

DWD

**Berlin im Klimawandel -
Eine Untersuchung zum Bioklima**

**Eine Kooperation mit der
Senatsverwaltung für Stadtentwicklung von Berlin**

Deutscher Wetterdienst

Abteilung

Klima- und Umweltberatung

Potsdam, April 2010

DEUTSCHER WETTERDIENST

Abteilung Klima- und Umweltberatung

Berlin im Klimawandel – Eine Untersuchung zum Bioklima

**Eine Kooperation mit der
Senatsverwaltung für Stadtentwicklung von Berlin**

Abteilung Geoinformation
Informationssystem Stadt und Umwelt
Fehrbelliner Platz 1
10707 Berlin

Bearbeitung:

Ursel Behrens
Angelika Grätz

Wissenschaftliche Mitwirkung:

Dr. Thomas Deutschländer
Dr. Barbara Früh
Dr. Meinolf Koßmann
Marita Roos
Dr. Uwe Wienert

Potsdam, den *19.04.2010*

Freiburg, den *14.04.2010*

Behrens

Dipl.-Met. Ursel Behrens
Leiterin Regionale Klima- und
Umweltberatung Potsdam

Angelika Grätz

Dipl.-Met. Angelika Grätz
Zentrum für Medizin-Meteorologische
Forschung Freiburg

INHALT		Seite
Zusammenfassung		7
1	Einführung	9
2	Auswertung klimatologischer Zeitreihen	9
3	Analyse des Bioklimas mit dem Stadtbioklimamodell UBIKLIM	12
3.1	Das Stadtbioklimamodell UBIKLIM	12
3.2	Erweiterung von UBIKLIM zum Kombinierten Stadtbioklimamodell	14
4	Das Bioklima von Berlin mit Umland	16
4.1	Untersuchungsgebiet	16
4.2	Aufbereitung der Flächennutzungsinformation	16
4.3	Anwendung des Stadtbioklimamodells UBIKLIM	20
4.4	Anwendung des Kombinierten Stadtbioklimamodells auf Berlin	22
5	Projektion des Bioklimas für Zeiträume des Klimawandels	24
5.1	Klimamodellierung	24
5.2	Downscaling regionaler Klimaprojektionen mit dem Kombinierten Stadtbioklimamodell	24
5.3	Projektionsergebnisse ohne Nutzungsänderungen	28
5.4	Projektionsergebnisse mit Nutzungsänderungen	31
6	Schlussbemerkungen	34
7	Literatur	35
8	Abkürzungsverzeichnis	37
9	Internetquellen	37
10	Ansprechpartner	38

ABBILDUNGEN

- Abbildung 1:** Jahresmittel der Lufttemperatur an der Station Berlin-Tempelhof (1949-2008) 10
- Abbildung 2:** Mittleres Tagesminimum der Lufttemperatur, Berlin (1999-2008) 11
- Abbildung 3:** Schematischer Aufbau des Stadtbioklimamodells UBIKLIM (TT: Lufttemperatur, ff: Windgeschwindigkeit, e: Feuchte, Ql: langwellige Strahlungsflüsse, Qk: kurzwellige Strahlungsflüsse, T_{mrt} : mittlere Strahlungstemperatur des Menschen, Werte für 1 m über Grund) 14
- Abbildung 4:** 90%-Konfidenzintervalle für die Tage mit Wärmebelastung im Zeitraum 1971 – 2000 (10385: Station Schönefeld, C20R: Kontrolllauf REMO, C7100W: Kontrolllauf WETTREG) 27
- Abbildung 5:** 90%-Konfidenzintervalle für die Tage mit Wärmebelastung im Kontrollzeitraum 1971 – 2000 (10385: Station Schönefeld, C20R: REMO, C7100W: WETTREG) und in den Projektionszeiträumen 2021 – 2050 (A1B2150R: REMO, P2150W: WETTREG), 2071 – 2100 (A1B7100R: REMO, P7100W: WETTREG) 28

KARTEN

Karte 1	Lage der verwendeten Stationen	10
Karte 2	Im Modell genutztes Straßennetz von Berlin und Umland -, blau: eliminierte Straßenzüge, rot: verbleibendes Hauptstraßennetz in der Kartengrundlage	19
Karte 3	Flächennutzungstypisierung für Berlin und Umland	19
Karte 4	Projektgebiete (ab 1ha) mit gesamtstädtischem Veränderungspotenzial	20
Karte 5	Gefühlte Temperatur in °C an einem windschwachen, wolkenlosen Sommertag nachmittags in Berlin und Umland	21
Karte 6	Jahresmittel der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung für den Bezugszeitraum 1971 – 2000 für Berlin und Umland	23
Karte 7a, b	Änderung der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung (Jahresmittel) des Projektionszeitraums 2021 – 2050 gegenüber dem Kontrolllauf 1971 – 2000 mit REMO-Antrieb (a), WETTREG-Antrieb (b)	29
Karte 8a, b	Änderung der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung (Jahresmittel) des Projektionszeitraums 2071 – 2100 gegenüber dem Kontrolllauf 1971 – 2000 mit REMO-Antrieb (a), WETTREG-Antrieb (b)	30
Karte 9	Änderung der Gefühlten Temperatur an einem windschwachen, wolkenlosen Sommertag nachmittags durch Umnutzung aller Flächen mit Veränderungspotenzialen	31
Karte 10a,b	Änderung der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung (Jahresmittel) durch die Umnutzung aller Projektgebiete mit gesamtstädtischem Veränderungspotenzial für den Projektionszeitraum 2021 – 2050 mit REMO-Antrieb (a), WETTREG-Antrieb (b)	32
Karte 11a, b	Änderung der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung (Jahresmittel) durch die Umnutzung aller Projektgebiete mit gesamtstädtischem Veränderungspotenzial und den globalen Klimawandel für den Projektionszeitraum 2021 – 2050 gegenüber dem Kontrollzeitraum 1971 – 2000 mit REMO-Antrieb (a), WETTREG-Antrieb (b)	33

TABELLEN

Tabelle 1: Mittlere Anzahl der Tropennächte	12
Tabelle 2: Beziehung zwischen Gefühlter Temperatur, Thermischem Empfinden und Belastungsstufen	13
Tabelle 3: Bei der Modellierung verwendete Zuordnung von Stadtstrukturtypen und Bebauungsparametern (a: Versiegelungsgrad in %, b: Zahl der Gebäude/100000 m ² , c: Gebäudehöhe in m, d: überbauter Flächenanteil in %, e: Durchgrünung - n: nicht durchgrünt, m: mäßig durchgrünt, p: parkartig durchgrünt)	17
Tabelle 4: Vergleich der mit UBIKLIM berechneten Gefühlten Temperaturen (GT_{UBIKLIM}) mit den Mittelwerten der Gefühlten Temperatur aus 12 sommerlichen Strahlungstagen (GT_{Station}) an fünf Berliner Stationen	22
Tabelle 5: Vergleich der mit UBIKLIM berechneten Tage mit Wärmebelastung (WB_{UBIKLIM}) mit der aus den Stationsdaten berechneten Zahl der Tage mit Wärmebelastung (WB_{Station}) an vier Berliner Stationen (Bezugszeitraum 1971 – 2000)	24
Tabelle 6: Anzahl der Tage mit Wärmebelastung (WB) und prozentualer Anteil (strant) an Strahlungstagen als Jahresmittelwert des Zeitraums 1971 – 2000 aus den Messdaten der Station Schönefeld (10385), sowie den entsprechenden Zeitreihen von REMO und WETTREG	26
Tabelle 7: Anzahl der Tage mit Wärmebelastung (WB) und prozentualer Anteil (strant) an Strahlungstagen als Jahresmittelwert des Kontrollzeitraums 1971 – 2000, errechnet anhand der Zeitreihen von REMO und WETTREG mit Bias-Korrektur	26
Tabelle 8: Anzahl der Tage mit Wärmebelastung (WB) und prozentualer Anteil (strant) an Strahlungstagen als Jahresmittelwert der Projektionszeiträume 2021 – 2050 und 2071 – 2100, errechnet anhand der Zeitreihen von REMO und WETTREG mit Bias-Korrektur	27

Zusammenfassung

Wärmeinseleffekt und fortdauernde Klimaerwärmung legen nahe, dass in großen Städten die thermischen Bedingungen insbesondere im Sommerhalbjahr zunehmend belastender und folglich bei Stadtplanungsfragen an Bedeutung gewinnen werden. In diesem Zusammenhang ist die Kooperationsvereinbarung zwischen der Stadtentwicklungsverwaltung von Berlin und dem Deutschen Wetterdienst zu sehen, die sich das Ziel gesetzt hat, die räumliche Struktur und die Häufigkeit künftiger gesundheitlich relevanter Wärmebelastung zu bestimmen und für Berlin kleinräumig auszuprägen.

Realisieren ließ sich das mit der Erweiterung des Stadtbioklimamodells UBIKLIM. Zusammen mit den Flächennutzungsdaten des Informationssystems Stadt und Umland der Senatsverwaltung von Berlin als Eingabedaten konnten detaillierte Bioklimakarten von Berlin und Umland berechnet werden. Diese berücksichtigen sowohl die lokale, im Wesentlichen durch die Flächennutzung bestimmte Ausprägung als auch die regional übergreifenden klimatischen Bedingungen (Hintergrundbelastung) sowohl für den durch Messungen belegten aktuellen Zeitraum als auch für künftige Zeiträume in der Mitte und am Ende des 21. Jahrhunderts. Für letztere wurden die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle REMO und WETTREG herangezogen. Die Auswertungen ergaben, dass die aus den Kontrollläufen beider Modelle abgeleitete Hintergrundbelastung die beobachtete gut widerspiegelt. Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts wird ein leichter, aber signifikanter, bis zum Ende des Jahrhunderts eine markanter Anstieg der Hintergrundbelastung erwartet.

Um die Bedeutung der Aussagen für den Menschen zu unterstreichen, wurden Tage untersucht und dargestellt, die (angenähert) eine Hitzewarnung auslösen würden.

Die aktuelle Bioklimakarte zeigt, dass die Berliner Innenstadt etwa doppelt so häufig belastet ist wie die unbebaute Umgebung. Da aber die innerstädtischen Parkanlagen das innerstädtische Belastungsgefüge aufbrechen, findet man hier bei warnwürdigen Bedingungen in der umliegenden Bebauung oftmals noch vergleichsweise angenehme thermische Bedingungen vor.

Um Aussagen über die künftigen bioklimatischen Verhältnisse zu gewinnen, wurde UBIKLIM mit Ergebnissen der Regionalmodelle REMO und WETTREG angetrieben. Die Unterschiede zwischen beiden Modellanwendungen sind gering.

Es zeigt sich dass die thermische Belastung allgemein zunimmt. Dabei intensiviert sich die Wärmebelastung in den heute schon am häufigsten betroffenen Arealen der Innenstadt am stärksten. Hier werden bis zum Ende des 21. Jahrhunderts die Hälfte der Tage in den Sommermonaten wärmebelastet sein, im Umland und auch in den innerstädtischen mit Schatten spendenden Bäumen begrüntem Parkanlagen nicht ganz ein Drittel.

Die zusätzliche Berücksichtigung von potenziellen städtebaulichen Veränderungen unterstreicht die Bedeutung der Parkanlagen für das Bioklima erneut. So zeigt sich, dass es in der Mitte des Jahrhunderts hier nur geringfügig zu einem Mehr an Belastungstagen kommt und dort, wo Freiflächen mit Bäumen durchgrünt werden, sich die Situation sogar entspannter als heute darstellt.

Kommt es dagegen zu einer starken Versiegelung und Bebauung, wird der Mensch deutlich stärker belastet sein als heute und auch stärker als nur durch den Klimawandel bedingt.

Das bedeutet, dass innerstädtische Parkanlagen, die reichlich Schatten bieten, im Laufe dieses Jahrhunderts als Ausgleichsflächen für die zunehmend stärker belasteten versiegelten und bebauten Areale weiter an Bedeutung gewinnen werden.

1 Einführung

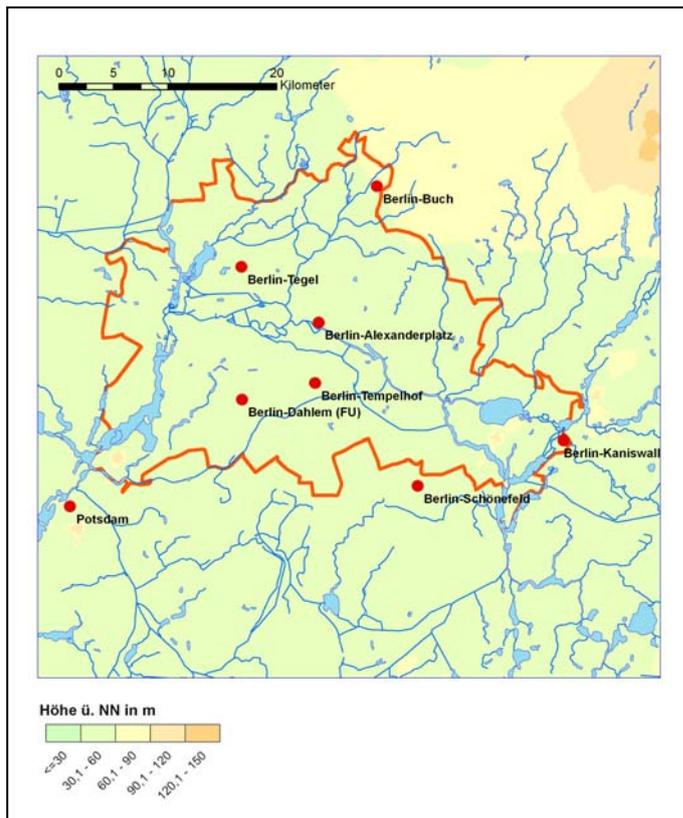
Anfang 2008 wurde eine Kooperationsvereinbarung zwischen der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Abteilung ‚Geoinformation‘ Referat Informationssystem Stadt und Umwelt und dem Deutschen Wetterdienst (DWD), Abteilung ‚Klima- und Umweltberatung‘ unterzeichnet. Ziel ist es die räumliche Struktur und die Häufigkeit künftiger gesundheitlich relevanter Wärmebelastung im Stadtgebiet von Berlin auf der Grundlage der Nutzungsdaten des Informationssystems Stadt und Umwelt (ISU) der Senatsverwaltung zu bestimmen und kleinräumig auszuprägen. Damit sollen die Effekte des Klimawandels und die des urbanen Wärmeinseleffekts zusammengefasst und gemeinsam ausgewertet werden.

Die Betrachtung von Auswertungen klimatologischer Zeitreihen von Berliner Stadt- und Umlandstationen spiegeln thermische Veränderungen der letzten Jahrzehnte bis heute wider und liefern auch deutliche Hinweise für die positive Temperaturanomalie der Stadt gegenüber dem Umland. Im Mittelpunkt der Kooperation steht daher, ein Verfahren aufzuzeigen, das für Zeiträume des Klimawandels stadtplanungsrelevante Hinweise bereitstellt, - auch unter der Voraussetzung stadtplanerischer Veränderungen. Diese müssen eine Bewertung des Klimawandels für die verschiedensten Stadtstrukturen beinhalten.

Realisieren lässt sich dieser Anspruch über ein Downscaling regionaler Klimaprojektionen unter Verwendung und Fortentwicklung des Stadtbioklimamodells UBIKLIM. Die Anwendung von Bioklimamodellen im Rahmen von Planungsfragen birgt dabei den großen Vorteil, dass die Ergebnisse immer eine Bewertung in Bezug auf das Wohlbefinden des Menschen beinhalten.

2 Auswertung klimatologischer Zeitreihen

Berlin ist mit 3,38 Millionen Einwohnern und rund 890 km² die bevölkerungsreichste und flächengrößte Stadt der Bundesrepublik Deutschland. Wie sich diese Situation im Mittel über ein Jahr bzw. bei extremen Wetterlagen auf die Wärmebelastung auswirkt, zeigen Auswertungen charakteristischer Parameter der Lufttemperatur an verschiedenen Standorten mit unterschiedlichem Stadteinfluss.



Karte 1 Lage der verwendeten Stationen

Karte 1 zeigt die Lage der verwendeten Stationen. Berlin-Tegel und Berlin-Tempelhof. In beiden Fällen repräsentieren sie als Stationen auf einem Flughafengelände inmitten Berlins eine Stadtlage mit relativ offener Bebauung. Durch dichte Bebauung und einen in hohem Maße versiegelten Innenstadtbereich wird der Standort der Station Berlin-Alexanderplatz geprägt. Die weiteren Stationen zeichnen sich durch Merkmale einer Stadtrandlage aus.

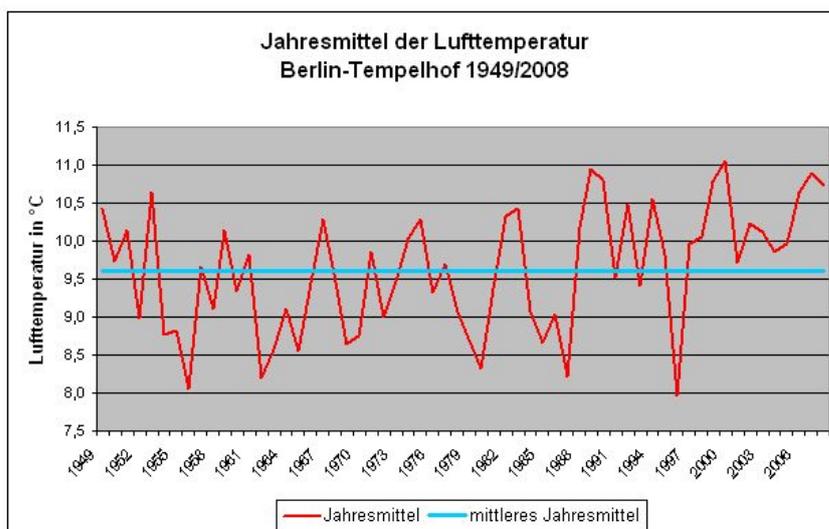


Abbildung 1: Jahresmittel der Lufttemperatur an der Station Berlin-Tempelhof (1949-2008)

Abbildung 1 zeigt den Verlauf der Lufttemperatur an der Station Tempelhof 1949-2008. Deutlich erkennbar ist der positive Trend insbesondere der letzten 20 Jahre. Nach einem noch mal kalten

Jahr 1996, lagen seither alle Jahresmittel der Lufttemperatur über dem langjährigen Jahresmittelwert von 9,6 °C. Das wärmste Jahr der gesamten Beobachtungsreihe war das Jahr 2000 mit 11,1 °C.

Die zunehmende Erwärmung betrifft den gesamten Ballungsraum, jedoch ist die Wärmebelastung in den einzelnen Stadtteilen von Berlin sehr unterschiedlich.

Ein gutes Indiz für die Wärmebelastung liefern Tagesminima. Sie zeigen an, inwieweit sich insbesondere an heißen Sommertagen eine nächtliche Abkühlung einstellen kann (siehe Abbildung 2). Dabei sind jeweils die Stationen Berlin-Tegel und Berlin Tempelhof zum Typ „Stadtgebiet, offene Bebauung“, die Stationen Berlin-Dahlem, Berlin-Schönefeld, Berlin-Kaniswall, Berlin-Buch und Potsdam zu „Stadttrand“ zusammengefasst. Die Station Berlin-Alexanderplatz spiegelt die Verhältnisse im „Stadtzentrum“ wider.

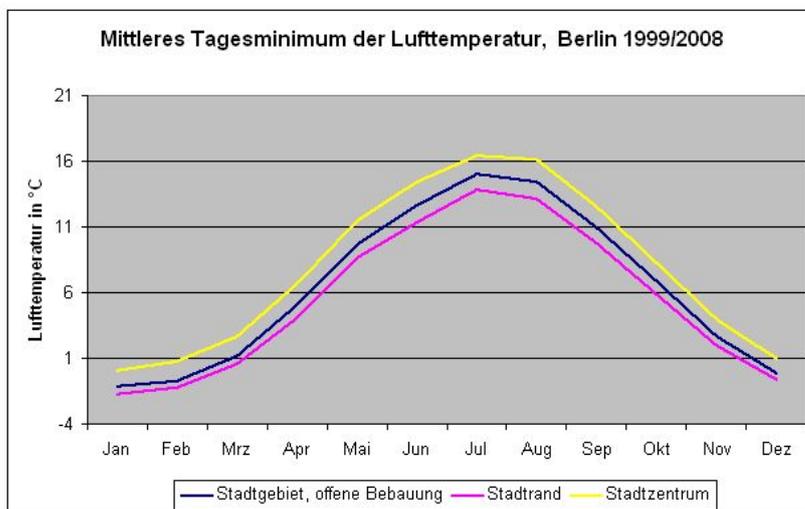


Abbildung 2: Mittleres Tagesminimum der Lufttemperatur, Berlin (1999-2008)

Im Mittel über ein Jahr betrachtet, ist die Innenstadt generell durch höhere Minima charakterisiert als die Umgebung. Was im Winter eher als angenehm empfunden wird, wird im Sommer zur Belastung. In den Monaten Juni bis August liegen die Minima im Citybereich im Monatsmittel um 2,7 bis 3,1 Kelvin höher als in den Außenbereichen, in innerstädtischen offenen Gebieten beträgt die Differenz zum Stadtkern immerhin noch ca. 1,2 Kelvin im Monatsmittel. Diese Unterschiede können an sommerlichen Strahlungstagen noch beträchtlich ansteigen.

Das Auftreten von Tropennächten ist in Deutschland ein seltenes Ereignis. Im Folgenden wird an der Anzahl der Tropennächte (Temperaturminimum ≥ 20 °C) die Zunahme des Wärmeinseleffektes mit Vordringen in den unmittelbaren Stadtkernbereich von Berlin deutlich. Die unterschiedlichen Zeiträume liefern darüber hinaus Angaben über die Zunahme der Wärmebelastung insbesondere in der überhitzten Innenstadt. Tabelle 1 zeigt im Zeitraum 1999-2008 gegenüber dem Zeitraum 1967-1990 eine mittlere Zunahme um 5 Tropennächte in der Innenstadt, in offen bebautem Stadtgebiet um 0,2 und am Stadtrand eine geringfügige Abnahme um 0,1.

Tabelle 1: Mittlere Anzahl der Tropennächte

		Stadtrand	Stadtgebiet	Stadtzentrum
		Schönefeld	Tempelhof	Alexanderplatz
a	1967-1990	0,2	1,0	2,1
b	1981-2000	0,2	1,5	3,6
c	1993-2007	0,1	1,5	4,7
d	1999-2008	0,1	1,2	7,1
e	2003	-	3,0	10,0
	Differenz b- a	0,0	0,5	1,5
	Differenz c- a	0,0	0,5	2,6
	Differenz d- a	-0,1	0,2	5,0

Extreme Hitzeperioden – wie während des Sommers 2003 – führen zu extremer Wärmebelastung in dicht bebauten Stadtgebieten. An der Station Alexanderplatz wurden 10 Tropennächte registriert, noch 3 in offen bebautem Stadtgebiet, während im angrenzenden Umland dieses Ereignis gar nicht auftrat.

Die Station Berlin-Alexanderplatz charakterisiert die Lage in einer städtischen Wärmeinsel. Da aber die Stadtstrukturen räumlich nicht homogen sind, bilden sich auch in anderen Teilen der Stadt mit hoher Bebauungsdichte, hohem Versiegelungsgrad und/oder mit sehr geringem Grünflächenanteil weitere Wärmeinseln aus. Andererseits werden in Gebieten mit großen Parkanlagen Temperaturen erreicht, die kaum von denen des Umlandes abweichen.

3 Analyse des Bioklimas mit dem Stadtbioklimamodell UBIKLIM

3.1 Das Stadtbioklimamodell UBIKLIM

Die Atmosphäre und damit das Klima sind ein Teil der Umwelt, mit der sich der menschliche Organismus dauernd auseinandersetzen muss, um das Gleichgewicht seiner Lebensfunktionen und damit seine Gesundheit zu erhalten. Die dabei geforderte Anpassungsleistung lässt sich über Wärmehaushaltsmodelle des Menschen (VDI, 1998) berechnen, wodurch der Zusammenhang zwischen Mensch und Atmosphäre objektiv, qualitativ und quantitativ erfasst wird. Dabei sind neben der Lufttemperatur ebenso Wind, Feuchte und Strahlungsverhältnisse sowie auch die Aktivität und Bekleidung des Menschen zu berücksichtigen. Der DWD nutzt das Klima-Michel-Modell (Jendritzky et al., 1990). Es basiert auf der Behaglichkeitsgleichung von Fanger (Fanger,

1972) inkl. einer Korrektur nach Gagge et al. (1986) zur besseren Erfassung feuchtwarmer Bedingungen, verknüpft alle für den menschlichen Wärmehaushalt relevanten Größen und liefert eine Aussage über das durchschnittliche subjektive Empfinden des Menschen (Behaglichkeit, Wärmebelastung, Kältestress). Der Name <Michel> weist auf den Durchschnittsmenschen hin (hier: männlich, 35 Jahre alt, 1,75 m groß, 75kg schwer). Zur Beschreibung des thermischen Empfindens dient die Gefühlte Temperatur (Staiger et al., 1997) in der Einheit °C. Sie vergleicht die tatsächlich vorgefundenen Bedingungen mit der Temperatur, die in einer Standardumgebung herrschen müsste, um ein identisches Wärme-, Behaglichkeits- oder Kaltgefühl zu haben. Die Bekleidung wird zwischen sommerlich leichter und winterlich dicker stets so variiert, dass sich der Mensch möglichst behaglich fühlt. In Tabelle 2 sind die Gefühlten Temperaturen dem thermischen Empfinden des Menschen sowie den jeweiligen Belastungsstufen zugeordnet.

Tabelle 2: Beziehung zwischen Gefühlter Temperatur, Thermischem Empfinden und Belastungsstufen

Gefühlte Temperatur [°C]	Thermisches Empfinden	Belastungsstufe
unter -39	sehr kalt	extreme Belastung
-39 bis -26	kalt	starke Belastung
-26 bis -13	kühl	mäßige Belastung
-13 bis 0	leicht kühl	schwache Belastung
0 bis 20	behaglich	keine Belastung
20 bis 26	leicht warm	schwache Belastung
26 bis 32	warm	mäßige Belastung
32 bis 38	heiß	starke Belastung
über 38	sehr heiß	extreme Belastung

Da die Anpassungsmöglichkeiten unter warmen bzw. heißen Bedingungen eher begrenzt sind und eine Entlastung sich nur durch Ausweichen in eine kühlere Umgebung (im Extremfall in klimatisierte Räume) realisieren lässt, es außerdem in Städten gegenüber dem Umland zu einer Zunahme von Wärmebelastung kommt, besitzt die warme Seite des Bioklimas bei Stadtplanungsfragen eine besondere Bedeutung. Folgerichtig fokussiert UBIKLIM speziell darauf.

Das Stadtbioklimamodell UBIKLIM (**U**rbanes **B**io**K**lima**M**odell) basiert auf der Idee der Klimatope. Klimatope sind Gebiete mit ähnlicher mikroklimatischer Ausprägung. In der Ebene sind sie durch die dominante Flächennutzungsart geprägt, während in bergigem Gelände außerdem der Einfluss von Höhe, Orographie und Exposition zu berücksichtigen ist.

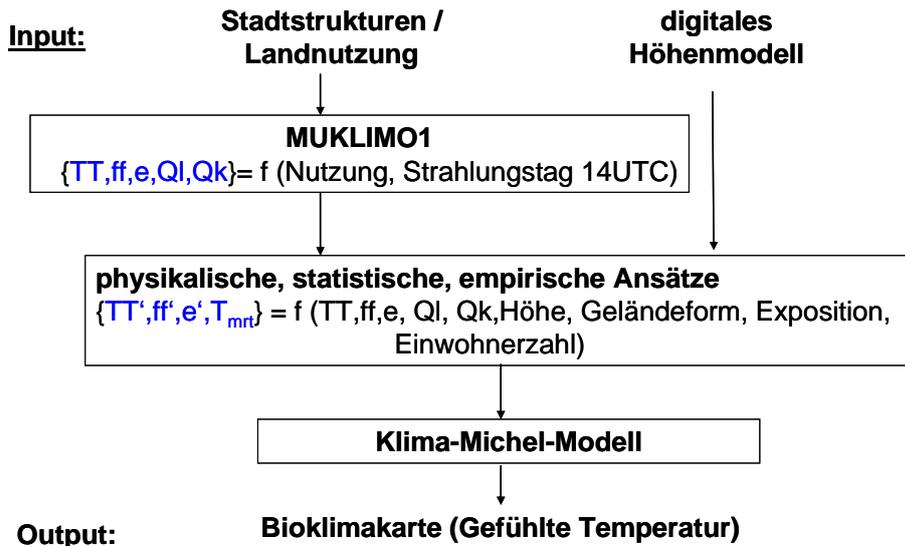


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Stadtbioklimamodells UBIKLIM (TT: Lufttemperatur, ff: Windgeschwindigkeit, e: Feuchte, Ql: langwellige Strahlungsflüsse, Qk: kurzwellige Strahlungsflüsse, T_{mrt} : mittlere Strahlungstemperatur des Menschen, Werte für 1 m über Grund)

Als Eingangsgrößen benötigt UBIKLIM neben einem hoch aufgelösten Höhenmodell geeignete Flächennutzungsinformationen. Dazu wird das Untersuchungsgebiet in eine endliche Anzahl von Arealen mit gleicher oder ähnlicher Nutzung unterteilt. Bebautes Gebiet wird weiter unterteilt und durch Versiegelungsgrad, überbauten Flächenanteil, Gebäudehöhe, Zahl der Gebäude pro Fläche und Durchgrünung eindeutig charakterisiert. Anhand dieser Eingangsdaten berechnet UBIKLIM in mehreren Schritten – vorrangig durch Anwendung des 1-dimensionalen Stadtklimamodells MUKLIMO_1 – für einen windschwachen, wolkenlosen Sommertag die meteorologischen Größen in 1 m Höhe über Grund für das gesamte Untersuchungsgebiet und analysiert sie anschließend pixelweise mit dem Klima-Michel-Modell (Abb. 3 - Flussdiagramm). Die Auflösung der resultierenden Bioklimakarte beträgt 10 bis 25 Meter (Piehl und Grätz, 1996; Friedrich et al., 2001).

UBIKLIM ermöglicht die lokalen Unterschiede im Bioklima zu erfassen. Eine Beziehung zum regionalen Klima und damit absolute Aussagen liefern diese Ergebnisse allerdings nicht.

3.2 Erweiterung von UBIKLIM zum Kombinierten Stadtbioklimamodell

Bioklimakarten mit Bezug zum regionalen Bioklima und lokaler Differenzierung können erzeugt werden, indem die UBIKLIM-Ergebnisse mit von der Flächennutzung unabhängiger regionaler Bioklimainformation, die im Folgenden auch als Hintergrundbelastung bezeichnet wird, verknüpft werden. Dazu wird das Stadtbioklimamodell zum ‚Kombinierten Stadtbioklimamodell‘ erweitert. Dieses besteht aus UBIKLIM, der bioklimatisch aufbereiteten Hintergrundinformation und einer statistischen Modellgleichung, mit der die Zusammenführung der unterschiedlichen Scales realisiert wird.

Um repräsentativ für eine weite Umgebung zu sein, werden die Wetterdaten an synoptischen Stationen laut Vorgaben der WMO (World Meteorological Organization) weitgehend von der

Landnutzung unbeeinflusst erhoben. Sie eignen sich damit zur Gewinnung der gesuchten Hintergrundinformation. Ausgenommen davon sind einzelne Stationen, die von der Vorgabe deutlich abweichen. Bei ihnen charakterisieren die Messdaten das Klima in der unmittelbaren Stationsumgebung wie beispielsweise Berlin-Alexanderplatz die „Stadtmitte“.

Beschrieben wird die Hintergrundinformation mit der Zahl der Tage mit Wärmebelastung als 30-jähriger Jahresmittelwert. Ein Tag mit Wärmebelastung wird definiert als ein Tag, an dem tagsüber zwischen 9 und 15 UTC die Gefühlte Temperatur mindestens an drei Stundenterminen 32°C und damit starke Wärmebelastung erreicht oder überschritten hat. Diese Definition wurde gewählt, weil man dadurch angenähert die Tage erfasst, die als warnwürdig erachtet werden, also eine hohe thermophysiologische Relevanz besitzen.

Um den Zusammenhang zwischen den thermischen Bedingungen an einem sommerlichen Strahlungstag einerseits und den mittleren klimatischen Bedingungen andererseits zu ermitteln, wurden für den Zeitraum 1971 - 2000 den Wetterdaten der synoptischen Stationen in Deutschland verschiedene Nutzungen/ Stadtstrukturen aufgeprägt. Das bedeutet, dass alle Messwerte für Temperatur, Feuchte, Wind sowie die aus der Bewölkung abgeleiteten Strahlung nutzungsspezifisch modifiziert wurden. Die Modifikationsparameter wurden aus MUKLIMO_1-Simulationen für die unterschiedlichen Stadtstrukturen bestimmt.

Alle Daten wurden anschließend mit dem Klima-Michel-Modell analysiert und auf Wärmebelastungstage hin untersucht. Aus dem dabei gewonnenen Datensatz ließ sich folgende Regressionsgleichung ableiten:

$$WB = (r_1 * WB_{frei} + r_2 * dGT + r_3 * WB_{frei} * dGT + r_4 * nn + r_5 * br + r_6 * lä + r_{konst}) \quad \text{Gl. (1)}$$

mit WB: Tage mit Wärmebelastung an einem beliebigen Ort der Stadt

WB_{frei} : Hintergrundbelastung

dGT: Gefühlte Temperatur an einem beliebigen Ort der Stadt minus Gefühlte Temperatur über Freifläche außerhalb der Stadt (gemäß UBIKLIM)

nn: Höhe über NN

br: geograph. Breite

lä: geograph. Länge

r_i : Regressionskoeffizienten

Da sich die UBIKLIM-Ergebnisse auf Strahlungstage beziehen, müssen zur Kopplung mit dem regionalen Bioklima auch die Wärmebelastungstage berücksichtigt werden, die keine Strahlungstage sind. Damit besteht die resultierende Gleichung sowohl aus einer Regressionsbeziehung als auch aus einer Gewichtungsfunktion. Ein Strahlungstag wird definiert über die Mittelwerte aus den 6, 12 und 18 UTC-Terminwerten für die Bewölkung (N) und die Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund (v). An einem Strahlungstag ist $N \leq 4$ Achtel und $v \leq 3$ m/s.

Die Kopplung der lokalen mit der regionalen Bioklimainformation wird durch folgenden Ansatz realisiert:

$$WB = (r_1 * WB_{frei} + r_2 * dGT + r_3 * WB_{frei} * dGT + geo) * strant + WB_{frei} * (1 - strant) \quad \text{Gl. (2)}$$

mit geo: $f(\text{geograph. Breite und Länge sowie Höhe}) = \text{konstant für Berlin}$

strant: prozentualer Anteil von Strahlungstagen an den aufgetretenen Wärmelastungstagen

4 Das Bioklima von Berlin mit Umland

Das Bioklima von Berlin wurde im Folgenden mit UBIKLIM und dem Kombinierten Bioklimamodell untersucht.

4.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet spannt sich über die Stadt Berlin sowie das angrenzende Umland. Es liegt innerhalb der Koordinaten 3400 – 49500 (Rechtswert) und 1000 – 39000 (Hochwert) (Soldner-Neu) und besitzt damit eine Ausdehnung von 46,1 km x 38,0 km.

Aufgrund der geringen Höhenunterschiede im Untersuchungsgebiet könne diese bei den Berechnungen mit UBIKLIM vernachlässigt und die Höhe konstant gesetzt werden.

4.2 Aufbereitung der Flächennutzungsinformation

Um die für UBIKLIM notwendigen Informationen zur Flächennutzung und zu den Stadtstrukturen zu generieren, standen folgende Datenbestände zur Verfügung:

- Nutzungsdatei der Blockkarte 1:5.000 des ISU Berlin mit Datenstand vom 31.12.2005 für Stadtstrukturtypen, Grün- und Freiflächen sowie Versiegelungsdaten
- Gebäudedaten der ALK Berlin und des Umlandes (Auszug September 2008)
- ATKIS-Nutzungs- und Versiegelungsdaten (Stand 2002)

Im Hinblick auf die Einbindung der ALK-Daten in den Auswertungsprozess ist zu beachten, dass Anlagen auf Bahngelände und S-Bahnhöfe, Gebäude auf Industrie- und Gewerbeflächen sowie Gartenhäuser in Kleingartengebieten nicht in allen Fällen erfasst sind.

Die Bereitstellung der Daten durch die Senatsverwaltung im Rahmen dieser Kooperation erfolgte in einem Raster von 25 m x 25 m, so dass sich insgesamt rund 2.800.000 Einzelflächen in einem Projektgebiet von etwa 1740 km² ergaben.

Aus den ALK-Daten konnte für die bebauten Flächentypen der Stadtstrukturparameter Gebäudehöhe, aus der ISU-Nutzungsdatei die Werte für den Versiegelungsgrad sowie den überbauten Flächenanteil jeweils als Flächenmittelwerte bestimmt werden. Der Parameter Anzahl an Gebäuden pro Flächeneinheit wurde als die Hälfte der Anzahl angeschnittener Gebäude abgeschätzt.

Die strukturbezogene Zuordnung zur Durchgrünung mit Bäumen wurde im Wesentlichen aus dem Gutachten von 1996 (Piehl und Grätz, 1996) übernommen. Tab. 3 zeigt die Stadtstrukturtypen und ihre mittleren Bebauungsparameter.

Tabelle 3: Bei der Modellierung verwendete Zuordnung von Stadtstrukturtypen und Bebauungsparametern (a: Versiegelungsgrad in %, b: Zahl der Gebäude/100000 m², c: Gebäudehöhe in m, d: überbauter Flächenanteil in %, e: Durchgrünung - n: nicht durchgrünt, m: mäßig durchgrünt, p: parkartig durchgrünt)

Stadtgebiet Berlin		a	b	c	d	e
1	Geschlossener Hinterhof	84	32	15	53	n
2	Hinterhof	78	36	16	45	n
3	Schmuck- und Gartenhof	65	32	13	35	p
4	Sanierung durch Entkernung	63	39	16	33	n
5	Behutsame Sanierung	74	40	16	42	n
6	Schuppenhof	61	28	12	29	n
7	Nachkriegsblockrand	66	35	15	35	n
8	Ungeordneter Wiederaufbau	67	51	19	35	n
9	Hochhaus, Großsiedlung	49	32	13	19	n
10	Großhof	52	29	13	27	m
11	Zeile seit den 50er Jahren	44	27	13	20	m
12	Altbau-Schule	58	31	13	26	n
13	Neubau-Schule	51	31	13	20	m
14	Schule	45	31	13	16	m
21	Dorf	38	26	12	17	m
22	Reihengarten	34	25	12	16	m
23	Garten	34	24	11	16	m
24	Parkartiger Garten	36	23	11	18	p
25	Gärten und halbpriv. Umgrünung	39	27	12	20	m
26	Offene Siedlungsbebauung	29	24	12	13	m
27	Friedhof	10	3	10	2	p
29	Kerngebiet	81	40	16	44	n
30	Gewerbegebiet mit geringer Bebauung	68	31	13	27	n
31	Gewerbegebiet mit dichter Bebauung	84	32	15	39	n
32	Flächen der Ver- und Entsorgung	57	32	14	18	n
33	Mischgebiet II mit geringer Bebauung	65	25	12	29	n
34	Kleingartenanlage mit niedrigem Erschließungsflächenanteil	15	30	3	8	p
35	Kleingartenanlage mit hohem Erschließungsanteil	20	60	3	10	p
37	Kleingartenanlage allgemein	15	30	3	8	p
38	Mischgebiet II mit dichter Bebauung	83	29	15	48	n
39	Mischgebiet I	43	22	11	20	n
41	Sicherheit und Ordnung	41	26	13	15	n
42	Post	68	47	16	23	n
43	Verwaltung	60	34	14	28	n
44	Hochschule und Forschung	53	29	13	26	m
45	Kultur	58	39	15	28	n
46	Krankenhaus	40	25	13	20	m
47	Kindertagesstätte	40	36	15	15	m
49	Kirche	43	32	14	18	n
50	Seniorenheim	49	27	13	23	m
51	Jugendfreizeitheim	26	15	11	11	p
58	Campingplatz	15	10	4	2	p
59	Wochenendhäuser	26	21	11	10	m
60	Gemeinbedarf allgemein	45	27	12	13	m
71	Plattenbausiedlung der 80er und 90er Jahre	55	31	15	20	n
72	Zeile der 20er Jahre nur Ost-Berlin	51	37	15	25	m
73	Siedlung der 90er Jahre kompakt	60	27	13	26	n
74	Siedlung der 90er Jahre aufgelockert	51	23	12	17	m
150	Friedhof	15	6	10	2	p
160	Kleingärten	20	27	3	3	p
161	Kleingärten (Anteil Dauerbewohner <=10%), nur Ost-Berlin	30	28	10	7	p
162	Kleingärten (Anteil Dauerbewohner > 10%), nur Ost-Berlin	37	31	13	10	p
180	Campingplatz	12	12	9	1	p

Umland Berlin

205	Kleingarten	19	27	5	3	p
206	Kerngebiet	81	16	10	11	n
208	dichte Bebauung	63	15	10	10	m
211	Industrie	65	12	10	7	n

Um dem Modellansatz der Anwendung des 1-dimensionalen Modells MUKLIMO_1 gerecht zu werden, müssen die Flächen der einzelnen Areale deutlich größer als ein 25 m x 25 m-Pixel sein. Das bedeutet, dass kleine Straßen nicht aufgelöst, sondern der umliegenden Nutzung zuzuordnen sind.

Da das Straßennetz der ISU5 sämtliche Straßen enthält, wurde versucht kleinere Straßen über einen einfachen Algorithmus herauszufiltern und den umliegenden Flächennutzungstypen zuzuordnen. Als unglücklich stellte sich dabei heraus, dass die Straßen innerhalb Berlins und im Umland unterschiedlich erfasst sind (was auf den differierenden Erfassungsgrundlagen ATKIS im Umland und ISU5 im Stadtgebiet beruht). Während innerhalb der Stadt das Straßennetz durch den Algorithmus angemessen ausgedünnt wird, spricht im Umland der Filter nicht an. Filtert man allerdings noch stärker, so verschwinden im Innenstadtbereich zu viele Straßen. Der bei der weiteren Verwendung gewählte Kompromiss ist in Karte 2 dargestellt.

Karte 3 zeigt die bei den Berechnungen zugrunde gelegte Flächennutzung in einer 25 m-Auflösung. Die bebauten Gebiete wurden entsprechend den Flächentypen der ISU weiter unterteilt (der Übersichtlichkeit wegen hier aber nicht dargestellt).

Zusätzlich zu den aktuellen Bestandsdaten 2005 wurden digital ‚Flächen mit gesamtstädtischem Veränderungspotenzial‘ bereitgestellt (Karte 4).

In der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin wird ein Monitoring zu „Flächen mit gesamtstädtisch bedeutenden Veränderungspotenzialen“ durchgeführt. Es bietet eine systematische Übersicht über die Ressource „Planungsfläche“. Dokumentiert werden die Inanspruchnahme von Flächen und der Nutzungswandel im Siedlungsraum seit 1990 sowie die künftigen Planungen zur räumlichen Stadtentwicklung.

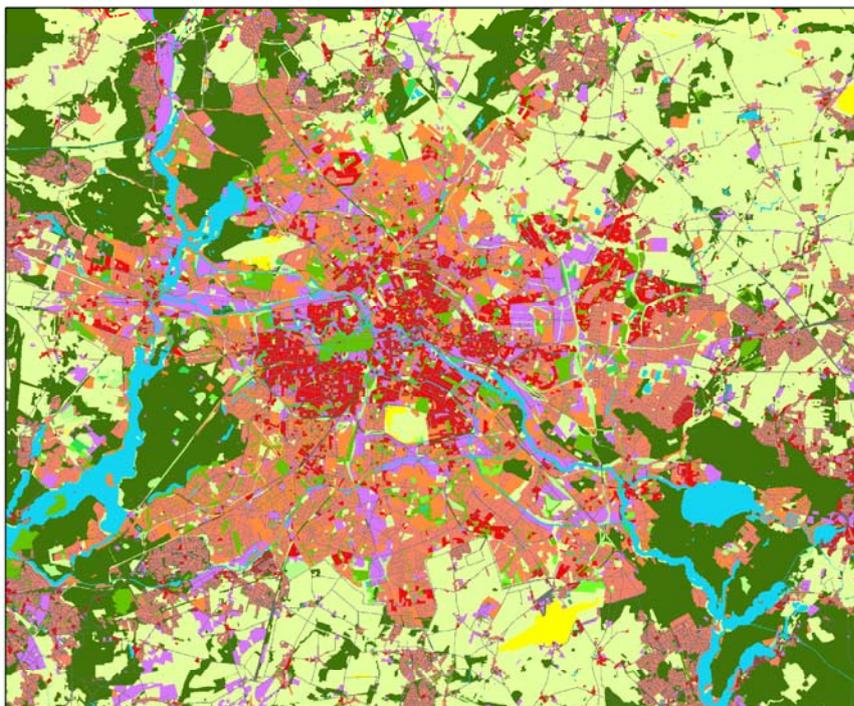
Der Zeithorizont der geplanten tatsächlichen Umnutzung ist auf die Zeit bis 2020 begrenzt. Diese einzelnen vorgesehenen Nutzungen konnten den ISU-Flächentypen zugeordnet werden.



Straßennetz

- rausgefiltert
- verbleibend

Karte 2 Im Modell genutztes Straßennetz von Berlin und Umland -, blau: eliminierte Straßenzüge, rot: verbleibendes Hauptstraßennetz in der Kartengrundlage



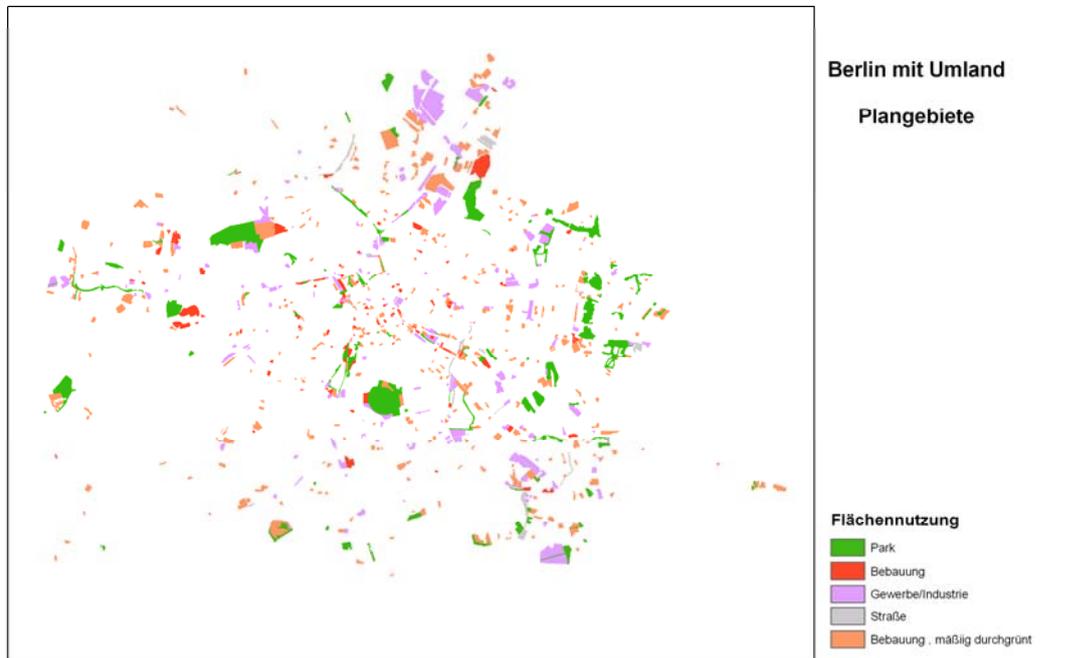
Berlin mit Umland

Bestand

Flächennutzung

- Gewässer
- Wald
- Park
- Gartenland
- Streuobstwiese
- Brache
- Acker/Wiese, Weide
- Rasen
- Bebauung, gut durchgrünt
- Bebauung
- Industrie/Gewerbe
- Sportanlage
- Straße
- Gleisanlage
- Stadion
- Flugplatz
- Bebauung, mäßig durchgrünt

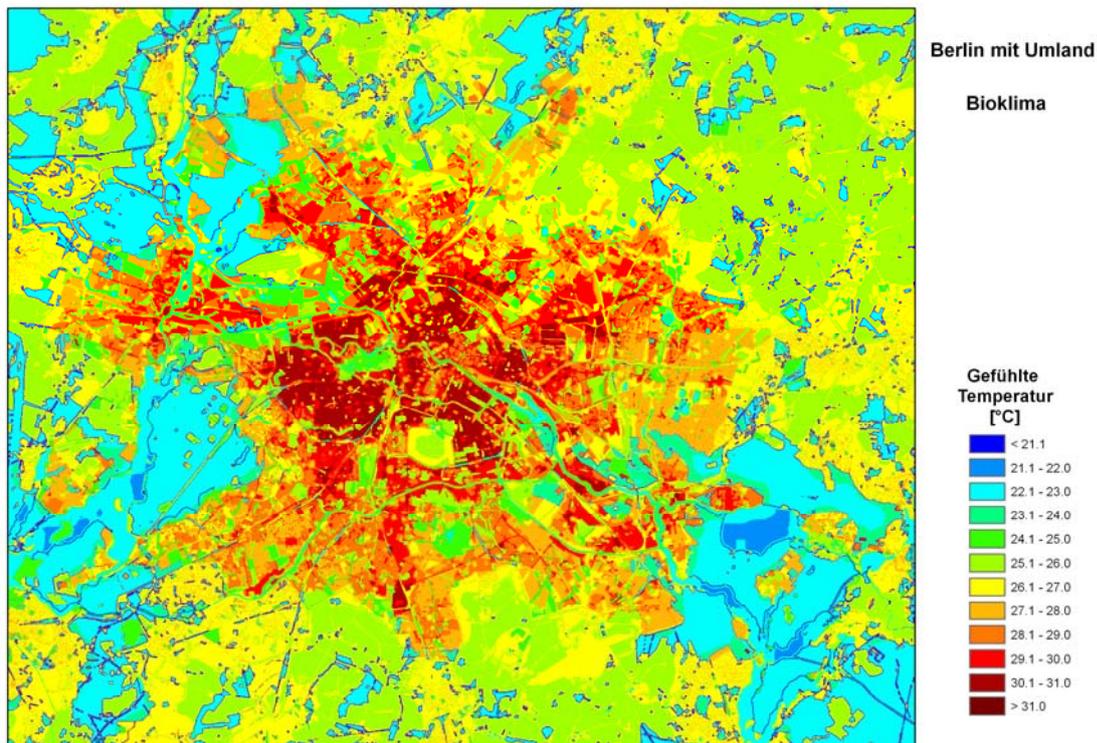
Karte 3 Flächennutzungstypisierung für Berlin und Umland



Karte 4 Projektgebiete (ab 1ha) mit gesamtstädtischem Veränderungspotenzial

4.3 Anwendung des Stadtbioklimamodells UBIKLIM

Unter Verwendung der Flächennutzungsdaten von Berlin und seinem Umland (Karte 3) berechnet UBIKLIM die Verteilung der Gefühlten Temperatur, wie sie sich typischerweise am Nachmittag an einem windschwachen wolkenlosen Sommertag ausprägt (Karte 5). Deutlich bilden sich darin die Unterschiede zwischen unterschiedlichen Nutzungen und Stadtstrukturen ab. Markant ist die Zunahme der thermischen Belastung zur dicht bebauten Innenstadt hin. Ebenso auffällig tritt aber auch im Stadtzentrum die Parkanlage ‚Großer Tiergarten‘ hervor. Dort wird mit einer um etwa 5°C geringeren Gefühlten Temperatur das innerstädtische Belastungsgefüge aufgebrochen. Im Sommer, wenn in der angrenzenden Bebauung bereits Wärmebelastung herrscht, lässt sich hier oftmals noch in eine thermisch angenehmere Umgebung ausweichen.



Karte 5 Gefühlte Temperatur in °C an einem windschwachen, wolkenlosen Sommertag nachmittags in Berlin und Umland

Vergleich mit Messdaten

Für den Vergleich konnte auf die Mess- und Beobachtungsdaten der Stationen an den Flughäfen Schönefeld (10385), Tegel (10382) und auf dem ehemaligen Fluggelände Tempelhof (10384) sowie die Stadtstationen Dahlem (10381) und Alexanderplatz (10389) zurückgegriffen werden. Es wurden aus dem Zeitraum 1990 - 2000 zwölf sommerliche Strahlungstage herausgefiltert. Diese vergleichsweise geringe Zahl ist im Wesentlichen der Station Alexanderplatz geschuldet, da hier nur wenige vollständige Datensätze zur Berechnung der Gefühlten Temperatur zur Verfügung standen. Während Temperatur, Feuchte und Bewölkung, die zur Parametrisierung der Strahlung dient, direkt in die Berechnung der Gefühlten Temperatur eingingen, wurde die Windgeschwindigkeit gemäß dem im Routinemodell des DWD zur Berechnung der Gefühlten Temperatur verwendeten logarithmischen Ansatz auf eine Höhe von 1 m heruntergerechnet. Entsprechend den Beschreibungen zu den Stationsumgebungen (Deutscher Wetterdienst, 2008) wurden dabei unterschiedliche Rauigkeitslängen angenommen.

Tabelle 4: Vergleich der mit UBIKLIM berechneten Gefühlten Temperaturen (GT_{UBIKLIM}) mit den Mittelwerten der Gefühlten Temperatur aus 12 sommerlichen Strahlungstagen (GT_{Station}) an fünf Berliner Stationen

Station	$GT_{\text{Station}} [^{\circ}\text{C}]$ 12 UTC	$GT_{\text{UBIKLIM}} [^{\circ}\text{C}]$ 14 UTC	Windgeberhöhe über Grund [m]	Rauigkeits- länge [m]
Schönefeld	32,5	25,9	10	0,01
Tegel	32,1	25,8	10	0,03
Tempelhof	32,4	26,2	10	0.06
Dahlem	35,0	29,5	26	0,15
Alexanderplatz	35,6	30,4	368	0,65

In Tab. 4 wurden die Gefühlten Temperaturen aus dem Modell den Mittelwerten aus den 12 Strahlungstagen an den ausgewählten Wetterstationen im Stadtgebiet gegenübergestellt. Man sieht, dass die Differenzen zwischen den Stadtstrukturen recht gut wiedergegeben werden. So zeigen sowohl die Messungen als auch die Modellrechnungen, dass an den drei Flughäfen ähnliche thermische Bedingungen herrschen. An den beiden Stadtstationen liegen die Gefühlten Temperaturen um 2,5 bis 3,5 °C höher, im Modell sind es ungefähr 4 °C, d. h. bei den Stadtstationen bildet sich deren jeweilige Lage im Stadtzentrum (Alexanderplatz) bzw. in begrünter Einzelhausbebauung am Innenstadtrand (Dahlem) gut ab.

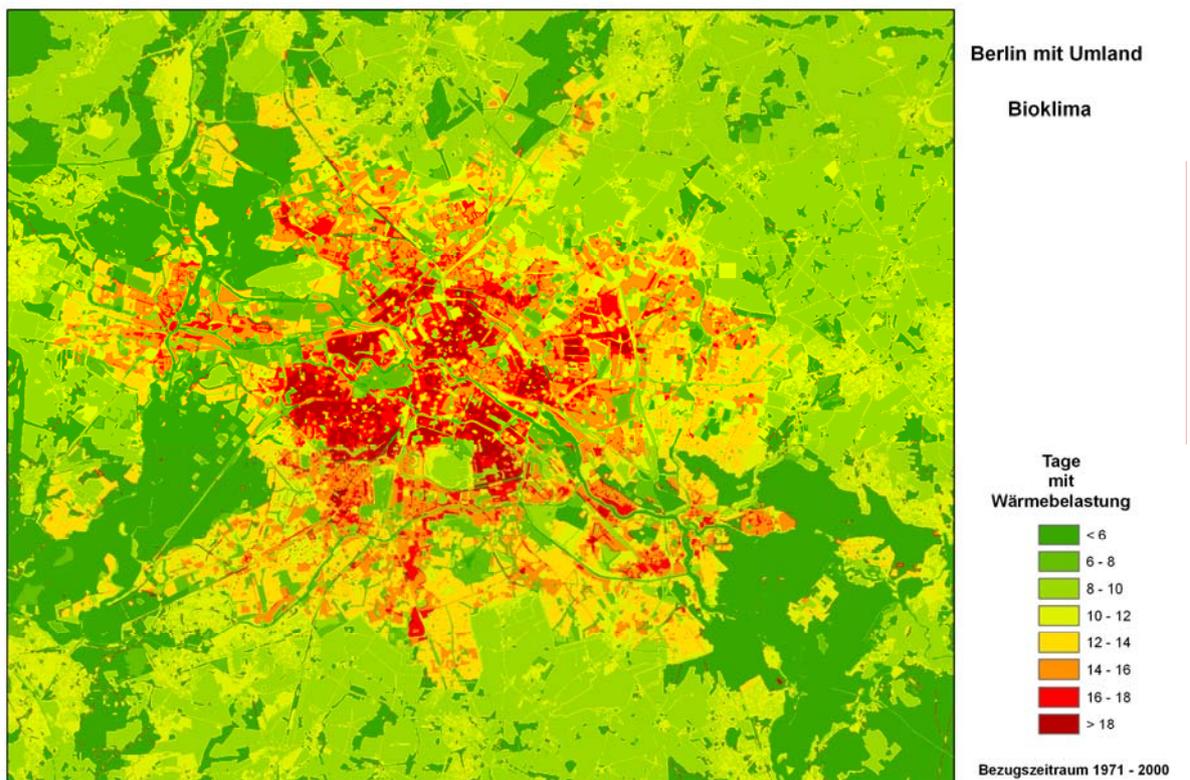
Dieser Vergleich sollte allerdings nicht überbewertet werden, da hier Punktwerte (Stationsdaten) Flächenmittelwerten (Modelldaten) gegenübergestellt werden. Da sich entsprechend der Modellphilosophie eine pixelgenaue Interpretation verbietet, wurden die Modelltemperaturen repräsentativ für den ungefähren Bereich der Station abgegriffen. Da ferner die Daten der Wetterstationen als repräsentativ für die Umgebung erachtet werden und außerdem ein Mittel aus mehreren Tagen gebildet wurde, wird der Vergleich dennoch als durchaus sinnvoll erachtet.

UBIKLIM ermöglicht die lokalen Unterschiede im Bioklima zu erfassen. Eine Beziehung zum regionalen Klima und damit absolute Aussagen liefern diese Ergebnisse allerdings nicht.

4.4 Anwendung des Kombinierten Stadtbioklimamodells auf Berlin

Für das Kombinierte Stadtbioklimamodell werden neben den UBIKLIM-Eingabeparametern zusätzlich ein Wert für die Hintergrundbelastung und einer für den Anteil an Strahlungstagen benötigt. Im Fall von Berlin können diese aus den Daten der Wetterstation Berlin-Schönefeld ermittelt werden. Der Jahresmittelwert liegt für den Zeitraum 1971 – 2000 bei 9,9 Wärmebelastungstagen, Strahlungstage haben daran einen Anteil von 47 %, die geographischen Daten zusammengefasst als die Größe „geo“ (siehe Kap. 3.2, Gl. (2)) werden aufgrund der relativ geringen Ausdehnung konstant gesetzt. Karte 6 zeigt als Ergebnis der Modellanwendung die Verteilung der Tage mit Wärmebelastung für den Bezugszeitraum 1971 – 2000.

Man sieht, dass im Vergleich zum Umland in der dicht bebauten Innenstadt deutlich häufiger, nämlich etwa doppelt so oft der Schwellenwert zu starker Wärmebelastung überschritten wird. Gleichzeitig wird in den innerstädtischen Grünanlagen diese Schwelle kaum häufiger als im Umland erreicht. Das bedeutet, dass die innerstädtischen Parks bei Wärmebelastung in der umliegenden Bebauung in der Hälfte der Fälle dem Menschen noch erträgliche thermische Bedingungen bieten.



Karte 6 Jahresmittel der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung für den Bezugszeitraum 1971 – 2000 für Berlin und Umland

Karte 6 liefert nun absolute Aussagen. Diese lassen sich mit auf die gleiche Weise erstellten Auswertungen, z. B. anderer Städte oder auch einfach nur mit der Hintergrundbelastung eines beliebigen Gebietes vergleichen.

Analog zur vergleichenden Darstellung der Gefühlten Temperaturen (Tab. 4) werden in Tab. 5 die Stationsauswertungen in Bezug auf die Häufigkeit der Tage mit Wärmebelastung den Modellwerten gegenübergestellt. Leider reichten die Messdaten für die Station Alexanderplatz bei weitem nicht aus, um ein 30-jähriges Mittel zu bestimmen oder auch nur abzuschätzen.

Die Stations- und Modellwerte zeigen eine gute Übereinstimmung. Alle drei Flughafen-Stationen besitzen etwa das gleiche Belastungslevel, im Bereich der Stadt-Station Dahlem werden dagegen sieben Wärmebelastungstage/Jahr mehr erwartet.

Tabelle 5: Vergleich der mit UBIKLIM berechneten Tage mit Wärmebelastung (WB_{UBIKLIM}) mit der aus den Stationsdaten berechneten Zahl der Tage mit Wärmebelastung (WB_{Station}) an vier Berliner Stationen (Bezugszeitraum 1971 – 2000)

Station	WB_{Station} [Tage]	WB_{UBIKLIM} [Tage]
Schönefeld	9,9	9,2
Tegel	8,6	9,0
Tempelhof	9,2	9,9
Dahlem	16,6	16,0
Alexanderplatz	-	17,5

5 Projektion des Bioklimas für Zeiträume des Klimawandels

5.1 Klimamodellierung

Um zu einer Vorstellung der künftigen Klimaentwicklung zu gelangen, werden globale Klimamodelle betrieben. Dabei wird ein Spektrum an Szenarien bereitgestellt, deren Ausprägung jeweils durch die im Vorfeld angenommenen künftigen Rahmenbedingungen insbesondere bezüglich der Emission von Treibhausgasen und Aerosolen in Abhängigkeit der sozioökonomischen und technologischen Entwicklung bestimmt wird. Die Szenarien-Betrachtung weist implizit auf die große Unschärfe der Klimaprojektionen hin, die nicht vergessen werden sollte, auch wenn wie im Folgenden nur das Szenario A1B(IPCC, 2001) betrachtet wird.

Globale Klimamodelle besitzen nur eine geringe Auflösung, die sich aber durch eine Regionalisierung deutlich erhöhen lässt. Dabei kommen sowohl statistische als auch dynamische Verfahren in Betracht.

Bei den im Folgenden beschriebenen Untersuchungen wurde mit den Resultaten des dynamischen Regionalmodells REMO (Jacob, 2005) und des statistischen Regionalmodells WETTREG (Kreienkamp und Enke, 2006) gearbeitet, beide angetrieben von Simulationen des globalen Klimamodells ECHAM5-MPI-OM des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (Roeckner et al., 2006). Untersuchungen mit dem statistischen Verfahren STAR sind noch geplant; die Anwendung des numerischen Regionalmodells CLM wird zurückgestellt.

5.2 Downscaling regionaler Klimaprojektionen mit dem Kombinierten Stadtbioklimamodell

Für den möglichen Klimawandel einer Stadt sind lokale Änderungen, die insbesondere durch Umnutzungen hervorgerufen werden, sowie an das globale Klima gekoppelte Änderungen verantwortlich. Mit dem Kombinierten Stadtbioklimamodell können beide Einflussfaktoren berück-

sichtigt werden, wobei die Hintergrundbelastung durch das globale beziehungsweise das daraus abgeleitete regionale Klima definiert wird.

Zur Ermittlung der künftigen Hintergrundbelastung können die Resultate regionaler Klimamodelle herangezogen werden. Ausgewertet wurden REMO- und WETTREG-Daten für den Kontrollzeitraum 1971 – 2000 und die Projektionszeiträume 2021 – 2050 sowie 2071 – 2100.

Die Hintergrundbelastung aus den REMO-Daten wurde anhand eines 3 x 3 Gitterpunkte umfassenden, weitgehend von der Nutzung unbeeinflussten Gebietes im Südwesten Berlins ermittelt (Deutschländer et al., 2009). Es standen an jedem Gitterpunkt Zeitreihen aller physiologisch relevanten meteorologischen Größen für die gewünschten Zeiträume zur Verfügung. Die Auswertung in Bezug auf Tage mit Wärmebelastung erfolgte für die drei Zeiträume pixelweise mit anschließender Bildung des Flächenmittels. Analog wurde der Anteil an Strahlungstagen bestimmt.

WETTREG generiert seine Ergebnisse stationsbezogen. Im vorliegenden Fall wurden die Daten der Stationen Schönefeld und Lindenberg zunächst getrennt in Bezug auf die Zahl der Tage mit Wärmebelastung bzw. den Anteil an Strahlungstagen ausgewertet. Das arithmetische Mittel der Werte beider Stationen steht dann für die den Berliner Raum charakterisierende Hintergrundbelastung. Die WETTREG-Stationen Müncheberg und Zehdenick, die prinzipiell auch als weitere Stützpunkte für die Untersuchungen in Frage gekommen wären, wurden zur Auswertung nicht herangezogen, da die Durchführung der im Folgenden beschriebenen Biaskorrekturen aufgrund sehr lückenhafter Mess- und Beobachtungsdaten nicht möglich gewesen wäre.

Im Gegensatz zu REMO liefert WETTREG immer nur einen Wert pro Tag. Um eine adäquate Auswertung in Bezug auf die Wärmebelastung durchführen zu können, wurden mit Hilfe statistischer Verfahren, die speziell mit den Messdaten der Stationen Schönefeld bzw. Lindenberg abgeglichen wurden, Tagesgänge und damit Stundenwerte für die zur Berechnung der Gefühlten Temperatur benötigten Größen erzeugt. Verwendet wurden Temperaturmaximum, Temperaturminimum, Tagesmittel von Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Feuchte und Bewölkung. Damit wird man sicher nicht jeden Tag realitätsnah darstellen können. Auch in Bezug auf die Berechnung der Gefühlten Temperatur ist diese Vorgehensweise kritisch zu bewerten, da diese aufgrund der zum Teil gegenläufigen Wirkweise der einzelnen Wetterparameter prinzipiell eine zeitgleiche Zuordnung benötigt. Dadurch aber, dass ein Tag mit Wärmebelastung nicht an einem einzelnen Termin festgemacht wird, sondern über drei Termine tagsüber definiert wird (siehe Kap 3.2), sowie durch die Betrachtung eines längeren Zeitraums, ergibt sich ein durchaus realistisches Bild.

Die Auswertung für den Zeitraum 1971 – 2000 der Mess-, REMO- und WETTREG-Daten (Tab. 6) zeigt, dass Wärmebelastungstage bei REMO leicht unter-, bei WETTREG aber überschätzt werden. Die Abweichungen bezüglich des Strahlungstageanteils sind deutlich stärker.

Tabelle 6: Anzahl der Tage mit Wärmebelastung (WB) und prozentualer Anteil (strant) an Strahlungstagen als Jahresmittelwert des Zeitraums 1971 – 2000 aus den Messdaten der Station Schönefeld (10385), sowie den entsprechenden Zeitreihen von REMO und WETTREG

	10385	REMO	WETTREG
WB [Tage]	9,9	9,4	13,0
strant [%]	47	30	61

Die Abweichung des Modellwertes vom Erwartungswert aus den Messungen wird als Modell-Bias bezeichnet. Durch Biaskorrekturen lassen sich die Modellergebnisse verbessern. Dazu werden für die Schwellenwerte (Gefühlte Temperatur, Windgeschwindigkeit, Bewölkung) aus der Häufigkeitsverteilung der Messdaten von Schönefeld und Lindenberg die jeweiligen Perzentile bestimmt. Anschließend werden umgekehrt die in der Häufigkeitsverteilung der Modelldaten bei diesen Perzentilen liegenden Werte als neue Schwellenwerte definiert (Deutschländer, 2009). Der Bias verringert sich für die Tage mit Wärmebelastung bei WETTREG und für den Strahlungstageanteil bei beiden Modellen deutlich (Tab. 7).

Tabelle 7: Anzahl der Tage mit Wärmebelastung (WB) und prozentualer Anteil (strant) an Strahlungstagen als Jahresmittelwert des Kontrollzeitraums 1971 – 2000, errechnet anhand der Zeitreihen von REMO und WETTREG mit Bias-Korrektur

	REMO	WETTREG
WB [Tage]	10,4	10,8
strant [%]	42	49

Die Auswertung der künftigen Zeiträume 2021 - 2050 und 2071 – 2100 wurde ebenfalls mit den für den Kontrollzeitraum bestimmten Biaskorrekturen durchgeführt. Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse. Bis Mitte des Jahrhunderts kommt es bei beiden Modellen etwa zu einer 50%-igen Zunahme der Tage mit Wärmebelastung. Gleichzeitig nimmt auch der Anteil an Strahlungstagen zu, bei REMO um 5%, bei WETTREG um 6%. Bis Ende des Jahrhunderts werden sich die thermischen Belastungssituationen im ungestörten Umland noch mal nahezu verdoppeln, während sich der Anteil an Strahlungstagen kaum mehr verändert.

Tabelle 8: Anzahl der Tage mit Wärmebelastung (WB) und prozentualer Anteil (strant) an Strahlungstagen als Jahresmittelwert der Projektionszeiträume 2021 – 2050 und 2071 – 2100, errechnet anhand der Zeitreihen von REMO und WETTREG mit Bias-Korrektur

		REMO	WETTREG
2021 - 2050	WB [Tage]	14,9	15,5
	strant [%]	47	55
2071 - 2100	WB [Tage]	26,6	26,4
	strant [%]	47	53

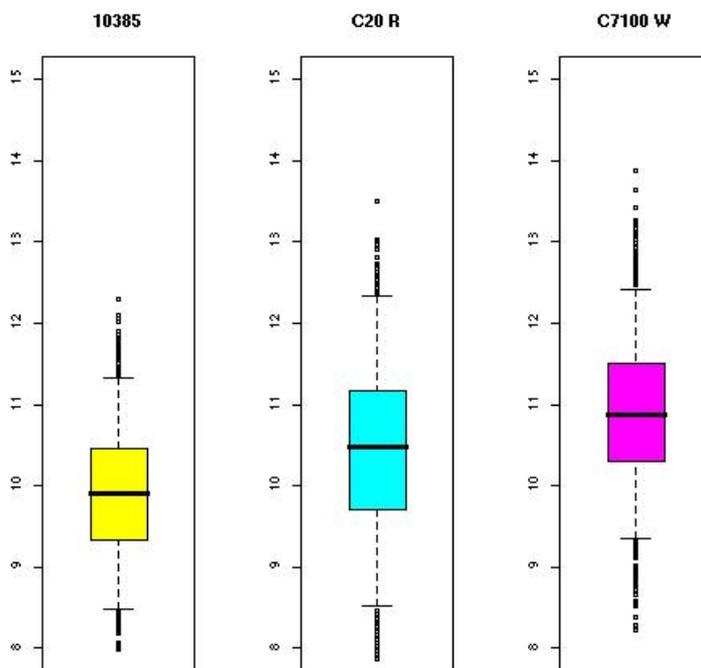


Abbildung 4: 90%-Konfidenzintervalle für die Tage mit Wärmebelastung im Zeitraum 1971 – 2000 (10385: Station Schönefeld, C20R: Kontrolllauf REMO, C7100W: Kontrolllauf WETTREG)

Um besser einschätzen zu können, wie gut die Modell- die Messdaten wiedergeben, wurden für den Zeitraum 1971 – 2000 anhand der jährlich ermittelten Tage mit Wärmebelastung die Konfidenzintervalle für das 90%-Signifikanzniveau berechnet (Abb. 4). In den Bereichen zwischen den beiden dünnen Querstrichen wird mit 90-%iger Wahrscheinlichkeit der Wert für die Hintergrundbelastung zu finden sein. Die Abweichungen der drei Konfidenzintervalle (Messdaten und Modellergebnisse) sind gering, woraus sich folgern lässt, dass die Hintergrundbelastung aus den Modellen die an der Station beobachtete Hintergrundbelastung gut widerspiegelt.

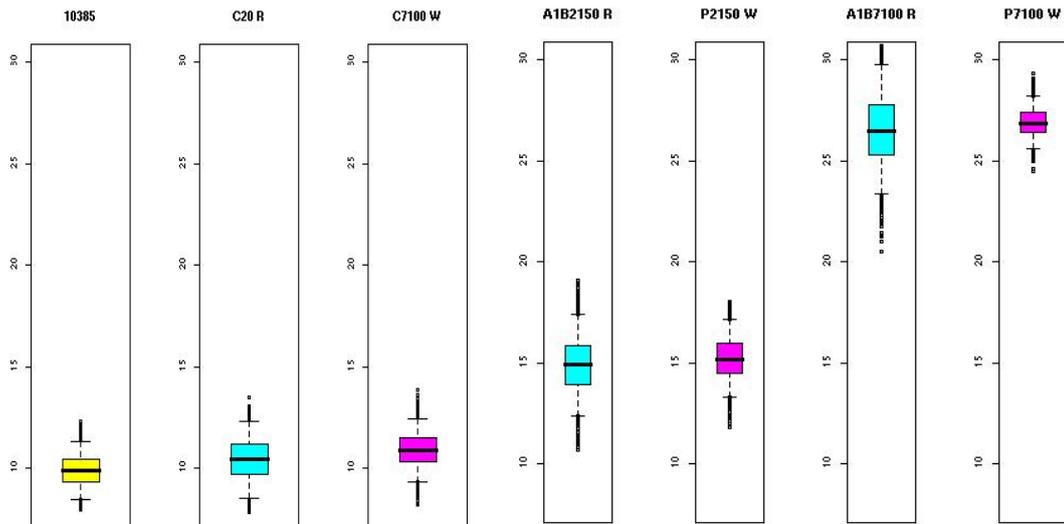


Abbildung 5: 90%-Konfidenzintervalle für die Tage mit Wärmebelastung im Kontrollzeitraum 1971 – 2000 (10385: Station Schönefeld, C20R: REMO, C7100W: WETTREG) und in den Projektionszeiträumen 2021 – 2050 (A1B2150R: REMO, P2150W: WETTREG), 2071 – 2100 (A1B7100R: REMO, P7100W: WETTREG)

In Abbildung 5 sind zusätzlich die 90%-Konfidenzintervalle der Projektionszeiträume dargestellt. Die des Projektionszeitraums 2021 – 2050 überlappen sich nur geringfügig mit denen des Kontrollzeitraums. Daraus lässt sich eine leichte, aber signifikante Erhöhung der Anzahl an Wärmebelastungstagen bis zur Mitte dieses Jahrhunderts folgern. Für 2071 – 2100 zeigt sich die Zunahme der Tage mit Wärmebelastung noch deutlich stärker.

5.3 Projektionsergebnisse ohne Nutzungsänderungen

Mit den Werten für Hintergrundbelastung und Strahlungstageanteil aus den Tabellen 7 und 8 wurde das Kombinierte Bioklimamodell angetrieben. Nutzungsänderungen wurden zunächst nicht berücksichtigt. In den Abbildung 7a, b und 8a, b sind für beide Modelle und für beide Projektionszeiträume die Änderungen gegenüber dem Kontrolllauf dargestellt.

Es zeigt sich, dass sich die thermische Situation insbesondere in den schon aktuell am häufigsten belasteten Arealen weiter verschärft. Während im Umland bis Mitte des Jahrhunderts nach beiden Modellläufen mit 3 bis 5 Tagen etwa 50% häufiger Wärmebelastung erwartet wird, sind es in der dicht bebauten Innenstadt über 7. Im Falle des WETTREG-Antriebs ist der Stadtumland-Unterschied etwas stärker ausgeprägt, was im Wesentlichen durch die leicht stärkere Zunahme an Strahlungstagen bedingt wird. Gleichzeitig bewegen sich die Änderungen im Bereich der größeren unbebauten innerstädtischen Flächen in beiden Fällen auf dem Niveau des Umlandes.

Daran ändert sich auch am Ende des Jahrhunderts nichts. Dann allerdings werden Tage mit starker Wärmebelastung um etwa das 1,5-fache häufiger auftreten als heute (Karten 8a, b).



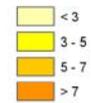
**Berlin mit Umland
Bioklima**

Änderung für den
Zeitraum 2021 - 2050

Bestand

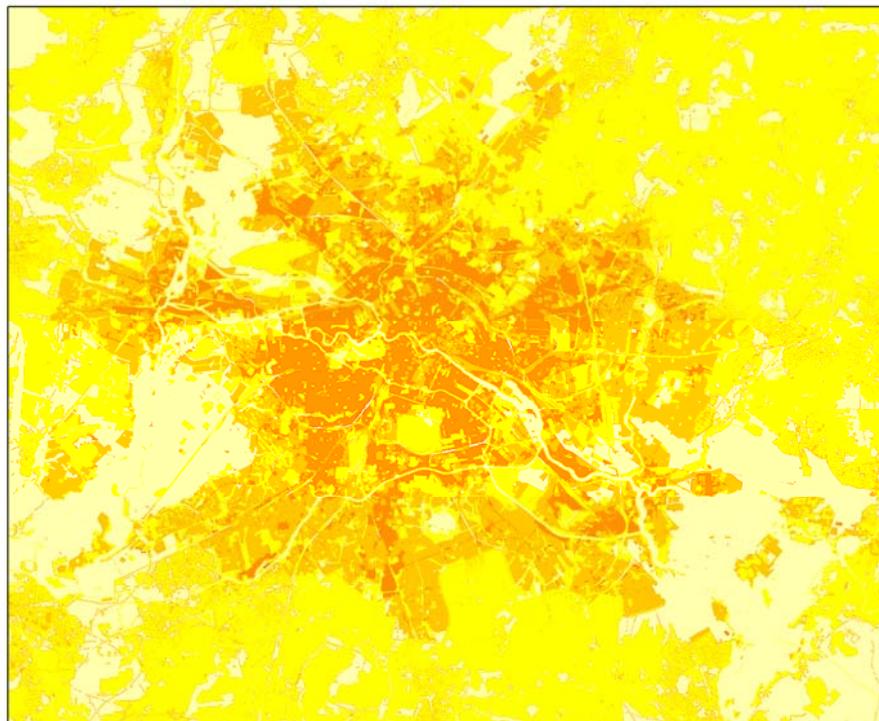
Basis: REMO

Zunahme der Tage
mit Wärmebelastung



Differenz aus Projektionszeitraum 2021 - 2050 ohne Plandaten und dem Kontrollzeitraum 1971 - 2000 ohne Plandaten (Basis: REMO)

(a)



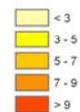
**Berlin mit Umland
Bioklima**

Änderung für den
Zeitraum 2021 - 2050

Bestand

Basis: WETTREG

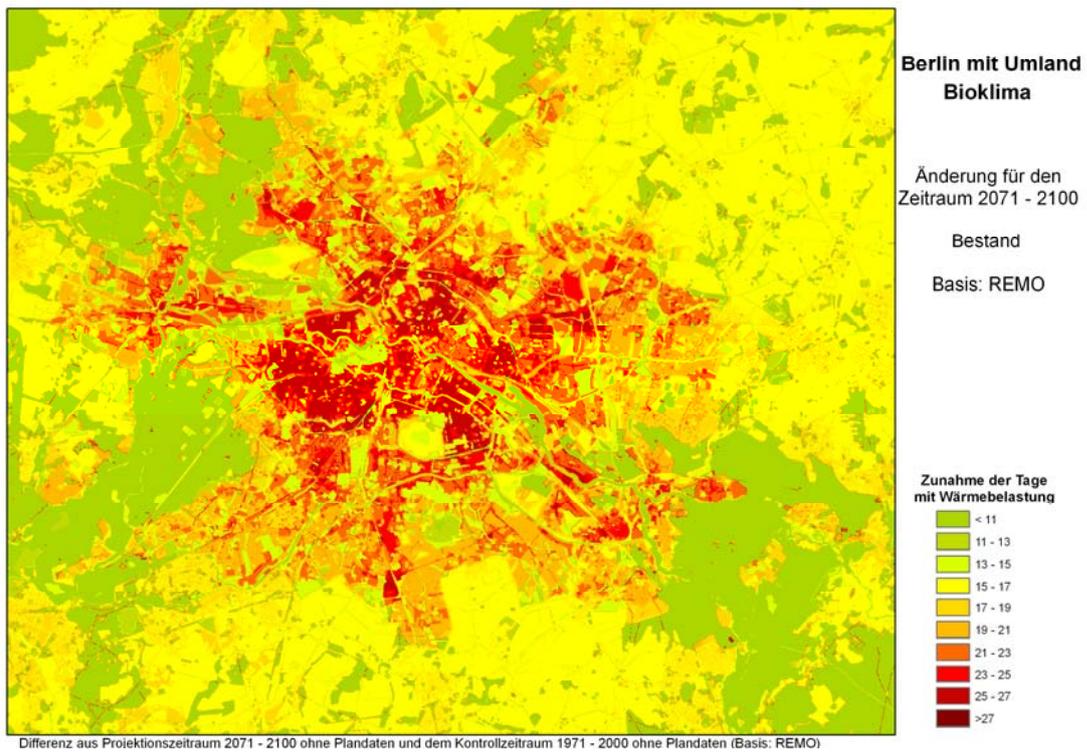
Zunahme der Tage
mit Wärmebelastung



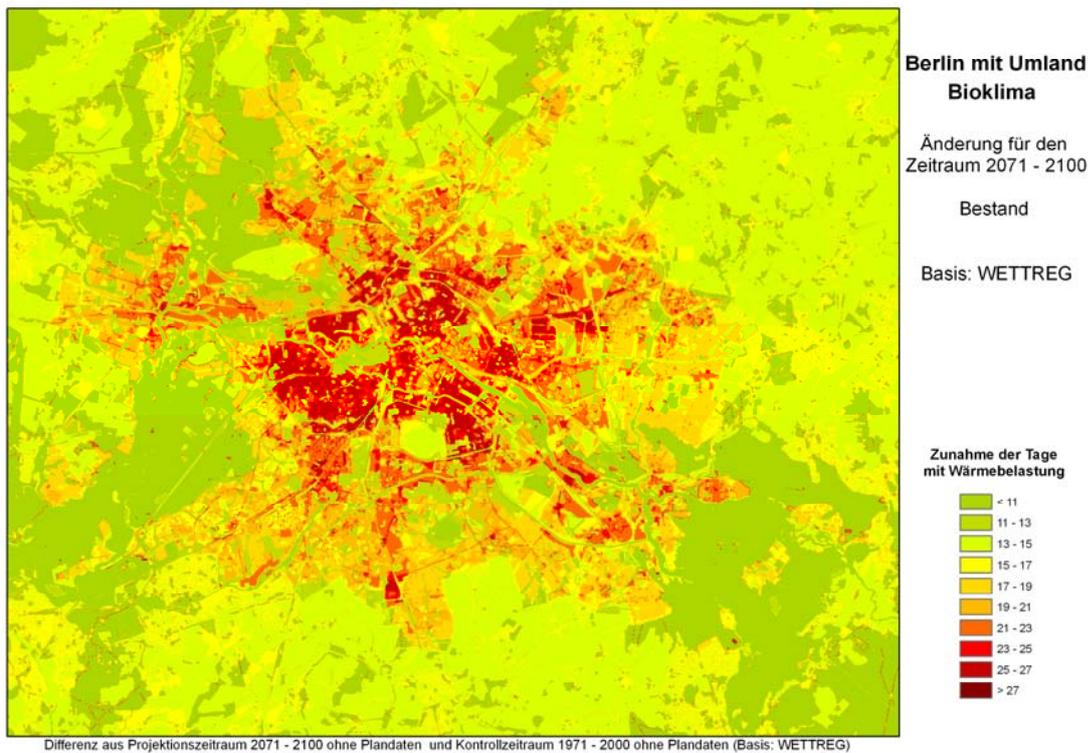
Differenz aus Projektionszeitraum 2021 - 2050 ohne Plandaten und Kontrollzeitraum 1971 - 2000 ohne Plandaten (Basis: WETTREG)

(b)

Karte 7a, b Änderung der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung (Jahresmittel) des Projektionszeitraums 2021 – 2050 gegenüber dem Kontrolllauf 1971 – 2000 mit REMO-Antrieb (a), WETTREG-Antrieb (b)



(a)



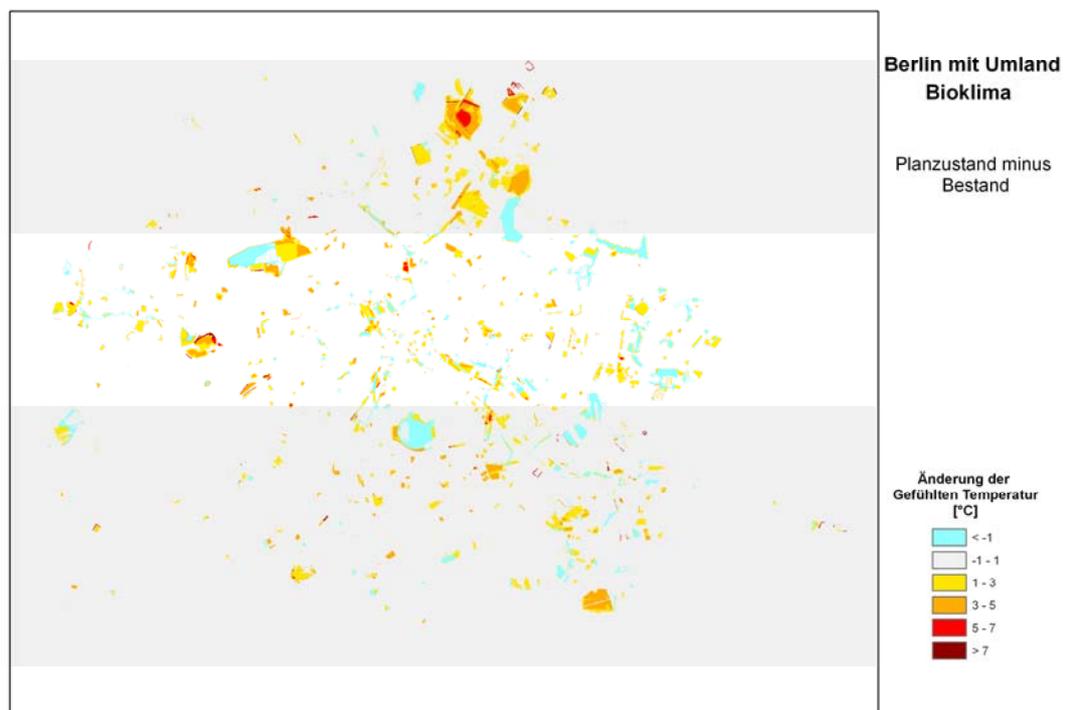
(b)

Karte 8a, b Änderung der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung (Jahresmittel) des Projektionszeitraums 2071 – 2100 gegenüber dem Kontrolllauf 1971 – 2000 mit REMO-Antrieb (a), WETTREG-Antrieb (b)

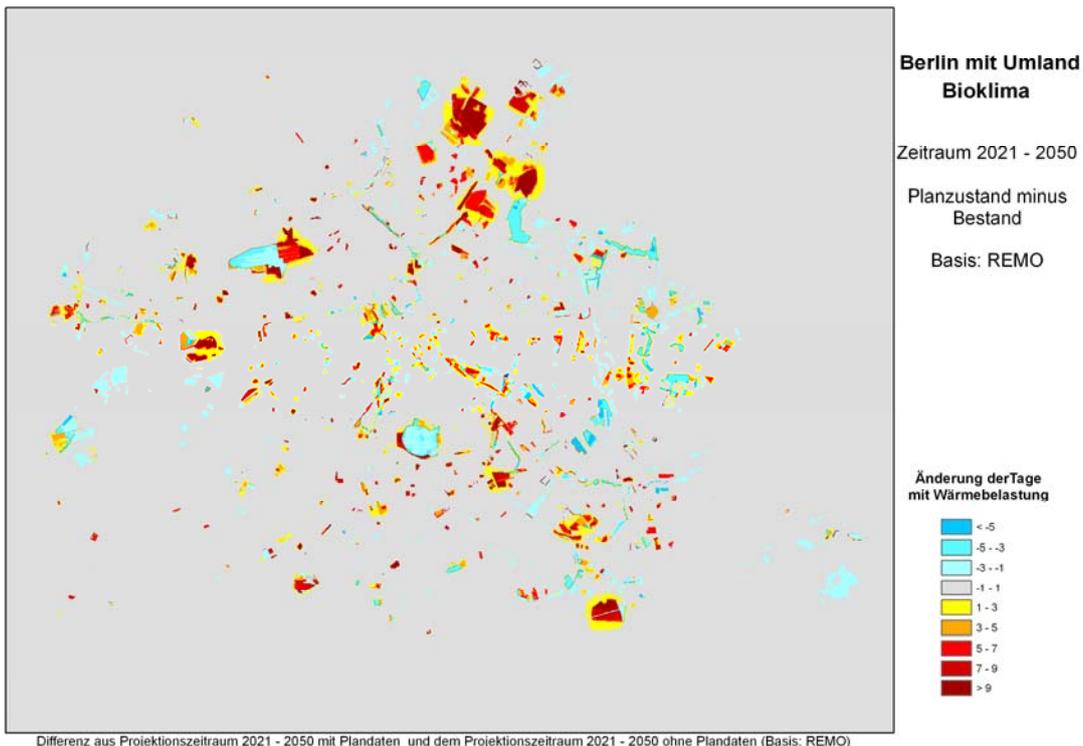
5.4 Projektionsergebnisse mit Nutzungsänderungen

Um neben den globalen Klimawandeleffekten auch lokale Klimaänderungen (Karte 9) zu berücksichtigen, wurde die Nutzung des Bestands im Bereich der Flächen mit Veränderungspotenzialen (siehe Kapitel 4.2) durch die geplante Nutzung ersetzt. Da der Zeithorizont dieser Umnutzungen in der ersten Hälfte des Jahrhunderts liegt, wurden die Projektionen ausschließlich für den Zeitraum 2021 – 2050 gerechnet.

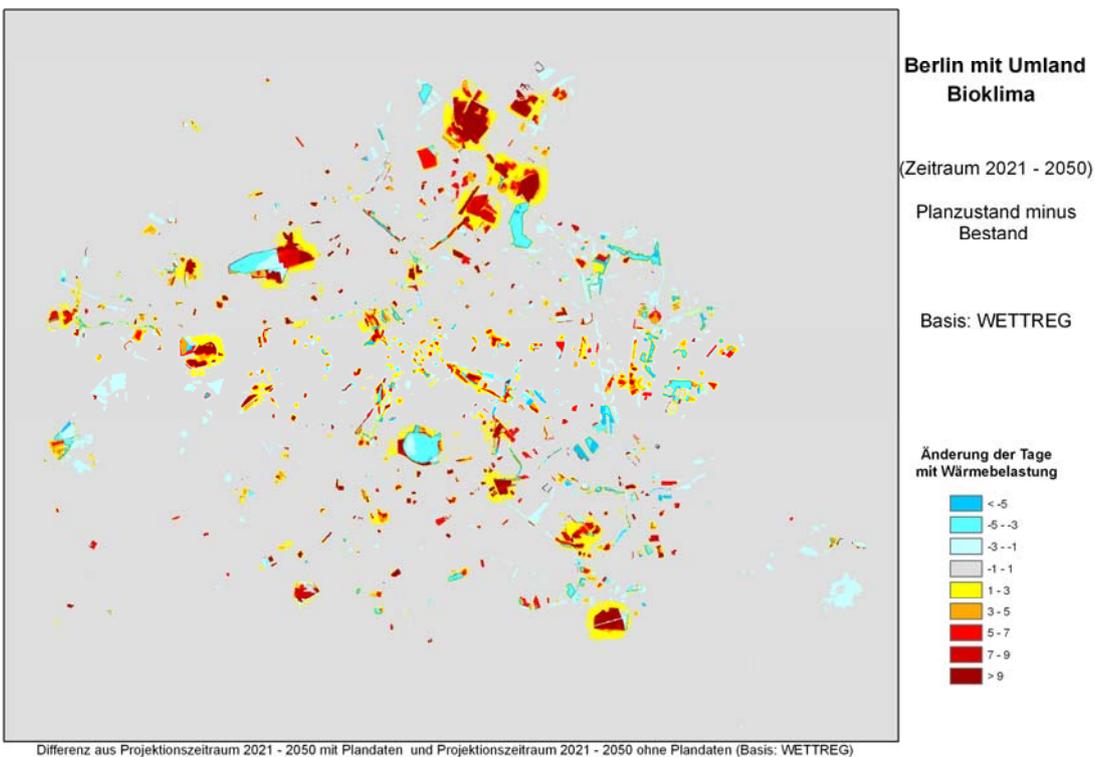
Die Karten 10a, b zeigen für beide Modellläufe den Unterschied, der sich durch die Umnutzung bis zur Mitte des Jahrhunderts ergibt (Planzustand 2021-2050 minus Bestand 2021-2050). Dabei sind die Unterschiede von der Flächennutzungsart sowohl im Bestand als auch in der Planung abhängig. Eine Ausweitung oder Verdichtung der Bebauung mit zusätzlicher Versiegelung führt zwangsläufig zu einer Zunahme der Wärmebelastung. Wo auf Wiesen Neubaugelände entstehen - wie ganz augenfällig im Norden Berlins - liegt die Änderung etwa auf dem Niveau, das für den Innenstadtbereich aufgrund des globalen Klimawandels prognostiziert wird, und darüber. Wo dagegen Parkanlagen mit einem bedeutenden Anteil an Schatten spendenden Bäumen entstehen, entschärft sich die thermische Situation, was bei gleichzeitiger Entsiegelung wie beispielsweise auf dem ehemaligen Fluggelände Tempelhof besonders deutlich ausfällt.



Karte 9 Änderung der Gefühlten Temperatur an einem windschwachen, wolkenlosen Sommertag nachmittags durch Umnutzung aller Flächen mit Veränderungspotenzialen

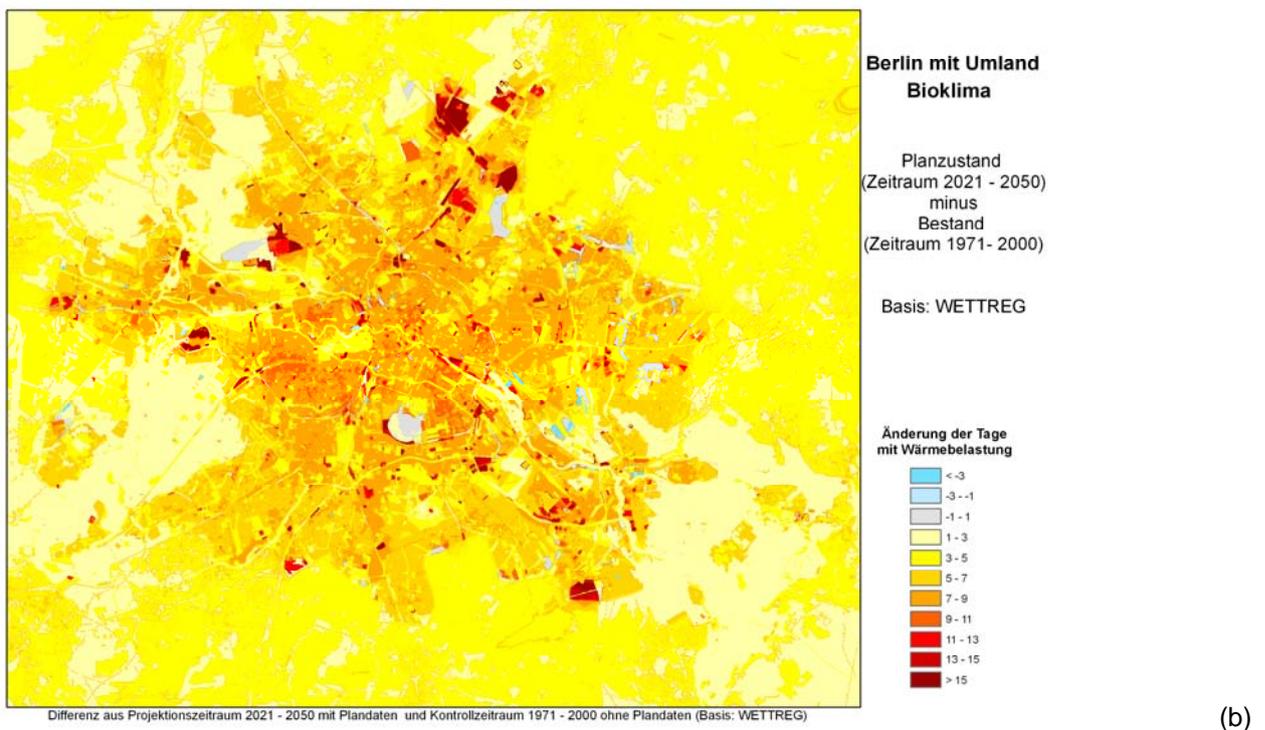
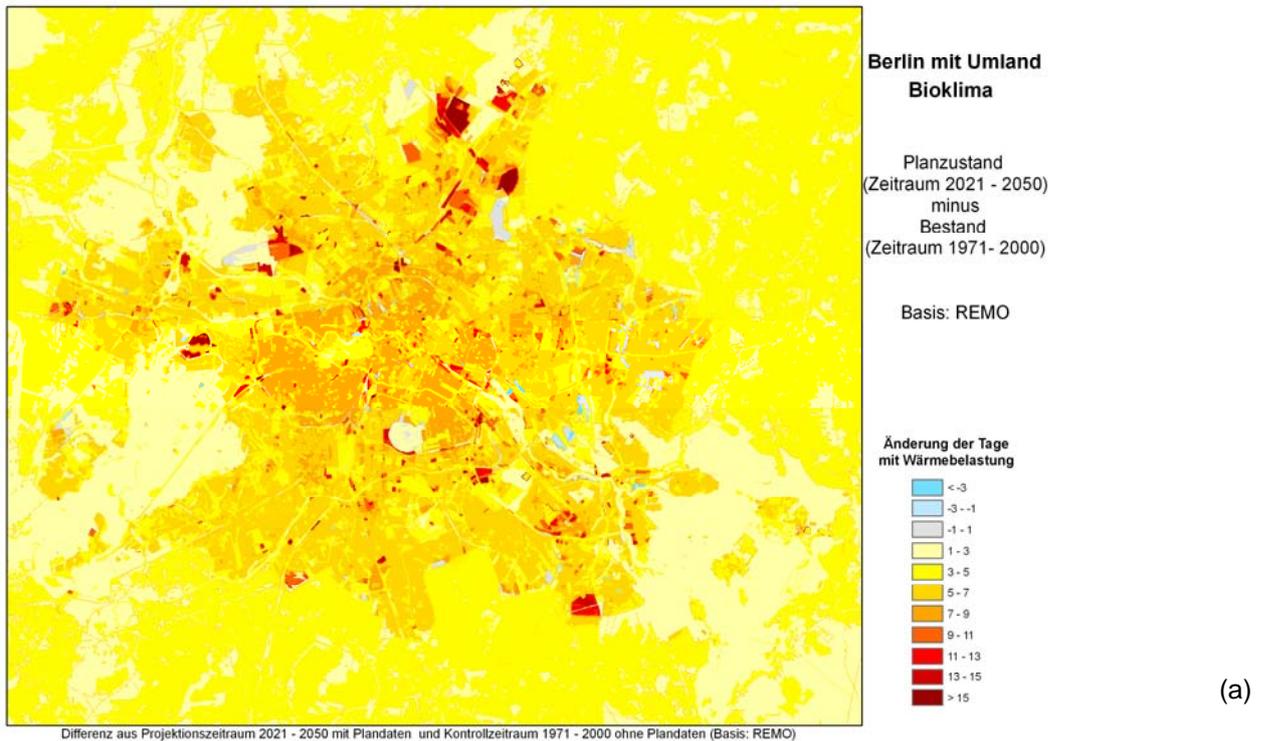


(a)



(b)

Karte 10a, b Änderung der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung (Jahresmittel) durch die Umnutzung aller Projektgebiete mit gesamtstädtischem Veränderungspotenzial für den Projektionszeitraum 2021 – 2050 mit REMO-Antrieb (a), WETTREG-Antrieb (b)



Karte 11a, b Änderung der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung (Jahresmittel) durch die Umnutzung aller Projektgebiete mit gesamtstädtischem Veränderungspotenzial **und** den globalen Klimawandel für den Projektionszeitraum 2021 – 2050 gegenüber dem Kontrollzeitraum 1971 – 2000 mit REMO-Antrieb (a), WETTREG-Antrieb (b)

In den Karten 11a, b wurde die Änderung erfasst, die sich sowohl durch globale als auch lokale Klimawandeleffekte in der Mitte des Jahrhunderts gegenüber heute ergibt (Planzustand 2021-2050 minus Bestand 1971 – 2000). Auffällig treten die Bereiche der großen geplanten Gewerbe/ Industriestandorte im Norden und Südosten Berlins hervor. Hier wird bereits Mitte des Jahrhunderts 1,5-mal häufiger die Schwelle zu starker Wärmebelastung überschritten als heute. Positive Effekte sind dagegen in denjenigen Gebieten zu verzeichnen, in denen es Pläne für neue Parkanlagen gibt. Es wird hier kaum zu einem Mehr an Wärmebelastungstagen kommen, teilweise stellt sich die Situation sogar entspannter dar als heute.

6 Schlussbemerkungen

Die vorgestellten Untersuchungen im Rahmen der Kooperation mit der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung von Berlin bauen bezüglich des Einsatzes der Regionalmodelle auf den Erfahrungen des beim Deutschen Wetterdienst angesiedelten Projektes ZWEK (Zusammenstellung von Wirkmodell-Eingangsdatensätzen für die Klimafolgenabschätzung) auf (Deutschländer et al., 2009). Dort wird darauf hingewiesen, dass erst die Zusammenschau mehrerer Modellsimulationen eine Aussage über die Zuverlässigkeit der gefundenen Ergebnisse näherungsweise erlaubt. Die Interpretation der Ergebnisse sollte grundsätzlich und gleichwertig die gesamte Ergebnispalette beinhalten (Ensemble-Betrachtung).

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde das Stadtbioklimamodell bislang von den Resultaten zweier Regionalmodelle mit sehr unterschiedlicher Modellphilosophie angetrieben. Mit dem Einsatz weiterer Regionalmodelle ließe sich der Ensemble-Technik eher gerecht werden. Es wird deshalb die Simulation mit weiteren Ensemble-Mitgliedern (zunächst STAR) angestrebt.

Ferner können die Ergebnisse genutzt werden, um anhand typischer städtischer Flächennutzungen qualitative Einschätzungen der voraussichtlich zukünftigen Entwicklung des Stadtklimas im Allgemeinen abzuleiten.

Von Seiten der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin ist vorgesehen, die Ergebnisse (unter Berücksichtigung der fachlich gebotenen Einschränkungen) als wesentliche Hilfe in den laufenden Prozess der Erarbeitung eines Stadtentwicklungsplanes Klima einfließen zu lassen (Stand 12.01.2010).

Darüber hinaus ist vorgesehen, die Ergebnisse dieser Kooperation auf den Seiten des digitalen Umweltatlas Berlin zu veröffentlichen.

7 Literatur

Deutscher Wetterdienst, 2008: Vorschriften und Betriebsunterlagen Nr.8. Metainformationen zum Mess- und Beobachtungsnetz des Deutschen Wetterdienstes. Interne Unterlagen des Deutschen Wetterdienstes.

Deuschländer, T., M. Koßmann, T. Steigerwald, J. Namyslo, 2009: Verwendung von Klimaprojektionsdaten für die Stadtklimasimulation. Klimastatusbericht 2008. Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 13 - 17

Deuschländer, T., 2009: Persönliche Mitteilung, Deutscher Wetterdienst, (Veröffentlichung geplant)

Fanger, P.O., 1972: Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering. McGraw-Hill, New York.

Friedrich, M., A. Grätz, G. Jendritzky, 2001: Further development of the urban bioclimate model UBIKLIM, taking lokal wind systems into account. Meteorol. Z. 10, 267 – 272.

Gagge, A.P., A.P. Fobelets, L.G. Berglund, 1986: A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment. In: ASHRAE Trans., Vol. 92, 709-731

IPPC, 2001: Climate Change 2001: the scientific basis. In: Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, J. Bruce, H. Lee, B.A. Callender, E. Haites, N. Harris, K. Maskell, eds. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge- New York: Cambridge University Press.

Jacob, D., 2005: REMO Climate of the 20th century run No. 006210, 1950-2000 und A1B scenario run No. 006211, 2001-2100. UBA Project, 0.088 degree resolution, 1h Data. CERA-Datenbank: <http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/BrowseExperiments.jsp?proj=REMO-UBA>

Jendritzky, G., G. Menz, H. Schirmer, W. Schmidt-Kessen, 1990: Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). - Beitr. Akad. Raumforsch. Landespl. 114.

Kreienkamp, F., W. Enke, 2006: WETTREG 20C control run 1961-2000 und WETTREG A1B scenario run 2001-2100, UBA Project. (CERA-Datenbank: <http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/BrowseRxpériences.jsp?proj=WETTREG-UBA> (Stand04/2009))

Piehl, H.-D., A. Grätz, 1996: Klimakarten für das Land Berlin. Teil1: Bioklima. Deutscher Wetterdienst, Potsdam.

Roeckner, E., R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, L. Kornblueh, E. Manzini, U. Schlese, U. Schulzweida, 2006: Sensitivity of Simulated Climate to Horizontal and Vertical Resolution in the ECHAM5 Atmosphere Model. J. Climate 19, 3771 – 3791.

Staiger, H., K. Bucher, G., Jendritzky, 1997: Gefühlte Temperatur. Die physiologisch gerechte Bewertung von Wärmebelastung und Kältestress beim Aufenthalt im Freien mit der Maßzahl Grad Celsius. In: Annalen der Meteorologie 33, Offenbach, 100 – 107.

VDI, 1998: Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima. - VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2.

8 Abkürzungsverzeichnis

ALK	Automatisierte Liegenschaftskarte
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
GT	Gefühlte Temperatur
ISU	Informationssystem Stadt und Umwelt
ISU5	Blockkarte 1:5000 des Informationssystems Stadt und Umwelt, Stand 31.12.2005
MUKLIMO_1	eindimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell
REMO	regionales Klimamodell
STAR	statistisches Regionalmodell
UBIKLIM	Stadtbioklimamodell des Deutschen Wetterdienstes
WETTREG	Wetterlagen basierte Regionalisierungsmethode
ZWEK	Zusammenstellung von Wirkmodell-Eingangsdatensätzen für die Klimafolgenabschätzung

9 Internetquellen

Informationen zum Klimawandel:

<http://www.dwd.de/klimawandel>

Informationen zu amtlichen Warnungen:

<http://www.dwd.de/hitzewarnung>

Informationssystem Stadt und Umwelt Berlin:

http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/info_system/index.shtml

Digitaler Umweltatlas Berlin:

<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/index.shtml>

Stadtentwicklungsplan Klima der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin:

<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/stadtentwicklungsplanung/> (in Vorbereitung, Stand Januar 2010)

10 **Ansprechpartner**

Deutscher Wetterdienst

Projektleitung :

Frau Dipl.-Met. Ursel Behrens

Anschrift:

Deutscher Wetterdienst
Regionale Klima- und Umweltberatung Potsdam
Michendorfer Chaussee 23 Hs. 2
14473 Potsdam

Tel: +49 -331-316280

Fax: +49-331-316299

mailto: ursel.behrens@dwd.de

Bearbeitung:

Frau Dipl.-Met. Angelika Grätz

Anschrift:

Deutscher Wetterdienst
Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung Freiburg
Stefan-Meier-Str. 4
79104 Freiburg

Tel: +49 -761-2820260

Fax: +49-761-2820277

mailto: angelika.graetz@dwd.de

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin

Projektleitung:

Jörn Welsch III F 12

Anschrift:

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung
Abteilung Geoinformation
Informationssystem Stadt und Umwelt
Fehrbelliner Platz 1, Zimmer 4031
10707 Berlin

Tel: +49-30-90122256

Fax +49-30-90122251

mailto: joern.welsch@senstadt.berlin.de