts (Albedo) eine wichtige Rolle. Je mehr solare Strahlung von Oberflächen reflektiert wird, desto weniger Energie wird auf den Oberflächen in Wärme umgesetzt und an die Atmosphäre abgegeben. Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Höhenniveaus z = 2 m sowie z = 24 m beschrieben.

Höhe z = 2 m

Im Ausgangszustand - einem „Worst-Case"-Szenario mit vollständiger Versiegelung - treten die niedrigsten oberflächennahen Lufttemperaturen von ca. 16°C kurz vor Sonnenaufgang gegen 6 Uhr auf (Tab. 2). Sie steigen bis zum späten Mittag auf bis zu 50°C an. Bis zum späten Abend gehen die Temperaturen dann wieder auf unter 30°C zurück und sinken gegen 2 Uhr morgens auf knapp unter 20°C ab.

Stellt man die für die jeweiligen Szenarien simulierten Ergebnisse gegenüber, lässt sich über die Abweichung zum Ausgangszustand eine Aussage über die grundsätzliche Wirksamkeit der jeweiligen Einzelmaßnahme treffen. Dabei stellen sich die *Szenarien 1* (Straßen- und Innenhofbäume) sowie *2* (Erhöhung der Albedo) als die effektivsten Maß-

nahmen zur Verringerung der Lufttemperatur dar. Die Abnahme gegenüber dem Ausgangszustand beträgt zum Zeitpunkt 16 Uhr für beide Szenarien etwa 6°C.

Im *Szenario 1* führen die Bäume im Straßenraum und in den Innenhöfen zu einer Verschattung der Oberflächen, welche sich daraufhin nicht mehr so stark erwärmen. Zusätzlich wird durch die Verdunstungswirkung der Bäume (latente) Wärme abgeführt.

Beim *Szenario 2* wird durch die Verwendung von helleren Materialien für alle Gebäude und ebenerdig versiegelter Flächen eine Erhöhung der Reflexion von Sonnenlicht um etwa 20 % angenommen. Da somit auch der Energieumsatz auf den Oberflächen insgesamt reduziert wird, führt dies zu einer entsprechend niedrigeren Lufttemperatur.

Das *Szenario 3* beinhaltet Fassadenbegrünung an ausgewählten Brandwänden, wobei eine Wuchshöhe bis zu 15 m angenommen wird. Hier führen Verschattung sowie Verdunstung zu einer Verringerung der Lufttemperatur im direkten Umfeld. Für die bodennahen Lufttemperaturen insgesamt hat die Fassadenbegrünung allerdings kaum Wohlfahrtseffekte, da sie einerseits einen vergleichsweise geringen Flächenanteil aufweist und andererseits erst in einem größeren Höhenniveau wirksam wird. Die gegenüber dem Ausgangsszenario erzielte Reduktion der Lufttemperatur fällt mit bis zu 0,1°C am Nachmittag sehr gering aus.

In einer ähnlichen Größenordnung sind die Effekte der Dachbegrünung im *Szenario 4* anzutreffen. Da sich die Wirkung von Verdunstung und verringerter Oberflächentemperatur erst im Dachniveau umfassend ausprägt, beträgt die bodennahe Temperaturabnahme lediglich 0,1°C.

Dem *Szenario 5* liegt eine Entsiegelung ebenerdiger Fläche zu Grunde, was sich in einer deutlichen Temperaturabnahme von bis zu 2,4°C zum Zeitpunkt 14 Uhr äußert. Dabei wird die existierende Versiegelung in den Hofbereichen des betrachteten Baublocks um 50% reduziert, während in Teilen des öffentlichen Straßenraums ein Grobsteinpflaster verbaut wird. Dabei handelt es sich um die Randbereiche in kleineren Straßen sowie um die zwischen den Fahrspuren größerer Straßen befindlichen Parkplätze. Die dadurch herbeigeführte geringere Erwärmung der Oberflächen ist bei einer vollständigen Entsiegelung, wie es im Rahmen dieses Szenarios in den Innenhöfen vorgesehen ist, am intensivsten. Aber auch die Verwendung von Rasengittersteinen kann, großflächig eingesetzt, eine lokale Verringerung der Lufttemperatur bewirken.

Im *Szenario 6* wird von einer gegenüber dem Ausgangszustand verbesserten Wärmedämmung der Fassaden ausgegangen, welche in etwa dem KfW 40-Standard entspricht. Die zusätzliche Dämmung bewirkt dabei eine Verringerung des Wärmestroms innerhalb der Hauswand. Da nun die Bausubstanz die am Tage erfolgende Erwärmung der Oberflächen schlechter aufnehmen und speichern kann, wird die Wärme an die Luft abgegeben.

Dies führt zu einer Erhöhung der Lufttemperatur, welche bis zu 0.5°C zum Zeitpunkt 12 Uhr beträgt. Andererseits führt die verringerte nächtliche Wärmeabgabe der Baumassen zu einer Verringerung der Lufttemperatur um bis zu 0,7°C zum Zeitpunkt 6 Uhr morgens.

Das *Szenario 7* umfasst die Szenarien 1 bis 6 und stellt somit deren Summenwirkung dar. Dies resultiert in der stärksten modellierten Temperaturabnahme in Bodennähe, welche zum Nachmittag hin etwa 7°C beträgt. Bis Sonnenaufgang ist eine gegenüber dem Istzustand leichte Temperaturzunahme von 0,3°C zu verzeichnen.

Für das *Szenario 8* wird eine Begrünung sämtlicher Fassaden simuliert, wobei der Temperaturrückgang am späten Mittag bis zu 1,6°C beträgt. In der Nachtsituation ist eine Zunahme von 0,5°C zu beobachten.

Höhe z = 24 m

Die Spannweite der im Ausgangszustand auftretenden Temperaturen ist aufgrund des Höhenniveaus und dem daraus resultierenden Abstand zu den sich am Tage erwärmenden Oberflächen etwas geringer ausgeprägt. Die höchste Lufttemperatur wird tagsüber mit 41,8°C gegen 16 Uhr erreicht, während sie bis zum frühen Morgen auf 18,5°C absinkt. Im Hinblick auf die durchgeführte Modellierung von Einzelmaßnahmen geht die Intensität der im Höhenbereich von 24 m beobachteten Temperaturveränderungen mit der Nähe zu den gegenüber dem Ausgangszustand veränderten Oberflächen einher.

So beträgt im *Szenario 1* der maximale Temperaturrückgang nur noch 2,9°C, da bis zum Höhenniveau von 24 m der Effekt von Straßen- und Hofbäumen wieder abgenommen hat.

Im *Szenario 2* (Albedoerhöhung) kann ein Rückgang von bis zu 4,2°C beobachtet werden, was für diese Höhe die stärkste Abnahme unter allen Szenarien darstellt. Dieser im Vergleich zum Szenario 1 höhere Wert ist auf den verringerten Energieumsatz an den Fassaden und Dächern der Bebauung zurück zu führen. Durch die Strukturhöhe ergibt sich zudem eine hohe wirksame Oberfläche, so dass der Effekt auch bis zu einer Höhe von 24 m anzutreffen ist.

Der Beitrag der Fassadenbegrünung im *Szenario 3* kann gegenüber dem Höhenbereich 2 m ihren Beitrag mit bis zu minus 0,2°C am Nachmittag zwar verdoppeln, verbleibt aber aufgrund des geringen Flächenanteils weiterhin auf einem geringen Niveau. Die Abnahme der Lufttemperatur im *Szenario 4* (Dachbegrünung) ist mit bis zu 0,6°C um 14 Uhr hingegen stärker ausgeprägt, da sich die wirksame Fläche horizontal auf Dachniveau und somit nahe der Bezugshöhe von 24 m befindet.

Der klimatische Beitrag einer Entsiegelung im *Szenario 5* macht sich bis zu dieser Höhe nur noch mit einem Temperaturrückgang von 1°C am Nachmittag bemerkbar, was auf den Abstand zum Boden zurück zu führen ist.

Im *Szenario 6* führt die zusätzliche Fassadendämmung zu einem Anstieg der mittleren Lufttemperatur um bis zu 0,7°C gegen 12 Uhr, während für die Nachtstunden aufgrund des herabgesetzten Wärmestroms in den Fassaden eine gewisse Verringerung um bis zu 0,4°C zu verzeichnen ist.

Die „Bündelung" der Maßnahmen 1 bis 6 für das *Szenario 7* macht sich im Dachniveau mit einem Rückgang von bis zu 3,9°C bemerkbar und liegt in der Größenordnung der Maßnahme „Albedoerhöhung" des Szenarios 2.

Der von der „erweiterten" Fassadenbegrünung ausgehende Effekt des *Szenarios 8* ist im Dachniveau nur wenig höher als im bodennahen Bereich. Aufgrund des im Gegensatz zum Szenario 3 angestiegenen Flächenanteils beträgt der Temperaturrückgang nun bis zu 1,9°C. Die Zunahme von 0,5°C am frühen Morgen ist im Dachniveau genauso ausgeprägt wie im bodennahen Bereich.

Fazit

Die durchgeführten Modellierungen zeigen, dass die betrachteten Einzelmaßnahmen recht unterschiedliche Wirkungen auf die Reduzierung der mittleren Lufttemperatur an einem Sommertag haben. Für den bodennahen Bereich bis zu einer Höhe von 2 m kann festgehalten werden, dass Maßnahmen wie zusätzliche Straßenbäume, Entsiegelung sowie eine Erhöhung der Albedo unter den gegebenen Rahmenbedingungen den stärksten Effekt aufweisen. Deren Wirkung nimmt zwar mit der Höhe ab, ist im Bereich des Dachniveaus aber trotzdem nachweis-

bar. Der klimatische Effekt von Dach- und Fassadenbegrünung auf den bodennahen Bereich kann als eher gering betrachtet werden, sofern diese nicht großflächig durchgeführt wird. Eine zusätzliche Dämmung von Fassaden kann zu einer geringen Erhöhung der Lufttemperatur am Tage führen.

Zeitschnitt	Mittlere Lufttemperatur Ausgangssituation (°C)	Differenz Szenario 1 (°C)	Differenz Szenario 2 (°C)	Differenz Szenario 3 (°C)	Differenz Szenario 4 (°C)	Differenz Szenario 5 (°C)	Differenz Szenario 6 (°C)	Differenz Szenario 7 (°C)	Differenz Szenario 8 (°C)
2:00	19.9	-0.2	-0.5	0.0	0.1	0.1	-0.3	-0.7	0.3
4:00	17.6	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	-0.3	-0.3	0.4
6:00	15.6	0.8	-0.1	0.0	0.0	0.1	-0.4	0.1	0.5
8:00	20.4	0.3	-0.5	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.1
10:00	30.6	-1.7	-2.3	0.0	-0.1	-1.1	0.2	-2.3	-0.6
12:00	42.8	-4.7	-4.7	-0.1	-0.1	-1.9	0.5	-5.7	-1.4
14:00	50.2	-5.7	-6.0	-0.1	-0.1	-2.3	0.4	-6.9	-1.6
16:00	49.3	-6.0	-6.2	-0.1	0.0	-2.0	0.3	-7.2	-1.4
18:00	44.0	-4.7	-5.7	-0.1	0.0	-1.4	0.1	-5.6	-1.1
20:00	35.4	-2.6	-4.1	0.0	0.1	-0.4	-0.1	-3.1	-0.5
22:00	27.3	-0.5	-2.2	0.0	0.1	0.0	-0.5	-1.3	0.0
24:00	21.4	0.4	-1.6	0.0	0.1	0.1	-0.6	-0.3	0.3
2:00	18.2	0.9	-1.2	0.0	0.1	0.1	-0.7	0.1	0.4
4:00	16.0	1.1	-0.9	0.0	0.1	0.1	-0.7	0.3	0.5
6:00	15.7	1.1	-0.7	0.0	0.1	0.1	-0.7	0.1	0.4
8:00	20.8	0.5	-1.1	0.0	0.0	0.0	-0.3	0.0	0.4
10:00	31.0	-1.5	-2.9	0.0	0.0	-1.1	0.1	-2.2	-0.3
12:00	43.2	-4.5	-5.4	-0.1	-0.1	-1.9	0.4	-5.5	-1.1
14:00	50.6	-5.5	-6.6	-0.1	-0.1	-2.4	0.3	-6.8	-1.3
16:00	49.6	-5.7	-6.6	-0.1	-0.1	-2.0	0.2	-7.0	-1.1
18:00	44.4	-4.5	-6.1	-0.1	0.0	-1.5	0.1	-5.5	-0.8
20:00	35.7	-2.4	-4.4	0.0	0.0	-0.4	-0.2	-3.0	-0.3
22:00	27.5	-0.4	-2.4	0.0	0.1	0.0	-0.6	-1.3	0.2
24:00	21.6	0.6	-1.8	0.0	0.1	0.1	-0.7	-0.2	0.4
02:00	18.4	1.0	-1.3	0.0	0.1	0.1	-0.7	0.2	0.5

Tab. 2: Mittlere Lufttemperatur in der Höhe z = 2 m

Ausgangssituation: vollständige Versiegelung ohne Vegetationsstrukturen

Szenario 1 - Ausgangssituation mit Straßen- und Innenhofbäumen (Bestand und Planfall kombiniert)

Szenario 2 - Ausgangssituation mit Albedoerhöhung im Straßenraum sowie an allen Fassaden und Dächern ("Griechisches Dorf")

Szenario 3 - Ausgangssituation mit Fassadenbegrünung

Szenario 4 - Ausgangssituation mit Dachbegrünung

Szenario 5 - Entsiegelung im Innenhof sowie in Teilbereichen der öffentlichen Verkehrsfläche

Szenario 6 - Zusätzliche Dämmung der Fassaden

Szenario 7 - Summenwirkung aller Einzelmaßnahmen

Szenario 8 - Erweiterte Fassadenbegrünung

Zeitschnitt	Mittlere Lufttemperatur Ausgangssituation (°C)	Differenz Szenario 1 (°C)	Differenz Szenario 2 (°C)	Differenz Szenario 3 (°C)	Differenz Szenario 4 (°C)	Differenz Szenario 5 (°C)	Differenz Szenario 6 (°C)	Differenz Szenario 7 (°C)	Differenz Szenario 8 (°C)
2:00	21.6	-0.1	-0.3	0.0	0.4	0.0	-0.2	-0.1	0.1
4:00	19.9	0.1	0.0	0.0	0.4	0.0	-0.2	0.1	0.3
6:00	18.5	0.2	-0.1	0.0	0.4	0.0	-0.2	0.2	0.3
8:00	23.6	0.1	-0.6	0.0	0.1	0.0	0.2	-0.1	-0.3
10:00	31.1	-0.6	-1.6	0.0	-0.2	-0.3	0.5	-1.0	-1.0
12:00	38.0	-1.8	-3.0	-0.1	-0.5	-0.6	0.7	-2.6	-1.7
14:00	41.6	-2.6	-3.8	-0.2	-0.6	-0.9	0.5	-3.5	-1.7
16:00	41.8	-2.9	-4.0	-0.2	-0.5	-0.9	0.5	-3.9	-1.9
18:00	38.6	-2.2	-3.4	-0.2	-0.2	-0.6	0.2	-3.0	-1.4
20:00	33.2	-1.1	-2.1	-0.1	0.2	-0.1	-0.1	-1.5	-0.7
22:00	28.0	-0.2	-0.7	0.0	0.5	0.0	-0.4	-0.4	-0.1
24:00	24.0	0.1	-0.4	0.0	0.5	0.0	-0.4	0.0	0.2
2:00	21.6	0.2	-0.3	0.0	0.5	0.0	-0.4	0.2	0.4
4:00	19.7	0.3	-0.3	0.0	0.5	0.0	-0.4	0.2	0.5
6:00	18.7	0.3	-0.3	0.0	0.5	0.0	-0.4	0.2	0.4
8:00	23.8	0.1	-0.8	0.0	0.1	0.0	0.1	-0.1	-0.1
10:00	31.4	-0.5	-1.9	0.0	-0.1	-0.3	0.4	-1.0	-0.8
12:00	38.3	-1.7	-3.3	-0.1	-0.4	-0.6	0.6	-2.6	-1.5
14:00	41.8	-2.5	-4.0	-0.2	-0.5	-1.0	0.4	-3.5	-1.5
16:00	42.0	-2.8	-4.2	-0.2	-0.4	-0.9	0.4	-3.9	-1.6
18:00	38.8	-2.1	-3.6	-0.1	-0.2	-0.6	0.1	-2.9	-1.2
20:00	33.4	-1.0	-2.2	-0.1	0.2	-0.1	-0.1	-1.4	-0.5
22:00	28.1	-0.1	-0.8	0.0	0.5	0.0	-0.4	-0.3	0.1
24:00	24.2	0.1	-0.5	0.0	0.6	0.0	-0.5	0.0	0.4
02:00	21.7	0.3	-0.4	0.0	0.6	0.0	-0.5	0.2	0.5

Tab. 3: Mittlere Lufttemperatur in der Höhe z = 24 m

Ausgangssituation: vollständige Versiegelung ohne Vegetationsstrukturen

Szenario 1 - Ausgangssituation mit Straßen- und Innenhofbäumen (Bestand und Planfall kombiniert)

Szenario 2 - Ausgangssituation mit Albedoerhöhung im Straßenraum sowie an allen Fassaden und Dächern ("Griechisches Dorf")

Szenario 3 - Ausgangssituation mit Fassadenbegrünung

Szenario 4 - Ausgangssituation mit Dachbegrünung

Szenario 5 - Entsiegelung im Innenhof sowie in Teilbereichen der öffentlichen Verkehrsfläche

Szenario 6 - Zusätzliche Dämmung der Fassaden

Szenario 7 - Summenwirkung aller Einzelmaßnahmen

Szenario 8 - Erweiterte Fassadenbegrünung

5. Literatur

EICHHORN, J. (1995): Validierung eines Prognosemodells zur Vorhersage Kfz-bedingter Schadstoffimmissionen. Annal. Meteorol. 31, 339-340

FANGER, P.O. (1972): Thermal comfort. Analysis and applications in environment engineering. New York, 244 S.

GEO-NET (2009): Aktualisierung der gesamtstädtischen Klimaanalyse Berlin auf Basis einer GIS-gestützten Modellierung von stadtklimatisch und lufthygienisch relevanten Kenngrößen mit dem 3D-Klimamodell FITNAH

GROSS, G. (1989): Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. Beitr. Phys. Atmosph. , H 62 , S. 57-72.

GROSS, G. (1993): Numerical Simulation of canopy flows. Springer Verlag Heidelberg

GROSS, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model. Meteor. Z.schr. Vol. 11 Nr. 5., S. 701-710.

KIESE, O. (1988): Die Bedeutung verschiedenartiger Freiflächen für die Kaltluftproduktion und die Frischluftversorgung von Städten. Landschaft + Stadt 20, H. 2: 67-71

MAYER & MATZARAKIS (1992): Stadtklimarelevante Luftströmungen im Münchner Stadtgebiet. – Forschungsvorhaben Stadtluft, Abschlussbericht, Lehrstuhl für Bioklimatologie u. Meteorologie Univ. München. 96 S.

MOSIMANN, Th., P. TRUTE & Th. FREY (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99, S. 202-275.

RÖCKLE, R. und C.-J. RICHTER (1995): Ermittlung des Strömungs- und Konzentrationsfeldes im Nahfeld typischer Gebäudekonfigurationen - Modellrechnungen. PEF-Bericht 136, Forschungszentrum Karlsruhe

RODI, W. (1980): Turbulence models and their application in hydraulics. IAHR Section on Fundamentals of Division II: Experimental an mathematical fluid dynamics, Delft

SCHÄDLER, G. et al. (1996): Vergleich und Bewertung derzeit verfügbarer mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle. PEF Bericht 138, Forschungszentrum Karlsruhe.

SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin) (Hrsg.) 2008a: Umweltatlas Berlin, Ausgabe 2008, Karte 07.05 Strategische Lärmkarten, 1:50 000, Berlin.

SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin) (Hrsg.) 2008b: Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2008, Karte 06.01 Reale Nutzung der bebauten Flächen und 06.02 Grün- und Freiflächenbestand, 1:50 000, Berlin.

SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin) (Hrsg.) 2008c: Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2008, Karte 06.07 Stadtstruktur, 1:50 000, Berlin.

SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin) (Hrsg.) 2007: Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2007, Karte 01.02 Versiegelung, 1:50 000, Berlin.

SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin) (Hrsg.) 2008a: Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2008, Karte 03.11 Verkehrsbedingte Luftbelastung durch NO2 und PM10, 1:50 000, Berlin.

ULRICH, W. (1987): Simulationen von thermisch induzierten Winden und Überströmungssituationen. Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München Nr. 57

VDI Verein Deutscher Ingenieure (2008): Richtlinie VDI 3785, Blatt1, Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima, Düsseldorf.

ZMARSLY, E. et al. (1999): Meteorologisch-klimatologisches Grundwissen. Ulmer Verlag Stuttgart.