



Berichte des Deutschen Wetterdienstes

237

**Frankfurt am Main im Klimawandel –
Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung**

von
Barbara Früh
Meinolf Koßmann
Marita Roos

Zitationsvorschlag:

Früh, Barbara ; Koßmann, Meinolf ; Roos, Marita (Hrsg.: Deutscher Wetterdienst): Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung.
Offenbach am Main : Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 2011.
(Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 237)
ISBN 978-3-88148-453-4

ISSN 0072-4130

ISBN 978-3-88148-453-4

Nutzungsbedingungen

Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz



Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden und es darf nicht bearbeitet, abgewandelt oder in anderer Weise verändert werden.

Mit der Verwendung dieses Dokumentes erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Herausgeber und Verlag:

Deutscher Wetterdienst
Frankfurter Straße 135
D- 63067 Offenbach am Main
Internet: www.dwd.de
Mail: bibliothek@dwd.de

Anschrift der Autoren:

Früh, Barbara
Koßmann, Meinolf
Roos, Marita
Deutscher Wetterdienst
Abteilung Klima- und Umweltberatung
Frankfurter Straße 135
D- 63067 Offenbach am Main

INHALT	Seite
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	9
Summary 11	
Zusammenfassung	13
1 Einleitung	15
2 Klimatologische Zeitreihen der Lufttemperatur	17
3 Methodik	23
3.1 Allgemeine Erläuterungen	23
3.2 Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3	24
3.3 Quadermethode	27
3.4 Klimazeitreihen für die Quadermethode	31
4 Modellkonfiguration für Frankfurt am Main	33
4.1 Das MUKLIMO_3 Modellgebiet	33
4.2 Der Quader	36
4.3 Verwendete Zeitreihen	38
4.4 Modellsimulation für einen Tag	40
5 Ergebnisse für den Zeitraum 1971 - 2000	42
5.1 Evaluierung der simulierten Klimaindizes	42
5.2 Analyse des Ist-Zustands 1971 - 2000	43
5.3 Auswirkungen unterschiedlicher Bebauungsstrukturen	46
5.4 Auswirkungen der geplanten Bebauung	49
5.5 Regionale Klimaprojektionen als Eingabe für die Quader-Methode	52
6 Klimaänderungssignale in der Zukunft	55
6.1 Auswirkung der Klimaänderung bis zum Zeitraum 2021 - 2050	55

6.2	Auswirkung der geplanten Bebauung im Zeitraum 2021 - 2050	60
6.3	Auswirkung der Klimaänderung zum Ende des Jahrhunderts	62
7	Schlussbemerkungen	64
8	Literatur	65
9	Ansprechpartner	68

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 2-1: Jahresmittel der Lufttemperatur für Flughafen Frankfurt/Main und Frankfurt/M.-Stadt (1950 - 2009). Die Jahresmittel der Flughafenstation sind mit einer linearen Trendlinie und deren 90% Konfidenzintervall versehen. Die Dreiecke kennzeichnen die Mittelwerte über die Messperioden der verschiedenen Stadtstationen. 19
- Abbildung 2-2: Differenzen der Lufttemperatur (Jahresmittel von 1950 - 2009) zwischen den Stadtstationen in Frankfurt/M. und dem Flughafen Frankfurt/M. (rot – positive, blau – negative Abweichung). 19
- Abbildung 2-3: Jahresmittel des täglichen Maximums der Lufttemperatur für Flughafen Frankfurt/Main und Frankfurt/M.-Stadt (1950 - 2009). Die Jahresmittel der Flughafenstation sind mit einer linearen Trendlinie und deren 90% Konfidenzintervall versehen. Die Dreiecke kennzeichnen die Mittelwerte über die Messperioden der verschiedenen Stadtstationen. 20
- Abbildung 2-4: Jahresmittel des täglichen Minimums der Lufttemperatur für Flughafen Frankfurt/Main und Frankfurt/M.-Stadt (1950 - 2009). Die Jahresmittel der Flughafenstation sind mit einer linearen Trendlinie und deren 90% Konfidenzintervall versehen. Die Dreiecke kennzeichnen die Mittelwerte über die Messperioden der verschiedenen Stadtstationen. 20
- Abbildung 2-5: Jahresmittel der Anzahl Sommertage, der heißen Tage und der Tropennächte für Flughafen Frankfurt/Main und Frankfurt/M.-Stadt (1950 - 2009). Die Jahresmittel der Flughafenstation sind mit einer linearen Trendlinie und deren 90% Konfidenzintervall versehen. Die Dreiecke kennzeichnen die Mittelwerte über die Messperioden der verschiedenen Stadtstationen. 21
- Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der räumlichen Verfeinerung (Downscaling) der Klimasimulationsrechnungen von der globalen Skala zur städtischen Skala. Die auf IPCC Emissionsszenarien basierenden globalen Klimasimulationen dienen als Antrieb für ein Ensemble höher auflösender regionaler Klimamodelle. Die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle dienen wiederum als Eingabedaten des Stadtklimamodells MUKLIMO_3 zur Berechnung der Änderung des urbanen Klimas. 23
- Abbildung 3-2: Skizze des Quaders zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der multiplen linearen Interpolation. Die Quadereckpunkte werden durch Tagesmittelwerte der Lufttemperatur T , der relativen Luftfeuchtigkeit r_h und der Windgeschwindigkeit v bestimmt und sind für Frankfurt/M. in Tabelle 4-1 aufgelistet. 28
- Abbildung 3-3: Skizze der Arbeitsschritte zur Berechnung der räumlich hoch aufgelösten Änderung der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen in einer Stadt basierend auf 30-jährigen regionalen Klimazeitreihen, die als Tageswerte entweder aus Beobachtungen oder regionalen Klimaprojektionen vorliegen. Weitere Details sind im Text erläutert. 30

Abbildung 3-4: Änderung der Jahresmitteltemperatur im Mittel über Deutschland aus den Klimaprojektionsrechnungen für Vergangenheit und Zukunft (C20 und A1B) im Vergleich zur Referenzperiode 1971 - 2000.....	32
Abbildung 4-1: Karte der Geländehöhe für das MUKLIMO_3 Modellgebiet, das um 30° gegen Nord gedreht ist. Die Position der DWD-Messstationen sind mit einem '+' für den Flughafen Frankfurt/Main und einem 'o' für Offenbach gekennzeichnet.	33
Abbildung 4-2: Karte der Landnutzung: 2 – Siedlung (locker); 3 – Wald; 4 – Park; 5 – Gewerbe (dicht); 6 – Gewerbe (locker); 7 – Freiflächen; 9 – Wasser; 10 – Bankenviertel; 11 – Ein- u. Mehrfamilienhäuser (locker); 12 – Dorfkern u. Einfamilienhaussiedlung (dicht); 13 – Reihenhaussiedlung; 14 – Zeilenbebauung (mittel); 15 – Zeilenbebauung (dicht) & Hochhäuser; 16 – Blockbebauung; 17 – City ab Mitte 19. Jh.; 18 - Historischer Stadtkern; 51 – Gleise; 52 – Kleingärten. Eingetragen sind zusätzlich die Stadtgrenzen von Frankfurt/M. und Offenbach.	34
Abbildung 4-3: Beispiele zu ausgewählten Landnutzungsklassen in Frankfurt/Main (Fotos DWD).....	35
Abbildung 4-4: Überblick über die Orographie des Rhein-Main-Gebietes mit MUKLIMO_3 Modellgebiet (grün schattierte Fläche), Flächen verwendeter REMO- bzw. CLM-Gitterzellen (gestrichelte bzw. gepunktete Linie), DWD-Stationen Geisenheim, Kahl am Main und Flughafen Frankfurt/Main (rote Dreiecke).....	38
Abbildung 4-5: Häufigkeitsverteilung der beobachteten stündlichen Windrichtung an der Station Flughafen Frankfurt/Main im Zeitraum 1971 - 2000.	39
Abbildung 4-6: Karte der 2 m Lufttemperatur gemeinsam mit dem horizontalen Windvektor in 5 m Höhe um 18 MESZ (a) und 02 MESZ (b) für die nordöstliche Anströmung mit der Initialisierung $T_{c,max} = 25 \text{ °C}$, $rh_{c,min} = 42\%$ und $v_{c,min} = 0,7 \text{ m/s}$	41
Abbildung 5-1 Karten der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage (a) und Sommerabende (b) für den Evaluierungslauf 1971 - 2000. Die Position der DWD-Messstationen sind mit einem '+' für den Flughafen Frankfurt/Main und einem 'o' für Offenbach gekennzeichnet.	44
Abbildung 5-2: Kartenausschnitte aus Abbildung 5-1 für den Innenstadtbereich von Frankfurt/Main. Das Bankenviertel ist mit einem Kreis markiert. Mittlere jährliche Anzahl Sommertage (a) und Sommerabende (b) für 1971 - 2000 (EVAL).....	45
Abbildung 5-3: Kartenausschnitte aus Abbildung 5-1 für den Flughafen von Frankfurt/Main. Mittlere jährliche Anzahl Sommertage (a) und Sommerabende (b) für 1971 - 2000 (EVAL).....	46
Abbildung 5-4: Box-Whisker-Plots für jede Landnutzungsklasse im Mittel über das Stadtgebiet von Frankfurt für 1971 - 2000 (EVAL), sowohl für die mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen (a) als auch Sommerabenden (b). Die beiden linken Klassen beziehen sich jeweils auf die Anzahl Tage gemittelt über alle Landnutzungen (1. Klasse von links) bzw.	

gemittelt über alle Landnutzungen mit Ausnahme des Waldes (2. Klasse von links). Die Zahlen über den Box-Whiskers geben die Anzahl der Gitterzellen für jede Landnutzungs-kategorie an. ... 48

Abbildung 5-5: Geplante Landnutzung (a) im Vergleich zur bisherigen Landnutzung (b): 3 – Wald; 4 - Park; 5 – Gewerbe (dicht); 6 – Gewerbe (locker); 7 – Freiflächen; 9 – Wasser; 10 – Bankenviertel; 11 - Ein- Mehrfamilienhaus (locker); 12 – Dorfkern u. Einfamilienhaussiedlung (dicht); 13 - Reihenhaussiedlung; 14 – Zeilenbebauung (mittel); 15 – Zeilenbebauung (dicht) & Hochhäuser; 16 - Blockbebauung; 17 – City ab Mitte 19. Jh. 49

Abbildung 5-6: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage (a) und Sommerabende (b) auf Grund der geplanten Landnutzungsänderungen für 1971 - 2000 (EVAL). 50

Abbildung 5-7: Kartenausschnitte für den Bereich Hauptgüterbahnhof mit geplanter Landnutzung (a). Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage (b) und der Anzahl Sommerabende (c) im Vergleich zum Ist-Zustand (Abbildung 5-1), jeweils für 1971 - 2000 (EVAL). 51

Abbildung 5-8: Kartenausschnitte für den Bereich im Norden Frankfurts mit geplanter Landnutzung (a). Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage (b) und der Anzahl Sommerabende (c) im Vergleich zum Ist-Zustand (Abbildung 5-1), jeweils für 1971 - 2000 (EVAL). 51

Abbildung 5-9: Karte der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage $N_{T_{max} \geq 25}$ aus REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d) für 1971 - 2000 (C20). 53

Abbildung 5-10: Box-Whisker-Plots für die Anzahl Sommertage (a) und Sommerabende (b) gemittelt über das Stadtgebiet von Frankfurt für EVAL (grau), REMO (blau), CLM (rot), WETTREG (grün) und STAR (magenta) für den Zeitraum 1971 - 2000. 54

Abbildung 6-1: Karten der Änderungen der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage $\Delta N_{T_{max} \geq 25}$ als Differenz zwischen den Zeiträumen 2021 - 2050 (A1B) und 1971 - 2000 (C20) für REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d). 55

Abbildung 6-2: Karten der Änderungen der mittleren jährlichen Anzahl Sommerabende $\Delta N_{T_{22} \geq 20}$ als Differenz zwischen den Zeiträumen 2021 - 2050 (A1B) und 1971 - 2000 (C20) für REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d). 57

Abbildung 6-3: Box-Whisker-Plots für die Änderung der mittleren jährliche Anzahl der Sommertage und Sommerabende 2021 - 2050 (A1B) im Vergleich zu 1971 - 2000 (C20) für REMO (blau), CLM (rot), STAR (magenta) und WETTREG (grün), gemittelt über das Stadtgebiet von Frankfurt. 58

Abbildung 6-4: Box-Whisker-Plots für alle Landnutzungs-klassen getrennt für die Änderung der Anzahl Sommertage 2021 - 2050 (A1B) im Vergleich zu 1971 - 2000 (C20) gemittelt über das Stadtgebiet von Frankfurt. Die Ergebnisse für REMO (schräg schraffiert), CLM (ausgefüllt),

WETTREG (längs schraffiert) und STAR (kreuz schraffiert) sind für jede Landnutzung in dieser Reihenfolge dargestellt..... 60

Abbildung 6-5: Karten der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage auf Grund der Landnutzungsänderung und Klimaänderung bis 2021 - 2050 (A1B) im Vergleich zu 1971 - 2000 (C20), für REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d). 61

Abbildung 6-6 Box-Whisker-Plots für die Änderung der klimatologischen Kenntage bis 2071 - 2100 (A1B) im Vergleich zu 1971 - 2000 (C20) für REMO (blau), CLM (rot) und WETTREG (grün) im Mittel über das Stadtgebiet von Frankfurt. 63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Mittelwerte verschiedener Kenngrößen der Lufttemperatur für Frankfurt/M. über die Messperioden der verschiedenen Stadtstationen. 1. Zeile: Stadtstation / Flughafen, 2. Zeile: Differenz Stadtstation minus Flughafen. In der rechten Spalte sind die entsprechenden Werte für den Zeitraum 1950 - 2009 ergänzt.	22
Tabelle 3-1: Statistische Parameter zur Beschreibung der städtischen Bebauung für die MUKLIMO_3 Landnutzungsklassen: mittlerer Gebäudegrundflächenanteil γ_b , mittlere Gebäudehöhe h_b in m, mittlerer Wandflächenindex w_b und mittlerer Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden ν	25
Tabelle 4-1: Tagesmittelwerte bodennaher Klimaparameter am Fallbeispiel Frankfurt/M. für die in Abbildung 3-2 illustrierten acht Eckpunktsimulationen der Quadermethode	37
Tabelle 5-1: Vergleich der beobachteten und simulierten klimatologischen Kenntage für 1971 - 2000 (mittlere jährliche Anzahl der Tage). Die Werte OBS stammen von den angegebenen DWD-Messtationen (siehe Abbildung 5-1). Die Werte unter EVAL resultieren aus der Quadermethode (siehe Text). Proz. Abw. steht für prozentuale Abweichung von EVAL zu OBS.....	42
Tabelle 5-2: Räumliches Mittel über das Stadtgebiet von Frankfurt, Minimum und Maximum der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage und Sommerabende auf Grund von Landnutzungsänderungen.....	50
Tabelle 5-3: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage zusammen mit dem räumlichen Mittel des Konfidenzintervalls auf dem 90% Signifikanzniveau für EVAL, REMO, CLM, WETTREG und STAR, jeweils bezogen auf das Stadtgebiet von Frankfurt (1971 - 2000).....	54
Tabelle 6-1: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage ($\Delta N_{T_{\max} \geq 25}$) zusammen mit dem räumlichen Mittel des Konfidenzintervalls auf dem 90% Signifikanzniveau für REMO, CLM, WETTREG und STAR. Die Werte zeigen die Differenz zwischen den Zeiträumen 2021 - 2050 (A1B) und 1971 - 2000 (C20), gemittelt über das Stadtgebiet von Frankfurt.....	56
Tabelle 6-2: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommerabende ($\Delta N_{T_{22} \geq 20}$) zusammen mit dem räumlichen Mittel des Konfidenzintervalls auf dem 90% Signifikanzniveau für REMO, CLM, WETTREG und STAR. Die Werte zeigen die Differenz zwischen den Zeiträumen 2021 - 2050 (A1B) und 1971 - 2000 (C20), gemittelt über das Stadtgebiet von Frankfurt.....	58
Tabelle 6-3: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage ($\Delta N_{T_{\max} \geq 25}$) für REMO, CLM, WETTREG und STAR. Die Werte zeigen die Differenz zwischen dem Zeitraum 2021 - 2050 (A1B) mit geplanter Landnutzungsänderung und 1971 - 2000 (C20), gemittelt über das Stadtgebiet von Frankfurt.....	62

Tabelle 6-4: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl **Sommerabende** ($\Delta N_{T_{22} \geq 20}$) für REMO, CLM, WETTREG und STAR. Die Werte zeigen die Differenz zwischen dem Zeitraum 2021 - 2050 (A1B) mit geplanter Landnutzungsänderung und 1971 - 2000 (C20), gemittelt über das Stadtgebiet von Frankfurt.62

Summary

The high building density and the energy consumption in a town or city generate a distinct "urban climate" which varies significantly from that of the rural surrounding. Such urban climates are characterised, for example, by a higher urban air temperature leading to the formation of so-called urban heat islands. According to projections from regional climate simulations, climate change will cause increasing air temperatures during the next decades. Therefore, particularly high heat load is expected in urban environments due to the combined effects of urban heat islands and climate change. With already more than half of the world's population living in urban areas, this is of fundamental concern to mankind.

Climate change is taking place already: the German Meteorological Service's (Deutscher Wetterdienst) 60-year time series of air temperatures recorded at Frankfurt airport shows a significant increase in the mean annual air temperature of +0.35 °C per decade. The annual mean number of 'summer days', i. e. days with a maximum air temperature of 25 °C or higher, shows an equally significant trend of +4.6 days per decade. If this trend continues unchanged, an average increase of 21 additional summer days per year would have to be expected for the climate period 2021 - 2050 compared to the climate period 1971 - 2000. However, reliable evaluations need to take into account the expected changes induced by the emission of climate-relevant trace gases and therefore need to be based on available global and regional climate projections.

The impact of climate change on detailed urban structures was therefore investigated, by downscaling of regional climate projections using an urban climate model and the newly developed cuboid method (Früh et al., 2011). The cuboid method allows, for the first time, to simulate both past and future heat load in Frankfurt am Main considering the manifold types of building structures and other forms of land use within the city. The study also examined possible climatic effects of some larger urban planning projects.

On the basis of the rather moderate IPCC emission scenario A1B, an increase in the annual mean number of summer days from currently 44 days by 5 to 31 additional days has to be expected for the city area of Frankfurt until 2050. This means that by the middle of the century, every second to fourth day in the summer term will be warmer than 25 °C in Frankfurt. At the same time, the annual mean number of 'summer evenings', i. e. evenings on which the temperature at 10 p.m. still exceeds 20°C, will increase by 5 to 33 days.

The numbers of 'hot days' (with maximum temperatures of at least 30 °C) and 'tropical nights' (with minimum air temperatures not below 20 °C) will also increase significantly. Due to the currently low number of such days no reliable statements about the future trend can be made. This also applies to all studies undertaken for the climate period 2071 - 2100.

The analysed increase of summer days, shows no significant difference between high density and low density built-up areas until the middle of the century. This means that heat loads will increase at a rather uniform rate and be highest where they are highest already today. Contrary

to possibly expected, the discrepancies between urban and rural areas will not intensify significantly. However, the probability of extremely hot summers (like 2003 for example) will increase until the middle of the century.

When taking a closer look at various types of building structures in Frankfurt, the model results also show that already today highest heat loads occur in high density areas, such as the city centre, with up to 54 summer days per year. Thanks to their shadows, high-rise buildings, such as those in Frankfurt's financial district, might slightly mitigate the thermal effects caused by high density building structures during daytime. However, since they cause very high nocturnal heat island intensities, the construction of high-rise buildings can in no way be considered as an appropriate adaptation measure.

Apart from studying the impacts to be expected from regional climate changes, the study also investigates the possible effects of the urban restructuring processes that are already planned for Frankfurt. The results show that the change of built-up areas into green spaces would reduce the increase in summer days and summer evenings expected due to climate change by about 50%. Inversely, densification of building structures would nearly double the expected number of additional summer days and summer evenings due to regional climate change. However, the simulated urban restructuring projects for Frankfurt will only have local impacts. In order to counteract the projected regional warming everywhere in the city, climate-favouring urban development is necessary in as many parts of the city as possible. In view of future climate conditions, the importance of parks and green spaces is increasing tremendously.

Zusammenfassung

Innerhalb einer Stadt bildet sich durch die dichte Bebauung und den erhöhten Energieumsatz gegenüber dem Umland ein davon deutlich abweichendes „Stadtklima“ aus. Dieses ist beispielsweise durch eine höhere Temperatur in der Stadt gekennzeichnet, welche zur Ausbildung der sogenannten städtischen Wärmeinsel führt. Zudem lassen regionale Klimamodelle für die nächsten Jahrzehnte Klimaänderungen erwarten, die sich in den städtischen Ballungsräumen durch die Überlagerung mit der städtischen Wärmeinsel deutlich belastender auswirken als im Umland. Dies ist für die Menschen von elementarem Interesse, da bereits heute mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung in Städten lebt.

Der Klimawandel findet bereits statt: 60-jährige Messungen des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen Frankfurt/Main belegen einen signifikanten Anstieg des Jahresmittels der Lufttemperatur von 0,35 °C pro Dekade. Die Anzahl der mittleren jährlichen Sommertage, das sind Tage an denen die Lufttemperatur 25 °C erreicht oder überschreitet, weist ebenfalls einen signifikanten Trend von 4,3 Tagen pro Dekade auf. Wenn dieser beobachtete Trend unverändert weiterginge, so wären für die Klimaperiode 2021 - 2050 durchschnittlich etwa 21 Sommertage pro Jahr mehr als in der Klimaperiode 1971 - 2000 zu erwarten. Eine zuverlässige Abschätzung muss jedoch die erwartete Änderung klimarelevanter Spurenstoffe berücksichtigen und daher auf den verfügbaren globalen und regionalen Klimaprojektionen basieren.

Ziel der Untersuchung war es deshalb, auf der Basis von Projektionen regionaler Klimamodelle die Auswirkungen des Klimawandels für detaillierte Stadtstrukturen aufzuzeigen. Mit Hilfe eines Stadtklimamodells und der am Beispiel Frankfurt/Main entwickelten sogenannten „Quadermethode“ (Früh et al., 2011) konnte erstmals sowohl die vergangene als auch die zukünftige Wärmebelastung für Frankfurt am Main unter Berücksichtigung der vielfältigen Bebauungsstrukturen und sonstiger Flächennutzungen simuliert werden. Auch die klimatischen Auswirkungen der größeren Planungsvorhaben der Stadt wurden in diesem Zusammenhang untersucht.

Auf der Grundlage des moderaten IPCC Emissionsszenarios A1B ergibt sich für das Stadtgebiet von Frankfurt bis zum Jahr 2050 eine Zunahme der mittleren jährlichen Anzahl von Sommertagen von derzeit etwa 44 Tagen pro Jahr, um weitere 5 bis 31 Tage. Damit wird Mitte des Jahrhunderts im Sommerhalbjahr jeder zweite bis vierte Tag in Frankfurt wärmer als 25 °C sein. Gleichzeitig wird auch die mittlere jährliche Anzahl „Sommerabende“, das sind Abende an denen es um 22 Uhr noch mindestens 20 °C warm ist, um 5 bis 33 Tage ansteigen.

Auch die Anzahl der „heißen Tage“ mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 °C und der Tropennächte mit Lufttemperaturen, die nicht unter 20 °C sinken, wird deutlich zunehmen. Aufgrund der heute noch geringen Anzahl solcher Tage lassen sich für die Zukunft derzeit keine verlässlichen Aussagen treffen. Dies gilt auch für alle Untersuchungen, die für die Klimaperiode 2071 - 2100 durchgeführt wurden.

Die Studie zeigt, dass die Zunahme der Sommertage bis Mitte des Jahrhunderts sich nicht signifikant zwischen dicht und locker bebauten Stadtteilen unterscheidet. Die Wärmebelastung wird also gleichermaßen stark zunehmen und zukünftig auch dort am höchsten sein wo sie es heute schon ist. Die Unterschiede zwischen Stadt und Umland werden sich aber nicht wie befürchtet verschärfen. Aber die Wahrscheinlichkeit, dass Hitzesommer – wie beispielsweise im Jahr 2003 – häufiger auftreten werden, nimmt bis Mitte des Jahrhunderts zu.

Betrachtet man unterschiedliche Bebauungsstrukturen in Frankfurt, so belegen die Modellergebnisse zusätzlich, dass in dicht bebauten Gebieten, wie zum Beispiel der Innenstadt, die Wärmebelastung mit bis zu 54 Sommertagen pro Jahr bereits heute am stärksten ist. Hochhäuser, wie im Frankfurter Bankenviertel, können den Effekt dichter Bebauung zwar durch ihre abschattende Wirkung zumindest tagsüber etwas mildern. Da allerdings der Effekt der nächtlichen Wärmeinsel durch die Hochhäuser verstärkt wird, ist keineswegs als Anpassungsmaßnahme auf den Hochhausbau zu setzen.

Neben den Auswirkungen der regionalen Klimaänderungen auf die Stadt werden auch die Auswirkungen bereits geplanter Veränderungen der Stadt untersucht. Dabei kann gezeigt werden, dass eine Umwandlung von bebauten Flächen in Grünflächen die durch den Klimawandel erwartete Zunahme an Sommertagen und -abenden etwa halbieren würde. Umgekehrt kann eine Verdichtung der Bebauung die erwartete Zunahme an Sommertagen und -abenden nahezu verdoppeln. Die Auswirkungen solcher Maßnahmen werden aber lokal sehr begrenzt sein. Um der erwarteten regionalen Klimaerwärmung im gesamten Stadtgebiet gegenzusteuern ist daher eine klimagünstige Gestaltung der Stadt in möglichst vielen Stadtbereichen notwendig. Parks und Grünanlagen nehmen unter zukünftigen Klimabedingungen somit in ihrer Bedeutung stark zu.

1 Einleitung

Das Klima einer Stadt unterscheidet sich wesentlich vom Klima in ländlichen Regionen (Kuttler, 2009). Ein Beispiel ist das Phänomen der städtischen Wärmeinsel. So weist beispielsweise die Temperatur in der Stadt durch ihre dichte Bebauung und den Energieumsatz von Verkehr, Wirtschaft und Haushalten gegenüber dem Umland deutlich höhere Werte auf. In deutschen Städten ist die Lufttemperatur im Jahresmittel um etwa 0,5 bis 2 °C (Grad Celsius) höher als in ländlichen Regionen. Während sonnenscheinreicher, windarmer Wärmeperioden können in den dicht bebauten Innenstädten im Extremfall mehr als 8 °C höhere Lufttemperaturen als im Umland herrschen. Zusammen mit der globalen Erwärmung infolge des Klimawandels sind in den nächsten Jahrzehnten in städtischen Ballungsräumen besonders starke Wärmebelastungen zu erwarten.

Derzeit lebt mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung in Städten. Um die Städte als Orte hoher Lebensqualität zu erhalten, muss daher auch für die Zukunft ein verträgliches Stadtklima geschaffen werden beziehungsweise erhalten bleiben. Die bereits vorliegenden Klimauntersuchungen lassen in den nächsten Jahrzehnten Klimaänderungen erwarten, die sich in den städtischen Ballungsräumen vielfach belastender auswirken werden als im Umland.

Für die Stadt Frankfurt am Main lässt sich bereits eine deutliche Klimaerwärmung nachweisen. In den letzten 30 Jahren (1980 - 2009) wurde in Frankfurt (Flughafen) ein Jahresmittelwert der Lufttemperatur von 10,5 °C registriert. Dieser Wert liegt bereits um 0,9 °C über dem vieljährigen Temperaturmittel der Klimaperiode 1961 bis 1990. Damit verbunden ist ein deutlicher Anstieg der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage von 41,8 auf 51,3. Als Sommertage bezeichnet man die Tage mit einem Temperaturmaximum größer oder gleich 25 °C. Auch die mittlere jährliche Anzahl der heißen Tage – mit einem Temperaturmaximum größer oder gleich 30 °C – ist in diesem Vergleichszeitraum um 47% auf insgesamt 12,7 Tage pro Jahr angestiegen.

Um sich frühzeitig auf den erwarteten Klimawandel einzustellen, haben das Umweltamt der Stadt Frankfurt am Main und der Deutsche Wetterdienst (DWD), Abteilung Klima- und Umweltberatung, Ende 2007 eine Kooperation vereinbart. Diese Kooperation ermöglichte es dem Deutschen Wetterdienst ein neues Verfahren zur Untersuchung des vergangenen und zukünftigen Stadtklimas zu entwickeln und anzuwenden. Das Verfahren, die sogenannte Quadermethode, stellt notwendige Informationen bereit, die der Magistrat der Stadt Frankfurt am Main zur Anpassung an den Klimawandel benötigt.

Die Simulation des Klimas in Frankfurt erfolgte mit dem Klimamodell MUKLIMO_3 (3-dimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell) des Deutschen Wetterdienstes. Das speziell für stadtklimatologische Fragestellungen entwickelte Modell wird bereits seit vielen Jahren zur Untersuchung von Wärmebelastungssituationen erfolgreich eingesetzt. Bei den Modellrechnungen wird besonderer Wert auf die detailgenaue Modellierung der unterschiedlichen Bauungsstrukturen innerhalb des Stadtgebietes gelegt. Darüber hinaus können mit dem computergestützten Stadtklimamodell im Vorfeld die Auswirkungen bereits geplanter oder

eventuell weiterer zukünftiger Eingriffe in das System Stadt gezielt untersucht werden, ohne diese in der Realität umsetzen zu müssen.

Die Methode zur Berechnung der Wärmebelastung in Frankfurt für vergangene und zukünftige Zeiträume benötigt zusätzlich regionale Klimabeobachtungsdaten und ein Ensemble regionaler Klimaprojektionen. Die Verwendung eines Ensembles von regionalen Klimaprojektionen erlaubt eine Abschätzung, wie sicher die für die Zukunft erzielten Aussagen sind.

Wenn in diesem Bericht von Wärmebelastung die Rede ist, bezieht sich die Aussage stets auf das Überschreiten eines bestimmten Schwellenwertes der Lufttemperatur. Diese ist nicht zu verwechseln mit der Wärmebelastung im human-biometeorologischen Sinn, die auf Basis von Wärmehaushaltsmodellen des Menschen (VDI, 2008) berechnet werden kann, wodurch der Zusammenhang zwischen Mensch und Atmosphäre objektiv, qualitativ und quantitativ erfasst wird. Dabei sind neben der Lufttemperatur ebenso die Windgeschwindigkeit, die Luftfeuchte und die Strahlungsverhältnisse sowie die Aktivität und Bekleidung des Menschen zu berücksichtigen.

Dieser Bericht fasst die wesentlichen Erkenntnisse der Stadtklimauntersuchung für Frankfurt am Main zusammen. Nach einem allgemeinen Überblick über das sommerliche Klima in Frankfurt in Kapitel 2 folgt in Kapitel 3 eine detaillierte Beschreibung des verwendeten Stadtklimamodells MUKLIMO_3, der Quadermethode und der dafür benötigten regionalen Klimaprojektionen. Kapitel 4 beschreibt speziell die für die Simulation der Stadt Frankfurt eingesetzten Daten. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Quadermethode für den Zeitraum 1971 - 2000 vorgestellt. Diese umfassen zum einen die erfolgreiche Evaluierung des Verfahrens und zum anderen die Analyse der unterschiedlichen Auswirkung verschiedener Gebäudestrukturen und anderer Landnutzungen. Des Weiteren wird in Kapitel 5 die Auswirkung der Umsetzung der Planungsmaßnahmen auf die Anzahl Sommertage und Sommerabende beschrieben. Informationen zum Klimaänderungssignal der Zukunft können Kapitel 6 entnommen werden. Dort wird sowohl die Änderung der Anzahl Sommertage und Sommerabende auf Grund der Klimaänderung zur Mitte und zum Ende dieses Jahrhunderts diskutiert, als auch die durch die Überlagerung von Klima- und Landnutzungsänderung.

2 Klimatologische Zeitreihen der Lufttemperatur

Frankfurt am Main ist mit ca. 672.000 Einwohnern die fünftgrößte Stadt Deutschlands. Bezüglich der räumlichen Ausdehnung reiht sich Frankfurt mit einer Fläche von rund 248 km² auf den 12. und bezüglich der Einwohnerdichte auf den 11. Rang der Großstädte Deutschlands ein. Wie sich diese Situation im Jahresmittel auf die Temperaturverteilung und Wärmebelastung auswirkt, zeigen Vergleiche charakteristischer Parameter der Lufttemperatur an Standorten mit und ohne Stadteinfluss.

Frankfurt am Main ist Teil des dicht besiedelten Rhein-Main-Gebiets und liegt in der Untermainebene, einer Flussniederung des Mains. Großklimatisch betrachtet gehört die Untermainebene zur gemäßigten Klimazone „Mitteleuropa“ und innerhalb dieser zum Klimabezirk „Südwestdeutschland“ und hier zum Klimabereich „Rhein-Main-Gebiet“ (DWD, 1950). Das Klima von Südwestdeutschland wird durch die Vorherrschaft von Meeresluftmassen bestimmt, die mit überwiegend westlichen Winden herangeführt werden. Es zeichnet sich durch milde Winter und nicht zu heiße Sommer sowie durch relativ hohe Luftfeuchtigkeit aus. Auf dem etwa 10 km südwestlich des Stadtzentrums von Frankfurt gelegenen Flughafen Frankfurt/Main unterhält der Deutsche Wetterdienst eine Flugwetterwarte, deren Messungen den nachfolgenden Untersuchungen zugrunde liegen. Die Flugwetterwarte befindet sich am östlichen Rand der Start- und Landebahnen in einer Höhe von 112 m über NN. Sie kann als weitgehend von der Stadt unbeeinflusste Umlandstation zum Vergleich mit innerstädtischen Stationen herangezogen werden.

Gleichzeitig liegt dem Deutschen Wetterdienst eine Messreihe von wechselnden Stadtstationen im Nordwesten Frankfurts vor. Die für den Flughafen und die Stadt dargestellten Zeitreihen von 1950 bis 2009 der Jahresmitteltemperatur (Abbildung 2-1) zeigen, trotz jährlicher wetterlagenbedingter Schwankungen, einen ansteigenden Trend. Dieser wird durch die Mittelwerte über die Messperioden der verschiedenen Stadtstationen, verdeutlicht. In dieser und den nachfolgenden Abbildungen sind diese Mittelwerte als Dreiecke gekennzeichnet und jeweils der Mitte der Messperiode zugeordnet. Bei den Stadtstationen sind erwartungsgemäß durchschnittlich höhere Jahresmitteltemperaturen zu erkennen, die durch den städtischen Wärmeinseleffekt verursacht werden. Für die Flughafenstation wurde außerdem ein linearer Trend berechnet (Gerade in Abbildung 2-1), der sich in einer Temperaturerhöhung von 0,35 °C pro Dekade äußert. Dieser Trend ist hochsignifikant (größer 99,9% nach Mann-Kendall-Test). Das Konfidenzintervall (gestrichelte Linien in Abbildung 2-1) zeigt den Bereich des möglichen Trends auf dem 90% Signifikanzniveau.

Schaut man sich die Differenzen der mittleren jährlichen Lufttemperatur Stadt minus Flughafen genauer an (Abbildung 2-2), so spiegelt sich deutlich die Historie der unterschiedlichen Stadtstationen wider. Im Vergleich der fünf Stadtstationen befand sich die Station „Feldbergstraße“ inmitten dichter Bebauung und weist somit die höchsten Überwärmungen auf. Auch die Station „Wöhlerschule“, an der Mierendorffstraße, lag in vergleichsweise dichter Bebauung. Die Station „Walldorfschule“ (Friedlebenstraße) befand sich am Rande einer leichten Senke und großen Grünfläche, wo sie durch deren nächtliche Kaltluftbildung beeinflusst wurde, und somit als einzige Station leicht geringere Durchschnittstemperaturen als am Flughafen aufweist. Die Station „Palmengarten“ lag nahe zur Miquelallee, im nördlichen Bereich des Palmengartens, der mit

Gewächshäusern versehen ist, und hat so deutlich weniger von der abkühlenden Wirkung der angrenzenden Grünflächen profitiert. Da von der Station „Unicampus“, am Grüneburgplatz, erst ein vollständiges Kalenderjahr (2009) als Messreihe vorliegt, sind keine diesbezüglichen Aussagen möglich. Doch zeigt sich bereits anhand von Abbildung 2-2, dass die städtische Wärmebelastung stark von der Bebauungsdichte und den Grünflächenanteilen beeinflusst wird.

Wie auch bei den Jahresmitteln der Lufttemperatur zeigen die mittleren täglichen Maxima und Minima der Lufttemperatur einen ansteigenden Trend (Abbildung 2-3 bzw. Abbildung 2-4) von +0,31 °C bzw. +0,36 °C pro Dekade. Beide Trends sind wiederum hochsignifikant. Die Jahresmittel der Tagesminimum- und -maximumtemperaturen belegen auch die erwarteten Temperaturcharakteristika zwischen Stadt und Umland. Die mittleren täglichen Maxima der Lufttemperatur, die meist am Nachmittag auftreten, unterscheiden sich aufgrund der tagsüber vorherrschenden besseren Durchmischung der bodennahen Atmosphäre zwischen Stadt und Umland nur geringfügig (0,1 °C im Mittel über den gezeigten Zeitraum). Deutlich größere Differenzen weisen die entsprechenden Minima der Lufttemperatur auf (im vorliegenden Fall 1,1 °C im Mittel). Das heißt, die von der städtischen Bebauung tagsüber gespeicherte Wärme wird nachts durch langwellige Wärmestrahlung abgegeben, so dass in den frühen Morgenstunden, in denen in der Regel auch das Tagesminimum auftritt, die größte Temperaturdifferenz zum Umland erreicht wird.

Besonderes Interesse gilt in dieser Untersuchung den temperaturbezogenen klimatologischen Kenntagen. Das sind Tage, an denen die Lufttemperatur gewisse Schwellenwerte überschreitet, wie zum Beispiel Sommertage (Tagesmaximum ≥ 25 °C), heiße Tage (Tagesmaximum ≥ 30 °C) oder Tropennächte (Tagesminimum ≥ 20 °C). Diese sind, wiederum im Vergleich Stadt – Flughafen, für den Zeitraum 1950 - 2009 in Abbildung 2-5 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund von Verlegungen der Stadtstationen für die Jahre 1984, 1985 und 2008 keine Werte vorliegen. Die Anzahl der Ereignisse nimmt von den Sommertagen zu den Tropennächten hin ab, wobei letztere in etlichen Jahren gar nicht aufgetreten sind. Die Differenzen zwischen Stadt und Umland liegen im Mittel 1950 - 2009 wiederum im positiven Bereich: +3 Sommertage/Jahr, +1 heißer Tag/Jahr, +1 Tropennacht/Jahr.

Trotz aller jährlichen Schwankungen ist in den letzten drei Jahrzehnten ein ansteigender Trend der Anzahl Sommertage und heißer Tage zu verzeichnen. Dieser wiederum hochsignifikante Trend beträgt 4,3 Tage pro Dekade für die Sommertage und 1,6 Tage pro Dekade für die heißen Tage. Für die Tropennächte konnte kein signifikanter Trend nachgewiesen werden. Wenn dieser beobachtete Trend unverändert weiterginge, so wären für die Klimaperiode 2021 - 2050 durchschnittlich ca. 21 Sommertage und ca. 8 heiße Tage pro Jahr mehr zu erwarten als in der Klimaperiode 1971 - 2000.

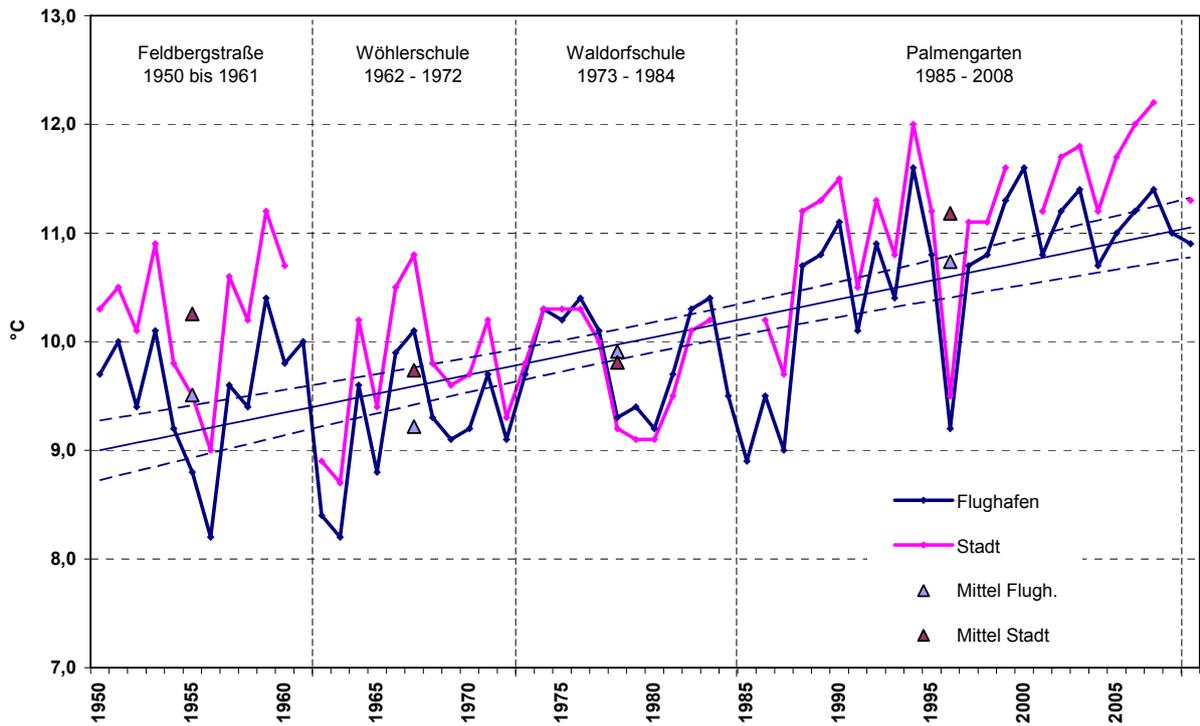


Abbildung 2-1: Jahresmittel der Lufttemperatur für Flughafen Frankfurt/Main und Frankfurt/M.-Stadt (1950 - 2009). Die Jahresmittel der Flughafenstation sind mit einer linearen Trendlinie und deren 90% Konfidenzintervall versehen. Die Dreiecke kennzeichnen die Mittelwerte über die Messperioden der verschiedenen Stadtstationen.

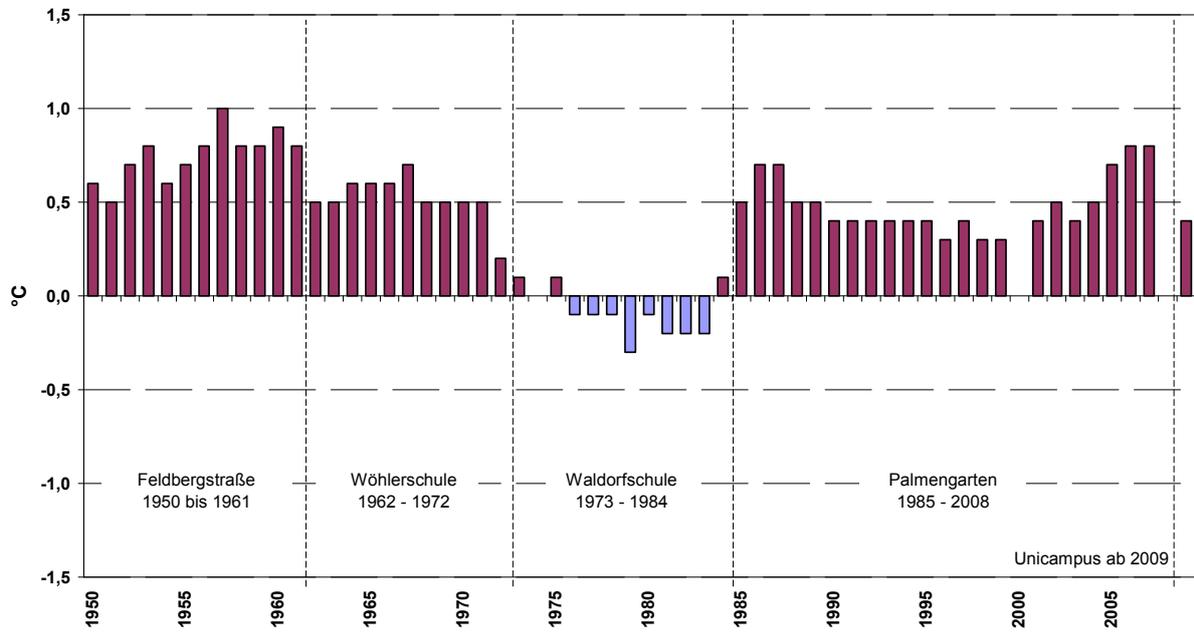


Abbildung 2-2: Differenzen der Lufttemperatur (Jahresmittel von 1950 - 2009) zwischen den Stadtstationen in Frankfurt/M. und dem Flughafen Frankfurt/M. (rot – positive, blau – negative Abweichung).

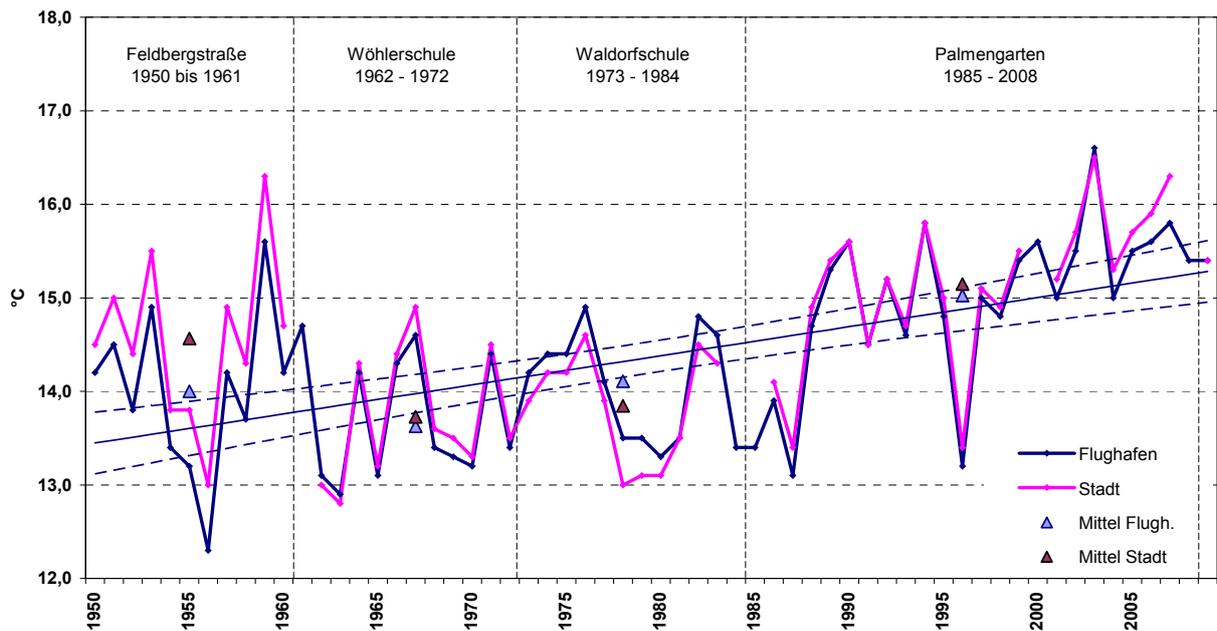


Abbildung 2-3: Jahresmittel des täglichen Maximums der Lufttemperatur für Flughafen Frankfurt/Main und Frankfurt/M.-Stadt (1950 - 2009). Die Jahresmittel der Flughafenstation sind mit einer linearen Trendlinie und deren 90% Konfidenzintervall versehen. Die Dreiecke kennzeichnen die Mittelwerte über die Messperioden der verschiedenen Stadtstationen.

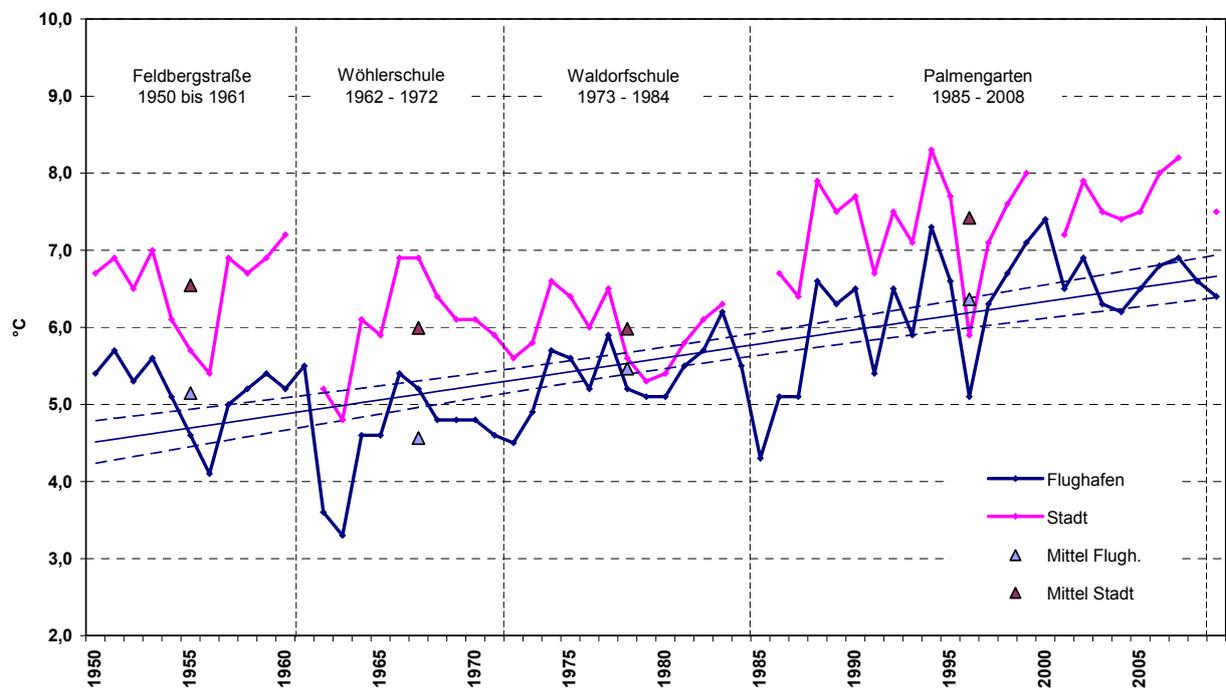


Abbildung 2-4: Jahresmittel des täglichen Minimums der Lufttemperatur für Flughafen Frankfurt/Main und Frankfurt/M.-Stadt (1950 - 2009). Die Jahresmittel der Flughafenstation sind mit einer linearen Trendlinie und deren 90% Konfidenzintervall versehen. Die Dreiecke kennzeichnen die Mittelwerte über die Messperioden der verschiedenen Stadtstationen.

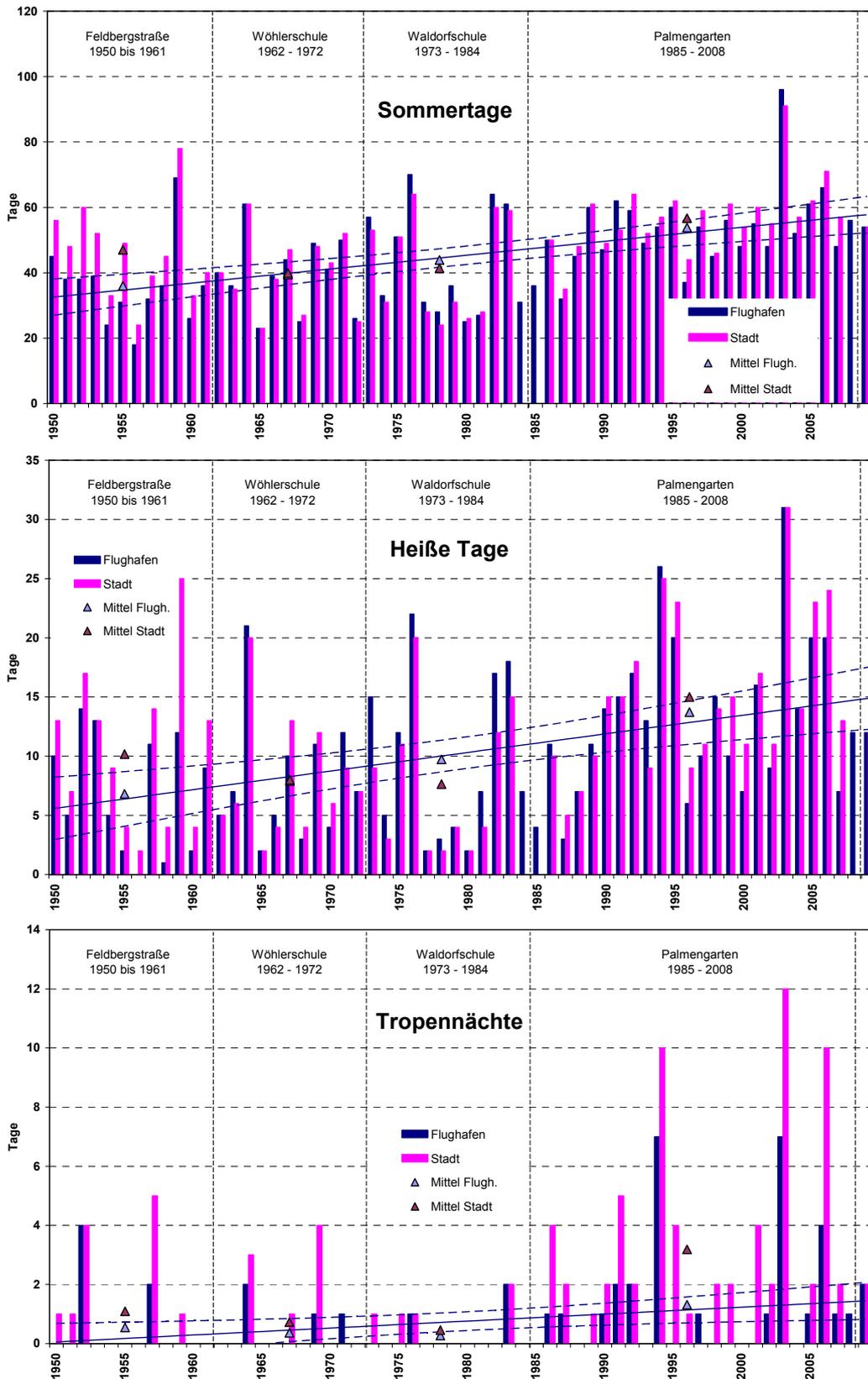


Abbildung 2-5: Jahresmittel der Anzahl Sommertage, der heißen Tage und der Tropennächte für Flughafen Frankfurt/Main und Frankfurt/M.-Stadt (1950 - 2009). Die Jahresmittel der Flughafenstation sind mit einer linearen Trendlinie und deren 90% Konfidenzintervall versehen. Die Dreiecke kennzeichnen die Mittelwerte über die Messperioden der verschiedenen Stadtstationen.

Tabelle 2-1 fasst die Ergebnisse der städtischen Messperioden bezüglich Stadt und Umland (Flughafen) zusammen. Mit Ausnahme der relativ kühl gelegenen Station an der Waldorfschule sind in allen Perioden die gezeigten mittleren und extremen Temperaturen höher sowie die Anzahl der Tage mit Wärmebelastung größer als am Flughafen. Der Einfluss der verschiedenen Standorte auf das Jahresmittel der Lufttemperatur wurde bereits in Zusammenhang mit Abbildung 2-2 diskutiert. Bemerkenswert ist auch, dass in der Feldbergstraße eine deutlich höhere Anzahl an Sommertagen vorliegt, hier ist zu vermuten, dass die Station deutlich schlechter belüftet war als die an der Wöhlerschule. Ähnlich stellt sich die Situation für die heißen Tage dar. Bei der geringen Anzahl an Tropennächten pro Jahr ist keine belastbare Aussage im Vergleich der Stationen möglich.

Tabelle 2-1: Mittelwerte verschiedener Kenngrößen der Lufttemperatur für Frankfurt/M. über die Messperioden der verschiedenen Stadtstationen. 1. Zeile: Stadtstation / Flughafen, 2. Zeile: Differenz Stadtstation minus Flughafen. In der rechten Spalte sind die entsprechenden Werte für den Zeitraum 1950 - 2009 ergänzt.

Vergleichsstation Bezugszeitraum	Feldbergstraße 1950-1961	Wöhlerschule 1962 - 1972	Waldorfschule 1973 - 1984	Palmengärten 1985 - 2008	Gesamt 1950 - 2009
Jahresmittel ¹⁾	10,3 / 9,5 +0,8	9,7 / 9,2 +0,5	9,8 / 9,9 -0,1	11,2 / 10,7 +0,5	10,4 / 10,0 +0,4
Mittleres tägliches Maximum ¹⁾	14,6 / 14,0 +0,6	13,7 / 13,6 +0,1	13,8 / 14,1 -0,3	15,1 / 15,0 +0,1	14,5 / 14,4 +0,1
Mittleres tägliches Minimum ¹⁾	6,5 / 5,1 +0,6	6,0 / 4,6 +1,4	6,0 / 5,5 +0,5	7,4 / 6,4 +1,0	6,7 / 5,6 +1,1
Sommertage ²⁾	47,0 / 36,0 +11,0	39,9 / 39,5 +0,4	41,4 / 43,9 -2,5	56,7 / 53,8 +2,9	48,0 / 45,0 +3,0
Heiße Tage ²⁾	10,2 / 6,8 +3,4	8,0 / 7,9 +0,1	7,6 / 9,7 -2,1	15,0 / 13,7 +1,3	11,2 / 10,3 +0,9
Tropennächte ²⁾	1,1 / 0,5 +0,6	0,7 / 0,4 +0,3	0,5 / 0,3 +0,2	3,2 / 1,3 +1,9	1,7 / 0,8 +0,9

¹⁾ Lufttemperatur in °C, ²⁾ Mittlere jährliche Anzahl in Tagen

3 Methodik

3.1 Allgemeine Erläuterungen

Die zukünftig zu erwartenden globalen Klimaänderungen werden in regelmäßigen Sachstandsberichten durch den Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change) zusammengefasst (IPCC, 2007). Die Klimaänderungssignale für Zeiträume bis Ende dieses Jahrhunderts werden hierbei durch ein großes Ensemble von Projektionsrechnungen mit verschiedenen gekoppelten globalen Klimamodellen und verschiedenen Emissionsszenarien für klimarelevante Spurenstoffe abgeschätzt. Da diese Simulationsrechnungen eine horizontale Auflösung (Rechengitterweite) in der Größenordnung von 200 km und mehr aufweisen, müssen für städtische Fragestellungen die Ergebnisse auf eine deutlich höhere Auflösung herunterskaliert werden. Dies erfolgt aufgrund des großen Skalenunterschieds in zwei Arbeitsschritten, wobei die Ergebnisse der Simulationen auf der gröberen Skala jeweils als Eingabedaten für die Simulationen der feineren Skala dienen (Abbildung 3-1). Im ersten Skalierungsschritt werden die globalen Klimaprojektionsrechnungen mittels dynamischer und statistischer Methoden auf eine regionale Skala mit einer typischen Auflösung von 10 bis 20 km herunter gerechnet. Auf diese Weise erhaltene regionale Klimaprojektionen stehen für Deutschland in verschiedenen Datenbanken allen Interessierten zur Nutzung bereit. Sie erlauben die in Deutschland regional unterschiedlich ausfallende Klimaänderung abzuschätzen. Die in dieser Studie genutzten regionalen Klimaprojektionen werden in Kapitel 3.4 beschrieben.

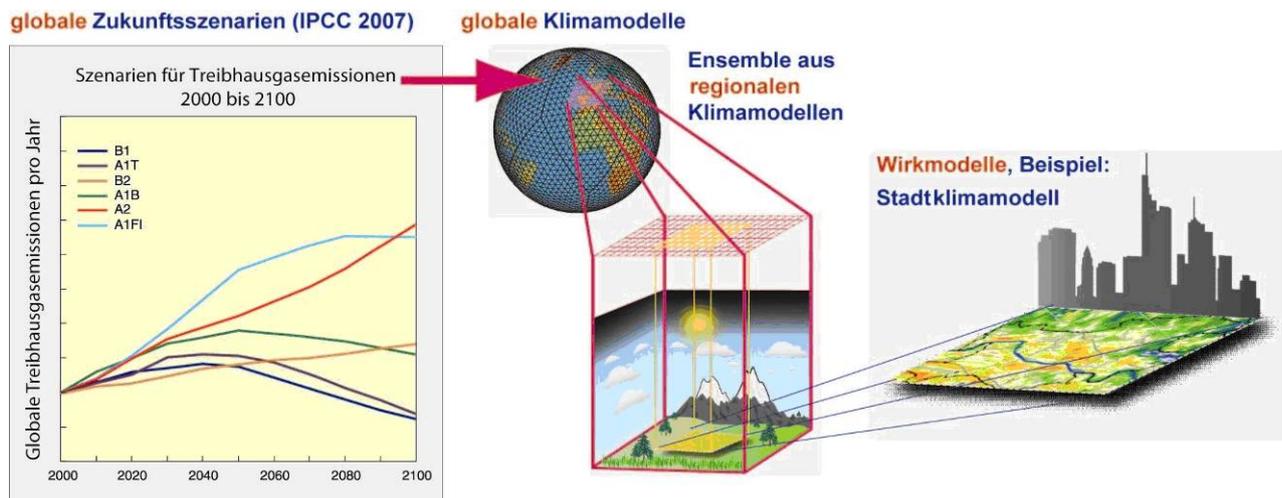


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der räumlichen Verfeinerung (Downscaling) der Klimasimulationsrechnungen von der globalen Skala zur städtischen Skala. Die auf IPCC Emissionsszenarien basierenden globalen Klimasimulationen dienen als Antrieb für ein Ensemble höher auflösender regionaler Klimamodelle. Die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle dienen wiederum als Eingabedaten des Stadtklimamodells MUKLIMO_3 zur Berechnung der Änderung des urbanen Klimas.

Für den zweiten Skalierungsschritt von der regionalen auf die (lokale) städtische Skala wird in dieser Untersuchung das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 des Deutschen Wetterdiensts einge-

setzt. Für die Kopplung zwischen regionaler und städtischer Skala wurde eine als „Quadermethode“ bezeichnete spezielle Technik entwickelt und eingesetzt (Früh et al., 2011). Die wichtigsten Aspekte der Quadermethode werden in Kap. 3.3 beschrieben.

3.2 Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3

Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 (3-dimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell) des Deutschen Wetterdienstes wurde speziell zur Untersuchung stadtklimatologischer und geländeklimatologischer Fragestellungen entwickelt (Sievers und Zdankowski, 1986; Sievers, 1990 und 1995). Basierend auf den Prinzipien der Massenerhaltung, Energieerhaltung und Impulserhaltung berechnet MUKLIMO_3 auf einem 3-dimensionalen Rechengitter den Tagesgang des Windes, der Temperatur und Feuchtigkeit in der Atmosphäre und im Erdboden, der solaren und thermischen Strahlung sowie vieler weiterer relevanter Parameter.

Die räumliche Auflösung des Modells liegt typischerweise zwischen wenigen Metern und mehreren hundert Metern. Die Rechengitterweiten können im Modellgebiet horizontal und vertikal variiert werden, wobei typischerweise in Bodennähe und in dem im Untersuchungsmittelpunkt stehenden Teil des Modellgebiets die höchste Auflösung gewählt wird. Die für Modellsimulationen benötigten Anfangs- und Randwerte für das Modellgebiet (und somit das Regionalklima) werden durch eine automatisch zusätzlich ablaufende ein- bzw. zweidimensionale MUKLIMO_3 Simulation mit ländlicher Landnutzung bestimmt. Simulationen mit MUKLIMO_3 werden meist für Zeiträume zwischen mehreren Stunden und einigen Tagen durchgeführt. Da die Modellphysik von MUKLIMO_3 keine Niederschlagsbildung enthält, kann das Modell nur für niederschlagsfreie Situationen eingesetzt werden.

Neben den meteorologischen Eingangsgrößen benötigt das Modell für jede Gitterzelle die Höhe über NN und Informationen zur Art der Landnutzung. Die Konfigurationsmöglichkeiten der Landnutzung ist vor allem hinsichtlich der vielfältigen städtischen Bebauungsstrukturen in einer Großstadt eine wesentliche Stärke des Stadtklimamodells MUKLIMO_3.

Da bei horizontalen Gitterweiten von einigen Dekametern und mehr Einzelgebäude nicht mehr simuliert werden können, wird eine Parametrisierung der Gebäudeeffekte genutzt. Die Parametrisierung unaufgelöster Bebauung beruht dabei im Einklang mit Gross (1989) auf der Ähnlichkeit der Luftströmung zwischen Gebäuden mit der Strömung eines Gases oder einer Flüssigkeit in einem porösen Medium. Außer der Strömungsverdrängung durch das Bauvolumen werden im Modell durch geeignete Ansätze auch die bremsende Wirkung der Gebäudeoberflächen sowie die Turbulenzerzeugung durch Strömungsabriss an den Gebäudekanten berücksichtigt. Auch die mit Höhe und Dichte der Bebauung zunehmende Verlagerung des Strahlungsumsatzes vom Boden zu den Wänden und Dächern der Gebäude bzw. zu den Baumkronen wird beachtet. Straßen werden über eine anteilige Erhöhung des Versiegelungsgrades berücksichtigt. Das Modell MUKLIMO_3 ermöglicht somit die detaillierte Simulation von Wechselwirkungen zwischen städtischer Bebauung, Vegetation und Atmosphäre.

Zur Beschreibung der Struktur der städtischen Bebauung werden folgende statistische Parameter verwendet: mittlerer Gebäudegrundflächenanteil γ_b , mittlere Gebäudehöhe h_b , mittlerer Wandflächenindex w_b und mittlerer Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen

den Gebäuden ν (siehe Tabelle 3-1). Die Definition der MUKLIMO_3 Landnutzungsklassen für Bebauung orientiert sich an der technischen Beschreibung von neun verschiedenen Bebauungsstrukturen des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (BMBau, 1980) und wurde aufgrund einer Überprüfung durch Mitarbeiter der Stadt Frankfurt wo notwendig aktualisiert. Da bei der verwendeten horizontalen Modellauflösung die Bebauungsstrukturen in einer Modellgitterzelle stark variieren können, erlaubt MUKLIMO_3 neben der primären (häufigsten) Bebauungsstruktur auch eine sekundäre (zweitwichtigste) Bebauungsstruktur zu simulieren (z.B. für die Klassen 10 und 15).

Tabelle 3-1: Statistische Parameter zur Beschreibung der städtischen Bebauung für die MUKLIMO_3 Landnutzungsklassen: mittlerer Gebäudegrundflächenanteil γ_b , mittlere Gebäudehöhe h_b in m, mittlerer Wandflächenindex w_b und mittlerer Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden ν .

Klasse	Beschreibung	γ_b	h_b	w_b	ν
1	Siedlung (dicht)	0,30	15	2,70	0,80
2	Siedlung (locker)	0,12	8	2,80	0,25
5	Gewerbegebiet (dicht)	0,55	20	0,90	0,55
6	Gewerbegebiet (locker)	0,30	12	1,50	0,80
10	Bankenviertel (primär) mit Hochhäusern (sekundär)	0,45 0,05	23 150	4,49 29,25	0,95
11	Ein- und Mehrfamilienhäuser (locker)	0,20	9	2,88	0,30
12	Dorfkern und Einfamilienhäuser (dicht)	0,50	9	2,23	0,80
13	Reihenhaussiedlung	0,35	9	1,73	0,30
14	Zeilenbebauung (mittel)	0,16	16	3,68	0,80
15	Zeilenbebauung (dicht) (primär) und Hochhäuser (sekundär)	0,12 0,02	23 54	4,49 10,53	0,90
16	Blockbebauung	0,32	16	3,08	0,80
17	City (ab Mitte 19. Jh.)	0,55	19	2,14	0,90
18	Historischer Stadtkern	0,68	16	1,62	0,95

Der mittlere Gebäudegrundflächenanteil γ_b wurde, zur Berücksichtigung von Straßen und Plätzen, als die um 10% verminderte Grundflächenzahl des BMBau (1980) bestimmt. Die mittlere Gebäudehöhe h_b wurde aus der Anzahl der Gebäudestockwerke abgeschätzt (5 m Höhe für das erste Stockwerk plus 3,5 m Höhe für jedes weitere Stockwerk). Der mittlere Wandflächenindex w_b wird aus dem Verhältnis der Gebäudeaußenwandfläche (ohne Dachfläche) zur Gebäudegrundfläche berechnet. Die aerodynamische Rauiglänge z_0 für die städtischen Landnutzungsklassen (Tabelle 3-1) gilt für die nicht bebauten Flächenanteile einer Rechengitterzelle und beträgt einheitlich 0,20 m. Die Reibungseffekte der Gebäude (Wände, Dächer) werden extra berechnet. Die nicht bebauten und nicht versiegelten Flächenanteile der städti-

schen Landnutzungsklassen sind mit einer (bodennahen) baumlosen Vegetationsschicht bedeckt (Früh et al., 2011).

Die Beschreibung des Wärme- und Feuchtehaushalts des Bodens erfolgt nach der Methode von Sievers et al. (1983). Das Vegetationsmodell basiert auf der Arbeit von Siebert et al. (1992), wurde jedoch auf drei vertikale Schichten erweitert. Die oberste der drei Schichten beschreibt den Kronenraum der Bäume mit Hilfe der mittleren Baumhöhe, der Blattflächendichte¹ im Kronenbereich und des Grundflächenanteils des Baumbewuchses. Für die den Stammraum beschreibende mittlere Vegetationsschicht wird die Blattflächendichte deutlich herabgesetzt. Die unterste, d.h. bodennahe Vegetationsschicht ist charakterisiert durch deren Höhe, den Bodenbedeckungsgrad durch die Vegetation und den entsprechenden Blattflächenindex² in dieser Schicht. Bäume und Pflanzenblätter haben im Vegetationsmodell drei wichtige Funktionen: Sie wirken als Hindernisse für die Luftströmung und sind Quellen und Senken für die Strahlung und den Wasserdampf. Für die in MUKLIMO_3 verwendeten Landnutzungsklassen sind die Werte der Vegetationsparameter in Früh et al. (2011) dokumentiert.

Zusätzlich können in MUKLIMO_3 auch größere, nicht-aufgelöste Versiegelungsanteile, z.B. Fernstraßen simuliert werden. Hierbei wird im Wesentlichen unterschieden zwischen sechsspurigen (25 m breit) und vierspurigen (15 m breit) Hauptverkehrslinien (Autobahnen und einige Bundesstraßen) sowie bei Flughäfen auch Start- und Landebahnen (65 m breit) und Rollbahnen (30 m breit). Auch für Gitterzellen mit einem solchen zusätzlichen Versiegelungsanteil gilt, dass Bebauung und Vegetation nur im nicht versiegelten Flächenanteil der Rechengitterzelle vorkommen können.

Auch oberhalb der Bebauung wird die langwellige (thermische) und kurzwellige (solare) Strahlung separat berechnet. Die Berechnung der direkten und der diffusen kurzwellige Strahlung erfolgt nach einem empirischen Ansatz (VDI, 1994). Für die langwellige Strahlungsbilanz werden Parametrisierungen von Möller (1954) und Zdunkowski et al. (1975) mit einem zusätzlichen Ansatz zur Berücksichtigung des Wolkenbedeckungsgrads verwendet. Für Höhen mit Bebauung wird in Abhängigkeit von der Gebäudedichte, die kurzwellige Strahlung durch Wände und Dächer reflektiert und absorbiert (Sievers und Früh, 2010). Zusätzlich wird die Emission und Absorption der langwelligen Strahlung durch die Gebäude berechnet.

Das Modellgebiet für MUKLIMO_3 sollte horizontal mindestens die doppelte Ausdehnung der Stadt haben, um die Simulation von städtischen Wärmeinselzirkulationen (sog. Flurwinde) adäquat zu ermöglichen. Um die Anzahl der benötigten Rechengitterzellen zu minimieren kann das Modellgebiet auch gegen Nord gedreht sein. Die horizontale Rechengitterauflösung kann konstant oder variabel gewählt werden. Vertikal sollte die Auflösung in Bodennähe möglichst hoch gewählt werden, kann aber zur Minimierung der Rechengitterzellen mit zunehmender Höhe schrittweise reduziert werden. Aus numerischen Gründen kann das Modellgebiet noch von ei-

¹ **Blattflächendichte:** Blattfläche pro Gittervolumen in m^2m^{-3}

² **Blattflächenindex:** dimensionslose Maßzahl zur Charakterisierung vegetationsbedeckter Flächen. Der B. ist die einseitig gerechnete, über die Höhe des betrachteten Bewuchses aufsummierte Blattfläche pro Einheitsgrundfläche.

nem aus mehreren Gitterzellen bestehenden Streifen umsäumt werden. In diesem Streifen erfolgt am Einströmrand der Übergang zwischen den vorgegebenen regionalen Klimabedingungen und den lokalen Klimabedingungen im Untersuchungsgebiet. Die in diesem Übergangsbereich berechneten Werte werden deshalb nicht dargestellt oder ausgewertet. Neben den oben beschriebenen Daten der Bebauungsstrukturen bzw. Landnutzungsklassen müssen zusätzlich die Daten der Geländehöhe für das gesamte Modellgitter zur Verfügung stehen. Die Details des für diese Studie gewählten Modellgitters und der verwendeten Daten sind in Kap. 4.1 beschrieben

3.3 Quadermethode

Dynamische Klimamodelle berechnen den zukünftigen Wert von Klimaparametern wie Lufttemperatur oder Windgeschwindigkeit in aufeinanderfolgenden diskreten Zeitschritten. Mit zunehmender räumlicher Auflösung der Rechengitter nimmt hierbei der maximal erlaubte Zeitschritt ab. Die für einen bestimmten Simulationszeitraum (z.B. 30 Jahre) benötigte Gesamtanzahl an Zeitschritten und somit die von einem Computer benötigte Rechenzeit nimmt daher mit feiner werdender räumlicher Auflösung deutlich zu. Die Größenordnung der Zeitschritte liegt typischerweise für globale Klimamodelle bei einer halben Stunde, für regionale Klimamodelle bei wenigen Minuten und für hoch auflösende Stadtklimamodelle bei wenigen Sekunden. Aufgrund des dadurch entstehenden extremen Rechenaufwands sind die von Stadtplanern benötigten hoch auflösenden Stadtklimaberechnungen für mehrere Jahrzehnte auch mit den derzeit leistungsfähigsten Computern kaum durchführbar. Die hier beschriebene Quadermethode stellt ein Verfahren dar, das erlaubt für Fragestellungen, die nur bei bestimmten Wetterlagen auftreten (z.B. bei Wärmebelastung), den Umfang der hoch auflösenden Klimasimulationen sehr stark zu verringern.

Die Quadermethode basiert auf der Annahme, dass das lokale Auftreten wärmebelastender Wetterlagen im Wesentlichen von den regional repräsentativen Werten dreier Klimaparameter abhängt. Die Minima und Maxima dieser drei Klimaparameter beschreiben einen dreidimensionalen Ereignisraum, der als Quader visualisiert werden kann (Abbildung 3-2).

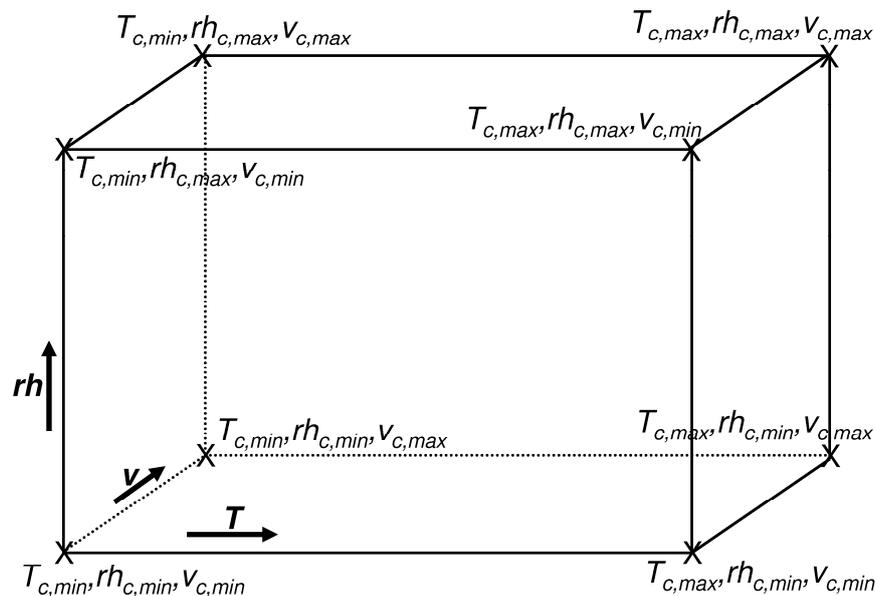


Abbildung 3-2: Skizze des Quaders zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der multiplen linearen Interpolation. Die Quadereckpunkte werden durch Tagesmittelwerte der Lufttemperatur T , der relativen Luftfeuchtigkeit rh und der Windgeschwindigkeit v bestimmt und sind für Frankfurt/M. in Tabelle 4-1 aufgelistet.

Für Wärmebelastungssituationen in einer Stadt wird angenommen, dass diese besonders stark von den drei Klimaparametern Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit in Bodennähe abhängen und nur auftreten, wenn die Werte dieser Parameter außerhalb des städtisch beeinflussten Bereichs (d.h. regional) in einem gewissen Wertebereich liegen. Da Klimabeobachtungen über sehr lange Zeiträume zwar die Tagesmaximum- und -minimumtemperatur umfassen, nicht aber die Tagesextrema für die relative Feuchte und für die Windgeschwindigkeit, wird im Folgenden der Wertebereich ihrer Tagesmittelwerte betrachtet. Die für Frankfurt/M. gewählten Tagesmittelwerte der Quadereckpunkte werden in Kap. 4.2 vorgestellt.

Da die Wärmebelastung durch Luv- und Lee-Effekte auch von der Anströmrichtung abhängig ist, müssen die bei relevanten Wetterlagen dominierenden Hauptwindrichtungen ermittelt werden (s. Kap. 0). Es sind dann für jede dieser Hauptwindrichtungen acht als Eckpunktsimulationen bezeichnete Berechnungen von räumlich hoch aufgelösten Tagesgängen des Lokalklimas mit dem Modell MUKLIMO_3 durchzuführen, die den in Abbildung 3-2 skizzierten Quader aufspannen.

Der räumlich hoch aufgelöste Tagesgang der Klimaparameter in der Stadt für einen beliebigen Tag mit möglicher Wärmebelastung wird dann mittels dreifacher linearer (tri-linearer) Interpolation über die regionalen Tagesmittelwerte dieses Tages von Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit aus den acht Eckpunktsimulationen für die entsprechende Windrichtung bestimmt. Zur Bestimmung von klimatologischen Kenntagen werden zusätzlich die Felder

(horizontale Gitterpunktwerte) der Tagesmaximum- und Tagesminimumtemperaturen ausgewertet.

Der für klimatische Auswertungen notwendige Rechenaufwand verringert sich durch die Quadermethode enorm. Für einen 30-jährigen Zeitraum reduziert sich beispielsweise bei zwei Hauptwindrichtungen die Anzahl der mit MUKLIMO_3 zu simulierenden Tage von fast 11000 (30×365 Tage) auf 16 (2×8 Tage). Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Verfahrens ist die lineare Skalierbarkeit der untersuchten Größen. Die hierzu notwendige technische Evaluierung der Quadermethode kann in Früh et al. (2011) nachgelesen werden. Sie zeigt, dass insbesondere die für Wärmebelastung bedeutsamen Tagesmaximumtemperaturen durch die Annahme der Linearität sehr gut erfasst werden.

Abbildung 3-3 zeigt einen Überblick über das gesamte Verfahren, beginnend mit den MUKLIMO_3 Simulationen des idealisierten Tagesganges und den Zeitreihen des regionalen Hintergrundklimas über die Quader-Methode bis zur statistischen Auswertung der Ergebnisse. Die für das Verfahren genutzten Klimabeobachtungen und das Ensemble regionaler Klimaprojektionen werden im folgenden Kapitel vorgestellt. Die Auswertung von Schwellwertüberschreitungen (z.B. für Sommertage) und die Bestimmung der statistischen Robustheit der Ergebnisse werden in den anschließenden Kapiteln diskutiert.

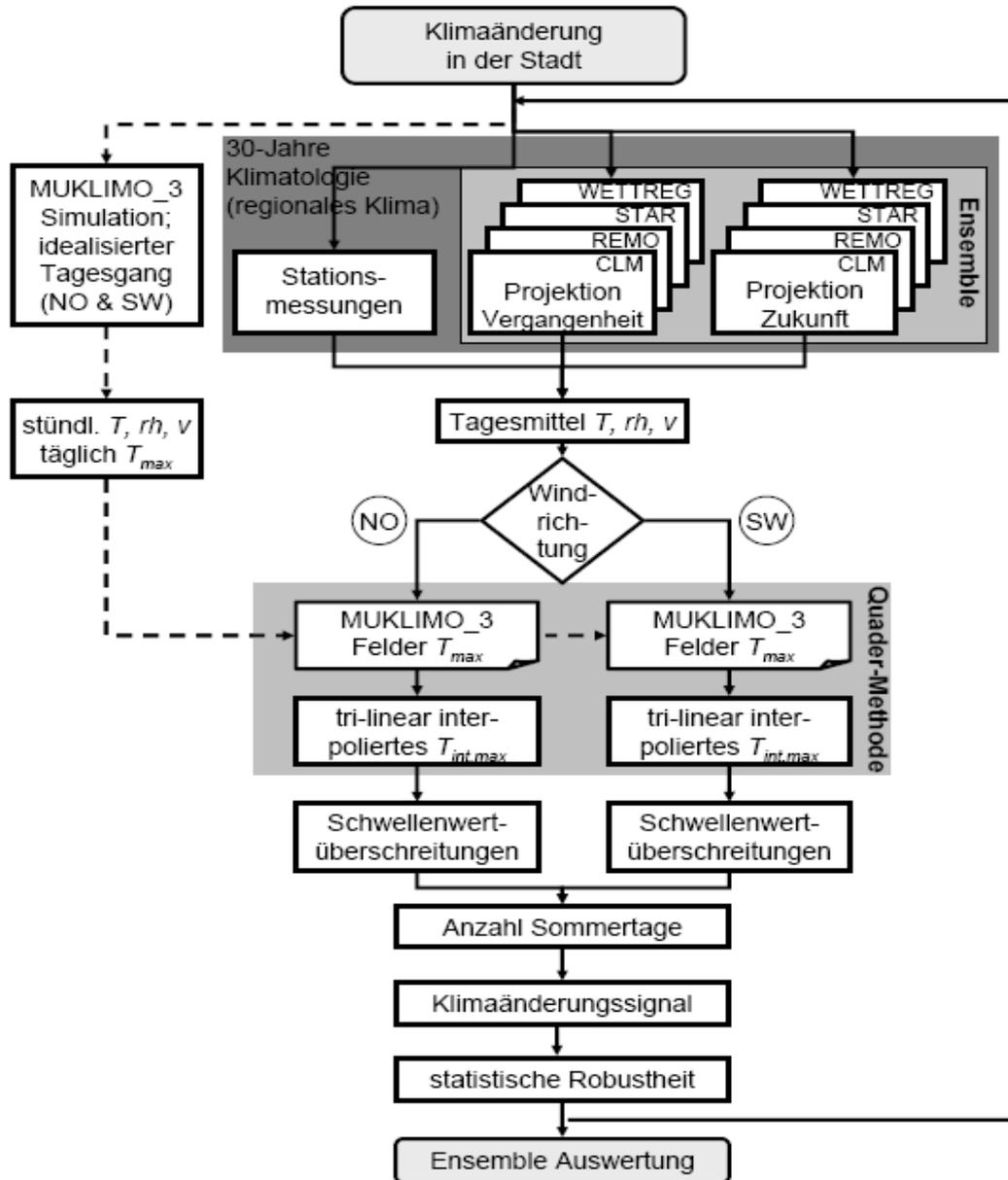


Abbildung 3-3: Skizze der Arbeitsschritte zur Berechnung der räumlich hoch aufgelösten Änderung der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen in einer Stadt basierend auf 30-jährigen regionalen Klimazeitreihen, die als Tageswerte entweder aus Beobachtungen oder regionalen Klimaprojektionen vorliegen. Weitere Details sind im Text erläutert.

3.4 Klimazeitreihen für die Quadermethode

Um die Quadermethode bezüglich ihrer Eignung für die Untersuchung des zukünftigen städtischen Klimawandels beurteilen zu können, werden langjährige Messreihen der wichtigsten Klimaparameter für einen zurück liegenden Zeitraum (z.B. 1971 - 2000) als Tageswerte benötigt. Zum einen werden Zeitreihen benötigt, die repräsentativ für die Region um die Stadt sind (ähnliche topographische Lage), aber von städtischen Einflüssen möglichst unbeeinflusst sind. Diese Zeitreihen dienen als Eingangsdaten für die in Kap. 3.3 beschriebene tri-lineare Interpolation. Zum anderen ist es notwendig langjährige gemessene Klimazeitreihen innerhalb des MUKLIMO_3 Modellgebiets verfügbar zu haben um die räumlich detaillierten Ergebnisse der Quadermethode (z.B. mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen) punktuell evaluieren zu können.

Zur Ermittlung des zukünftigen regionalen Klimas wird im vorliegenden Fall ein Ensemble von vier regionalen Klimaprojektionen verwendet, um die Unsicherheiten, welche in diesen Modellsimulationen stecken, zu berücksichtigen. Zwei dieser vier Projektionen wurden mit numerischen Klimamodellen erzeugt, die beiden anderen mit statistischen Verfahren.

Eine der beiden numerischen regionalen Klimaprojektionen wurde mit dem hydrostatischen Modell REMO (Jacob, 2001) erzeugt und vom Umweltbundesamt (Jacob et al., 2008) (Gitterweite: $0,088^\circ \approx 10 \text{ km}$) in Auftrag gegeben. Für die zweite wurden die von Hollweg et al. (2008) mit dem nicht-hydrostatischen Klimamodell CLM (Böhm et al., 2006) durchgeführten Konsortialsimulationen ausgewertet (Gitterweite: $0,165^\circ \approx 18 \text{ km}$). Beide Regionalmodelle sind aus Wettervorhersagemodellen abgeleitet und für Klimaanwendungen angepasst. Des Weiteren wurden Projektionen der beiden auf Klimastationsdaten basierenden statistischen Verfahren WETTREG (Enke et al., 2005) und STAR (Orlowsky et al., 2008) verwendet. Alle in dieser Studie verwendeten regionalen Klimaprojektionen sind mit Daten des globalen Klimamodells ECHAM5 (Roeckner et al., 2006a; Hagemann et al., 2006; Roeckner et al., 2006b) angetrieben (siehe Abbildung 3-1). Simulationen für Zeiträume im 20. Jahrhundert werden mit C20 (Kontrolllauf) bezeichnet. Simulationen für zukünftige Zeiträume werden nach den verwendeten SRES (special report on emission scenarios) Emissionsszenarien für klimarelevante Spurenstoffe bezeichnet und liegen bei den regionalen Projektionen dieser Studie bis Mitte oder Ende des 21. Jahrhunderts vor. Hier präsentierte Auswertungen nutzen die Zeiträume 1971 - 2000 (Kontrollzeitraum C20) und 2021 - 2050 (aus SRES Szenario A1B, Nakicenovic und Swart, 2000). Ein detaillierter Überblick über die Modelle und Simulationen ist Früh et al. (2011) zu entnehmen.

Abbildung 3-4 zeigt die Änderung der 30-jährigen Mitteltemperatur in Deutschland im Vergleich zur Referenzperiode 1971 - 2000. Die rötlichen Linien beziehen sich auf drei ECHAM5 Realisierungen, welche sich durch leicht unterschiedliche Klimabedingungen zu Beginn der Industrialisierung unterscheiden. Als Antrieb für die Regionalisierungsverfahren wurde ECHAM5-r1 verwendet, d.h. im Vergleich zu den beiden anderen Realisierungen r2 und r3 wird in den ersten Jahrzehnten des 21. Jahrhunderts eher eine geringe Temperaturzunahme und in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts eine zwischen r2 und r3 liegende Temperaturzunahme projiziert.

Die magenta-farbene und die blaue Linie zeigen die projizierte Temperaturzunahme der beiden regionalen Klimamodelle REMO und CLM, die nur wenige zehntel Grad voneinander abweichen. Die grüne Linie zeigt die mit WETTREG berechnete Temperaturzunahme als Mittel aller 20 verfügbaren Realisierungen auf der Basis von ECHAM5-r1. Im Vergleich zu allen anderen Verfahren ist die 30-jährige Mitteltemperatur in Deutschland aus WETTREG deutlich geringer. Die violette Linie zeigt eine vom PIK (Potsdam Institut für Klimafolgenforschung) ausgewählte Realisierung der STAR Ergebnisse, welche im Vergleich zu den anderen eine deutlich höhere Temperaturzunahme projiziert. Sie ist im Jahr 2040 nahezu identisch mit der wärmsten ECHAM5 Realisierung r2.

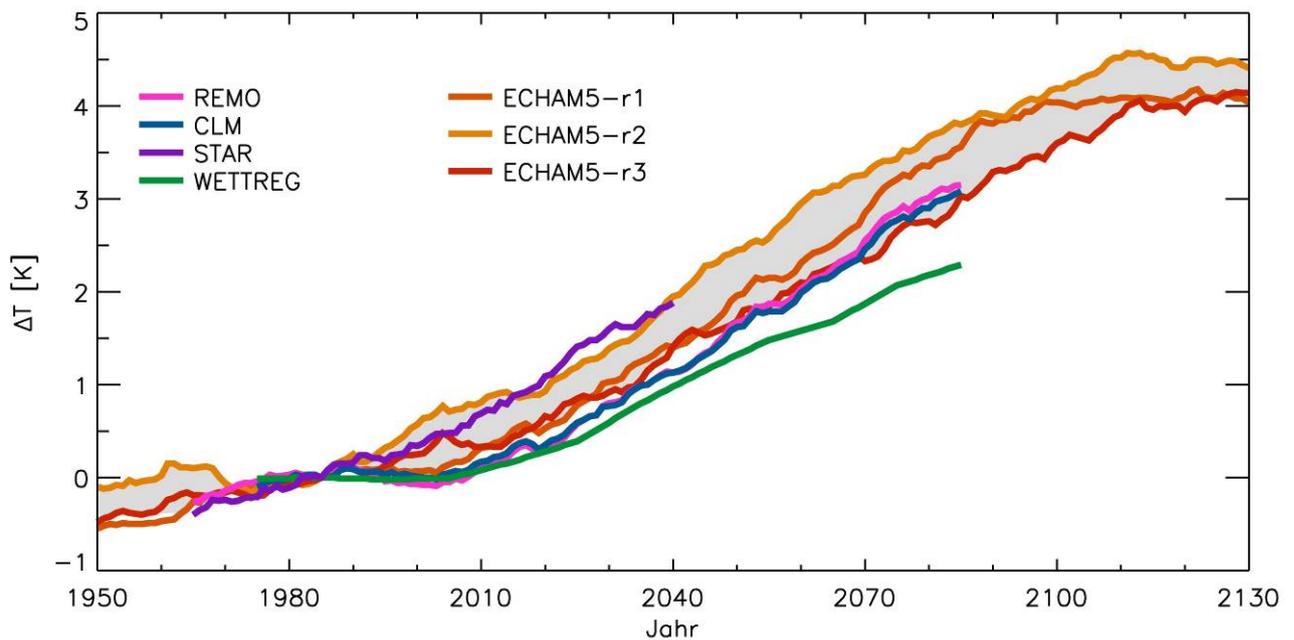


Abbildung 3-4: Änderung der Jahresmitteltemperatur im Mittel über Deutschland aus den Klimaprojektionsrechnungen für Vergangenheit und Zukunft (C20 und A1B) im Vergleich zur Referenzperiode 1971 - 2000.

Die regionalen Klimaprojektionsdaten von REMO, CLM und WETTREG (Jacob, 2005; Keuler und Lautenschlager, 2006; Kreienkamp und Enke, 2006) stammen aus der CERA-Datenbank des World Data Center for Climate in Hamburg (<http://cera-www.dkrz.de/>). Die Daten von STAR basieren auf der Version 2 des Verfahrens und wurden dem Deutschen Wetterdienst direkt vom PIK zur Verfügung gestellt. Hierbei ist es wichtig zu beachten, dass wegen Unsicherheiten der Regionalisierungsverfahren die Klimazeitreihen für die Quadermethode bei den numerischen Klimamodellen auf mindestens 2×2 Gitterzellen und bei den statistischen Verfahren auf mindestens zwei Klimastationen der Region mit ähnlicher Lage basieren sollten (vgl. Deuschländer et al., 2008).

4 Modellkonfiguration für Frankfurt am Main

4.1 Das MUKLIMO_3 Modellgebiet

Für die vorliegende Studie wurden die Stadtklimasimulationen mit der MUKLIMO_3 Version 10 vom November 2009 durchgeführt. Alle Modellsimulationen erfolgten für das Datum 16. Juli, einen Tag mit mittlerem sommerlichen Sonnenstand.

Die horizontale Auflösung des Modellgebietes beträgt 100 m. In den sechs äußeren Randzellen (nicht abgebildet) ist die Auflösung jedoch mit bis zu 500 m gröber. Dies erfolgt, um eventuelle numerische Randeffekte der Modellsimulationen zu eliminieren. Insgesamt werden 280 Gitterzellen in x-Richtung und 216 Gitterzellen in y-Richtung verwendet. In den nachfolgenden Abbildungen ist jeweils nur der Modellbereich mit der 100 m Auflösung (26,8 km x 20,4 km) dargestellt. Die vertikale Auflösung reicht von 10 m in den untersten 100 m bis zu 50 m zwischen 200 m und 750 m Höhe bei 25 Schichten. Das Modellgebiet ist um 30 Grad gegen Nord gedreht. Zur Orientierung sind alle Grafiken von MUKLIMO_3 am Rand mit den Gauß-Krüger-Koordinaten im Abstand von 5 km versehen.

Abbildung 4-1 zeigt das MUKLIMO_3 Modellgebiet mit der Geländehöhe. Der Main fließt von Ost nach West. Im Nordwesten des Modellgebiets liegen die Ausläufer des Taunus mit einer Modellhöhe von bis zu 281 m. Der Berger Rücken im Nordosten hat eine Höhe von bis zu 205 m. Die Lage des Modellausschnitts im Rhein-Main-Gebiet zeigt Abbildung 4-4.

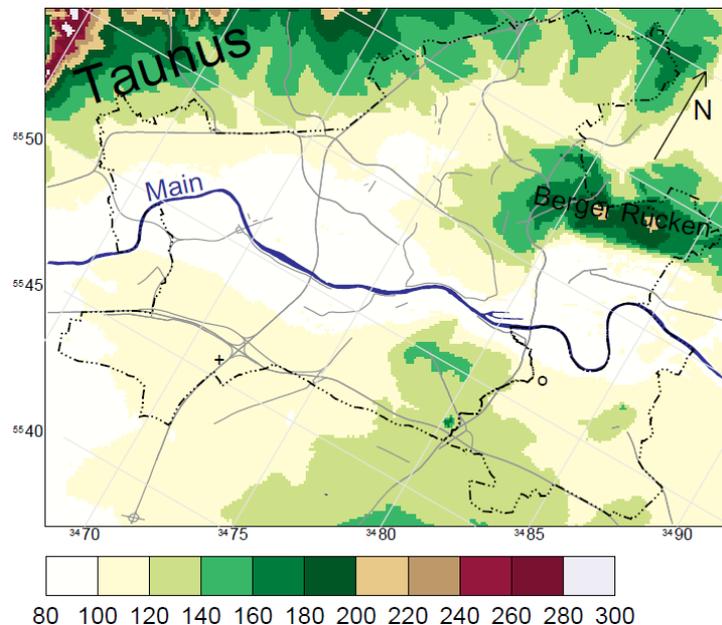


Abbildung 4-1: Karte der Geländehöhe für das MUKLIMO_3 Modellgebiet, das um 30° gegen Nord gedreht ist. Die Position der DWD-Messstationen sind mit einem '+' für den Flughafen Frankfurt/Main und einem 'o' für Offenbach gekennzeichnet.

Die für die Modellsimulationen benötigten Geländehöhendaten stellte die Stadt Frankfurt für ihre Verwaltungsfläche im 1 m Raster zur Verfügung. Um die Modellfläche außerhalb der Stadt abbilden zu können, wurden zusätzlich DGM50 Daten verwendet, die das Umweltamt der Stadt vom Hessischen Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation erworben hat (Nutzungsgenehmigung vom 29.08.2008, Aktenzeichen 5616- DGM 5 III 1.10 – B-103/08).

Abbildung 4-2 zeigt die Karte der Landnutzungen in Frankfurt am Main. Die physikalischen Parameter der städtischen Landnutzungsklassen (Bebauungsstrukturen) sind in Tabelle 2-1 beschrieben. Eine hohe Gebäudedichte (Landnutzungsklassen 10, 16 und 17) ist typisch für das Stadtzentrum. Am linken Modellrand erstreckt sich der Flughafen Frankfurt/Main. Er ist vom Stadtwald umgeben, welcher den Bereich südlich des Mains dominiert. Abbildung 4-3 zeigt einige typische Beispiele für die verschiedenen Landnutzungsklassen in Frankfurt/M.

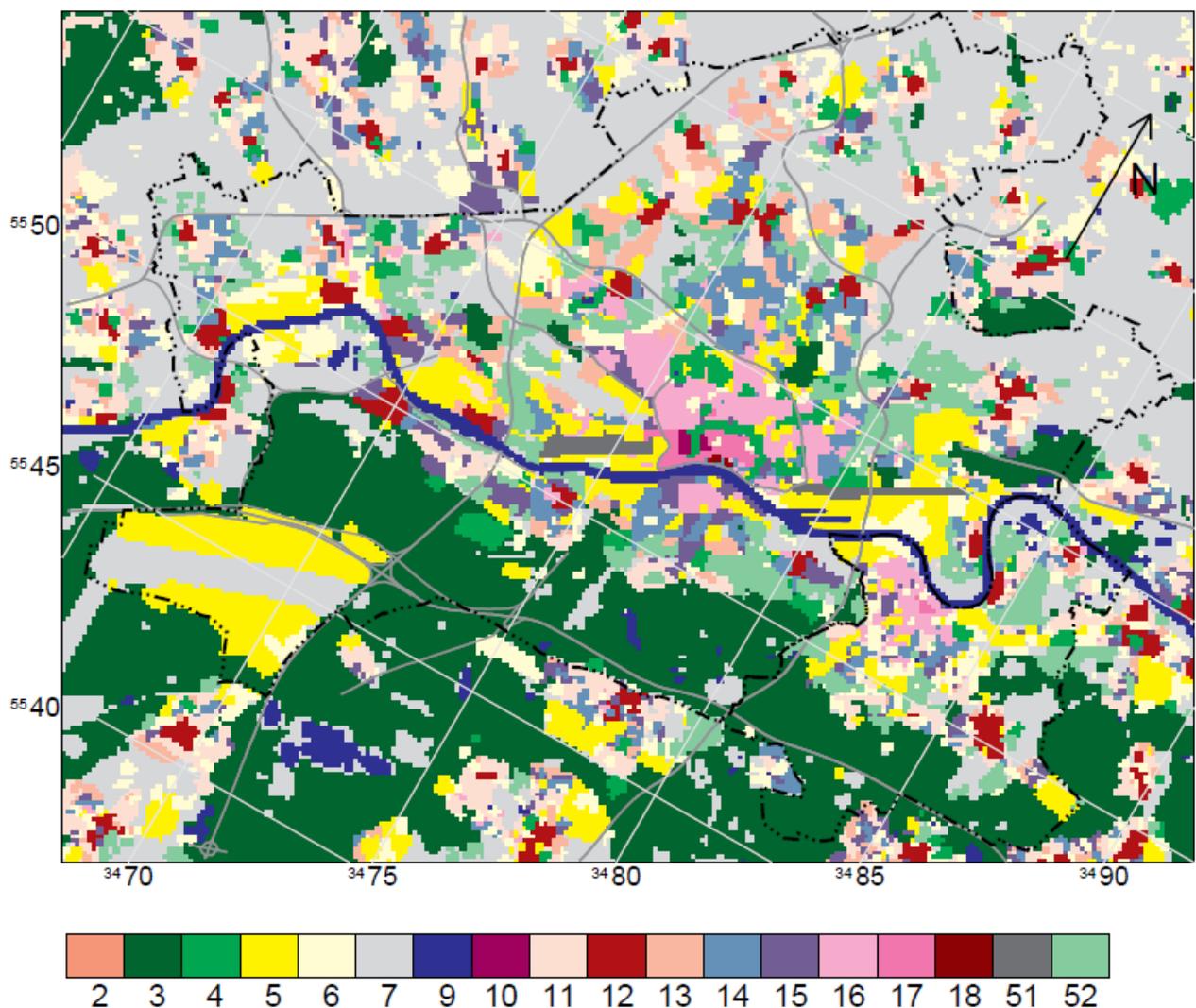


Abbildung 4-2: Karte der Landnutzung: 2 – Siedlung (locker); 3 – Wald; 4 – Park; 5 – Gewerbe (dicht); 6 – Gewerbe (locker); 7 – Freiflächen; 9 – Wasser; 10 – Bankenviertel; 11 – Ein- u. Mehrfamilienhäuser (locker); 12 – Dorfkern u. Einfamilienhaussiedlung (dicht); 13 – Reihenhaussiedlung; 14 – Zeilenbebauung (mittel); 15 – Zeilenbebauung (dicht) & Hochhäuser; 16 – Blockbebauung; 17 – City ab Mitte 19. Jh.; 18 - Historischer Stadtkern; 51 – Gleise; 52 – Kleingärten. Eingetragen sind zusätzlich die Stadtgrenzen von Frankfurt/M. und Offenbach.



Klasse 10: Bankenviertel



Klasse 11: Ein- und Mehrfamilienhäuser (locker)



Klasse 12: Dorfkern und Einfamilienhäuser



Klasse 16: Blockbebauung



Klasse 17: City ab Mitte 19. Jahrhundert



Klasse 18: Historischer Stadtkern

Abbildung 4-3: Beispiele zu ausgewählten Landnutzungsklassen in Frankfurt/Main (Fotos DWD)

Die für die Modellierung benötigten Landnutzungsdaten wurden durch Digitalisierung von topographischen Karten im Maßstab von 1 : 50.000 (TK50) gewonnen. Die Digitalisierungsrechte der TK50 (L5716, L5718, L5916, L5918, L6116, L6118) wurden vom Hessischen Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation mit Schreiben vom 29.08.2008 unter dem Aktenzeichen 5616-DGM 5 III 1.10 - B-103/08 erteilt. Zur Überprüfung der digitalisierten Landnutzungsdaten und die Zuordnung der MUKLIMO_3 Landnutzungsklassen ermöglichte die Stadt Frankfurt dem Deutschen Wetterdienst Zugriff auf das geographische Informationssystem (GIS) der Stadt.

Zusätzlich stellte die Stadt Frankfurt für künftige Planungs- und Bauvorhaben bzw. Grünflächenänderungen folgende Unterlagen zur Verfügung:

- (1) Flyer Planungs- und Bauvorhaben. Hrsg. Magistrat der Stadt Frankfurt, Stadtplanungsamt, 2008.
- (2) Der Plan zum Kennernlernen. Lesehilfe zum regionalen Flächennutzungsplan – Entwurf 2009 (CD)
- (3) Karte 1 : 30.000 des Stadtvermessungsamts mit markierten Grünflächenänderungen, Umweltamt der Stadt Frankfurt, 2010.

Diese Informationen wurden vom Deutschen Wetterdienst gleichfalls digitalisiert, soweit sie für das Modellgitter mit 100 m Rasterweite relevant waren, und den MUKLIMO_3 Landnutzungsklassen zugeordnet sowie abschließend von Mitarbeitern der Stadt Frankfurt geprüft.

Die Geländehöhendaten und alle digitalisierten Landnutzungsdaten wurden auf das Rechengitter des Stadtklimamodells MUKLIMO_3 transformiert.

4.2 Der Quader

Die zuvor beschriebene Quadermethode (Kap. 3.3) wird hier auf das Stadtgebiet von Frankfurt am Main zur Analyse sommerlicher Hitzeperioden angewendet. Die aus der Quadermethode resultierenden, interpolierten Temperaturfelder werden anschließend hinsichtlich der Überschreitung ausgewählter Schwellenwerte für 30-jährige Zeiträume ausgezählt (sog. klimatologische Kenntage). Die untersuchten Schwellenwerte sind wie folgt definiert:

- **Sommertage** mit einer Tageshöchsttemperatur ≥ 25 °C ($N_{T_{\max} \geq 25}$),
- **Heiße Tage** mit einer Tageshöchsttemperatur ≥ 30 °C ($N_{T_{\max} \geq 30}$),
- **Biergartentage** mit einer 20 MESZ Lufttemperatur ≥ 20 °C ($N_{T_{20 \geq 20}}$),
- **Sommerabende** mit einer 22 MESZ Lufttemperatur ≥ 20 °C ($N_{T_{22 \geq 20}}$),
- **Warme Nächte** mit einer Minimumtemperatur ≥ 17 °C ($N_{T_{\min} \geq 17}$) und
- **Tropennächte** mit einer Minimumtemperatur ≥ 20 °C ($N_{T_{\min} \geq 20}$).

Die Sommertage und heißen Tage geben Auskunft über die Wärmebelastung am Nachmittag, an denen in der Regel das Tagesmaximum der Lufttemperatur erreicht wird. Biergartentage und Sommerabende charakterisieren Abende, in den man sich noch bei sommerlichen Temperaturen im Freien (z.B. im Biergarten) aufhalten kann. In warmen Nächten und Tropennächten herrscht die ganze Nacht eine deutliche Wärmebelastung vor.

Der für die Region um Frankfurt am Main erzeugte Quader erstreckt sich zwischen den Eckpunkten (Index c) über den Temperaturbereich zwischen $T_{c,min} = 15\text{ °C}$ und $T_{c,max} = 25\text{ °C}$. Für das städtische Umland von Frankfurt deckt dieser Bereich der mittleren Tagestemperatur (T_i) alle Tage mit potenzieller sommerlicher Hitze ab. Für Temperaturen kleiner $T_{c,min}$, z.B. in den Wintermonaten, ist die Wahrscheinlichkeit einer Schwellenwertüberschreitung im urbanen Temperaturfeld sehr gering, so dass der extrapolationsbedingte Fehler³ nur für eine sehr geringe Anzahl an Tagen zutrifft und daher vernachlässigbar ist. An Tagen an denen die Tagesmitteltemperatur T_i größer ist als $T_{c,max}$, ist die Wahrscheinlichkeit einer Schwellenwertüberschreitung innerhalb des Modellgebietes nahezu überall Eins (100%), so dass auch in diesem Fall die Unsicherheit auf Grund der Extrapolation vernachlässigbar ist. Für die relative Feuchte erstreckt sich der Quader zwischen $rh_{c,min} = 42\%$ und $rh_{c,max} = 80\%$ und deckt damit nahezu den gesamten Bereich mittlerer Tageswerte im Sommer in Frankfurt ab. Die Quaderdimension für die Windgeschwindigkeit erstreckt sich über den Bereich zwischen $v_{c,min} = 0,7\text{ m/s}$ und $v_{c,max} = 3,0\text{ m/s}$. Für alle Tage mit Windgeschwindigkeiten unterhalb $0,7\text{ m/s}$ bzw. oberhalb $3,0\text{ m/s}$ werden $v_{c,min}$ bzw. $v_{c,max}$ als Tagesmittel angenommen. Die untere Grenze der Windgeschwindigkeit wurde gewählt, da eine weitere Verminderung keine signifikanten Unterschiede im Temperaturfeld zur Folge hat. Eine Windgeschwindigkeit von 3 m/s oder mehr dagegen unterdrückt die Entwicklung eines lokalen Strömungssystems und damit die Ausbildung eines charakteristischen urbanen Temperaturfeldes. Für den Fall großräumiger vorherrschender moderater bis starker Winde ist daher ein nahezu homogenes Temperaturfeld zu erwarten. Tabelle 4-1 fasst die verwendeten Tagesmittelwerte an den acht Quadereckpunkten zusammen.

Tabelle 4-1: Tagesmittelwerte bodennaher Klimaparameter am Fallbeispiel Frankfurt/M. für die in Abbildung 3-2 illustrierten acht Eckpunktsimulationen der Quadermethode

Simulation	Lufttemperatur [°C]	Rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Windgeschwindigkeit (m/s)
000	15,0 ($T_{c,min}$)	42 ($rh_{c,min}$)	0,7 ($v_{c,min}$)
100	25,0 ($T_{c,max}$)	42 ($rh_{c,min}$)	0,7 ($v_{c,min}$)
010	15,0 ($T_{c,min}$)	80 ($rh_{c,max}$)	0,7 ($v_{c,min}$)
001	15,0 ($T_{c,min}$)	42 ($rh_{c,min}$)	3,0 ($v_{c,max}$)
110	25,0 ($T_{c,max}$)	80 ($rh_{c,max}$)	0,7 ($v_{c,min}$)
101	25,0 ($T_{c,max}$)	42 ($rh_{c,min}$)	3,0 ($v_{c,max}$)
011	15,0 ($T_{c,min}$)	80 ($rh_{c,max}$)	3,0 ($v_{c,max}$)
111	25,0 ($T_{c,max}$)	80 ($rh_{c,max}$)	3,0 ($v_{c,max}$)

³ Liegt der Zielwert der Interpolation außerhalb der Stützstellen der Interpolation, spricht man von Extrapolation. Diese ist generell mit einem größeren Fehler behaftet als eine Interpolation.

4.3 Verwendete Zeitreihen

Die 30-jährigen Zeitreihen, welche die für Frankfurt am Main regional repräsentativen Umgebungsbedingungen widerspiegeln und als Eingabedaten der Quadermethode dienen, stammen sowohl aus Beobachtungen als auch aus Klimaprojektionen. Die Zeitreihe 1971 - 2000 der DWD-Messstation am Flughafen Frankfurt/Main (südwestlich der Stadt) wird zur Evaluierung der klimatologischen Kenntage verwendet. Zur Abschätzung der Klimaänderung werden Zeitreihen regionaler Klimamodelle und statistischer Regionalisierungsverfahren verwendet (Kap.3.4).

Aus den Projektionen der numerischen, regionalen Klimamodelle REMO und CLM werden Zeitreihen von vier Gitterzellen in der Nähe von Frankfurt extrahiert (Kap. 3.4). Dann wird aus dem Tagesmittelwert der 2 m Lufttemperatur (T_i) und dem 2 m Taupunkt⁴ die relative Feuchte (rh_i) berechnet. Aus den Horizontalkomponenten des 10 m Windes wird sowohl die Windgeschwindigkeit (v_i) als auch die Windrichtung abgeleitet. Anschließend werden die Zeitreihen von vier Gitterzellen räumlich gemittelt um als Eingabe für den Quader zu dienen. Die vier ausgewählten Gitterzellen liegen süd-westlich der Stadt (Abbildung 4-4) und wurden als Eingabe für den Quader gewählt, weil sie in der Nähe der Stadt liegen, jedoch nicht städtisch geprägt sind und die Geländehöhe dieser Gitterzellen gut mit denen der Stadt übereinstimmen (REMO: 103 m bis 129 m ü. NN, CLM: 124 m bis 150 m ü. NN).

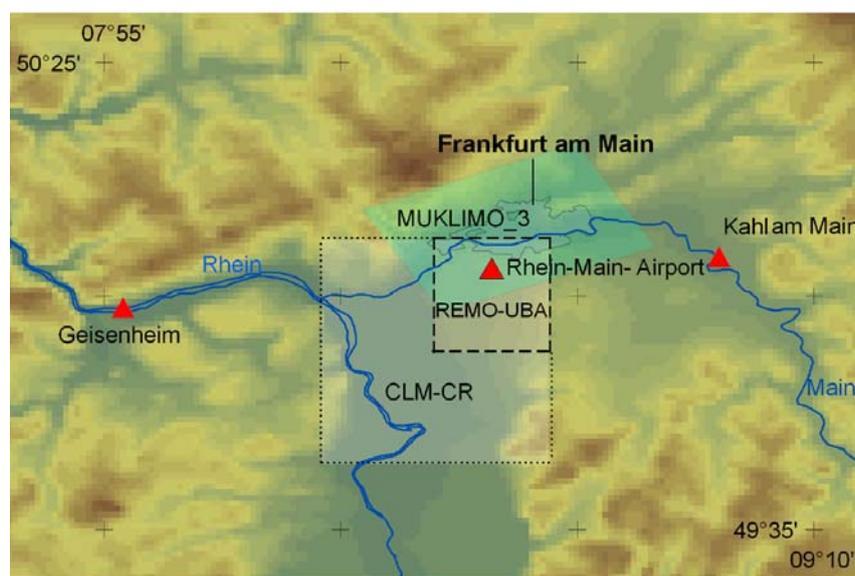


Abbildung 4-4: Überblick über die Orographie des Rhein-Main-Gebietes mit MUKLIMO_3 Modellgebiet (grün schattierte Fläche), Flächen verwendeter REMO- bzw. CLM-Gitterzellen (gestrichelte bzw. gepunktete Linie), DWD-Stationen Geisenheim, Kahl am Main und Flughafen Frankfurt/Main (rote Dreiecke).

⁴ Der Taupunkt oder besser die Taupunkttemperatur bezeichnet die Temperatur, auf die ein ungesättigtes Luftquantum bei gleichbleibendem Druck über einer ebenen, chemisch reinen Wasserfläche abgekühlt werden muss, um zur Sättigung zu gelangen. Im Sättigungszustand beträgt die relative Luftfeuchtigkeit 100 Prozent.

Aus den beiden statistischen Regionalisierungsverfahren WETTREG und STAR wurden die Zeitreihen an den Stationen Geisenheim (110 m ü. NN) und Kahl am Main (107 m ü. NN) ausgewählt (Abbildung 4-4). Beide Verfahren liefern jeweils die Tagesmittelwerte für T_i , rh_i und v_i , welche im Mittel über die beiden Stationen verwendet werden.

Zur Berücksichtigung der Windrichtungsabhängigkeit des Temperaturfeldes wurde pro statistisch relevanter Windrichtung jeweils ein Quader aufgespannt. Die relevanten Windrichtungen an der Messstation Flughafen Frankfurt/Main für den Zeitraum 1971 - 2000 sind Nordost (NE) und Südwest (SW) (Abbildung 4-5). Die acht MUKLIMO_3 Rechnungen für jeden Eckpunkt eines Quaders wurden für beide Windrichtungen NE und SW durchgeführt. Dadurch erhält man einen NE- und einen SW-Quader. Für alle Tage mit einer mittleren Windrichtung zwischen 315° und 135° wird der NE-Quader, für alle anderen Tage der SW-Quader zur Interpolation verwendet.

Da weder WETTREG noch STAR Informationen über die Windrichtung liefern, wird hierfür eine zufällige Zeitreihe generiert, welche im Mittel der beobachteten Windrichtungsverteilung am Flughafen Frankfurt/Main entspricht. Diese Abschätzung basiert auf der Annahme, dass die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung für WETTREG und STAR der beobachteten Windrichtungsverteilung entspricht und während des gesamten Projektionszeitraums konstant bleibt. Für nähere Informationen zu diesem Verfahren sei auf Früh et al. (2011) verwiesen.

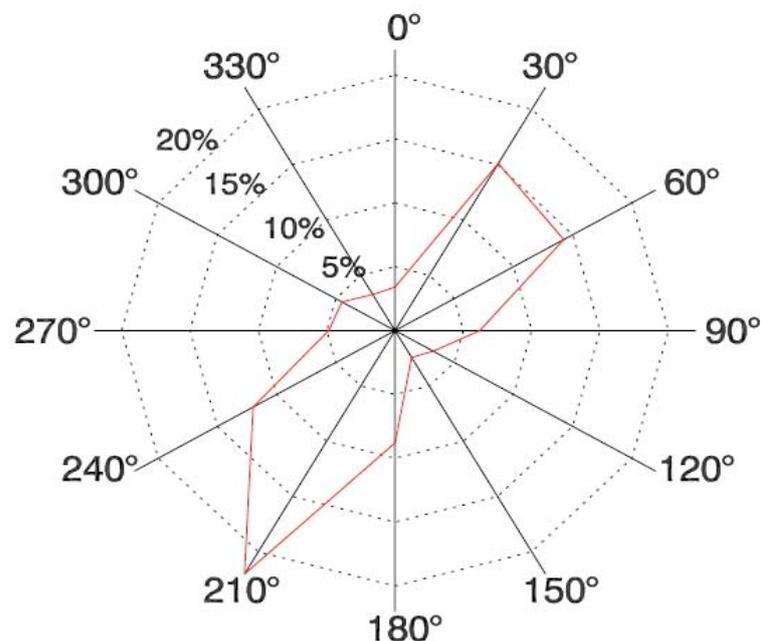


Abbildung 4-5: Häufigkeitsverteilung der beobachteten stündlichen Windrichtung an der Station Flughafen Frankfurt/Main im Zeitraum 1971 - 2000.

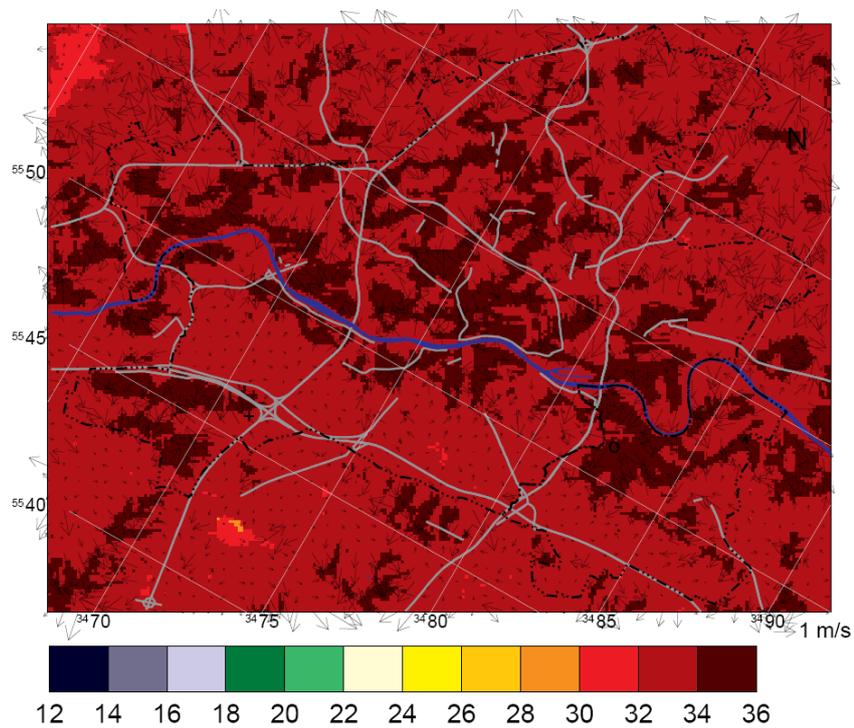
4.4 Modellsimulation für einen Tag

Nachfolgend wird beispielhaft für den Fall nordöstlicher Anströmung mit der Initialisierung eines der Quadereckpunkte (Simulation 6 nach Tabelle 4-1: $T_{c,max} = 25\text{ °C}$, $rh_{c,min} = 42\%$ und $v_{c,min} = 0,7\text{ m/s}$) der mit MUKLIMO_3 simulierte Tagesgang für das Modellgebiet Frankfurt vorgestellt.

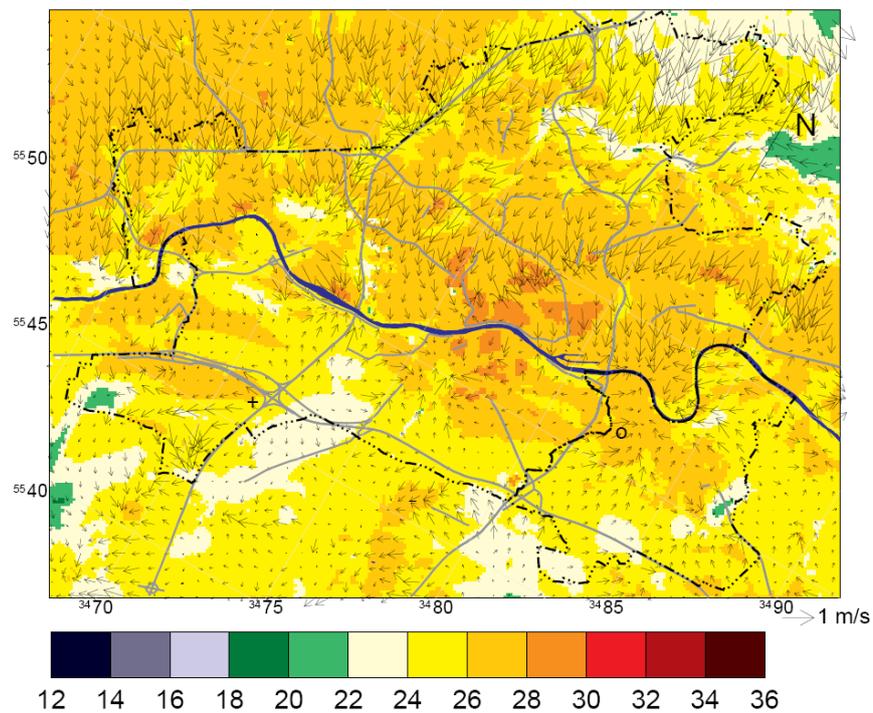
Die eindimensionale Initialisierung von MUKLIMO_3 wird am 15. Juli um 09 MESZ gestartet. Der Tagesmittelwert der 2 m Lufttemperatur, der 2 m relativen Feuchte und der 10 m Windgeschwindigkeit aus der eindimensionalen Simulation bis 16. Juli 09 MESZ entspricht jeweils einem Eckpunkt des Quaders. Die dreidimensionale Simulation wird ab 16. Juli 09 MESZ gestartet. Die 24 Stunden Simulation endet damit am 17. Juli um 09 MESZ.

Abbildung 4-6a zeigt die 5 m Lufttemperatur und den horizontalen Windvektor um 18 MESZ. Zu dieser Zeit ist die Lufttemperatur nahe dem Tagesmaximum. In Gebieten mit hoher Gebäudedichte ist die Temperatur aufgrund starker Durchmischung höher als in Gebieten mit geringer oder ohne Bebauung. Die horizontale Variabilität innerhalb des Modellgebietes ist eher gering. Ein Teil dieser Variabilität ist außerdem den Geländehöhenunterschieden von etwa 200 m (zwischen 87 m und 281 m) zuzuordnen. Die 18 MESZ Temperatur variiert im Modellgebiet zwischen einem minimalen Wert von $28,8\text{ °C}$ und einem Maximum von $35,6\text{ °C}$. Wegen der sehr geringen Windgeschwindigkeit von etwa 1 m/s dominieren die lokalen über die regionalen Einflüsse. Die Windgeschwindigkeit in 5 m Höhe ist im Wald (z.B. südlich des Mains) nahezu Null.

Abbildung 4-6b zeigt die nächtlichen Temperaturbedingungen um 02 MESZ. Während der Nacht entwickelt sich ein leichter Kaltluftabfluss vom Taunus, welcher frische Luft in die Stadt transportiert. Die Windgeschwindigkeit ist jedoch auch hier mit einem Mittel über das Modellgebiet von $0,5\text{ m/s}$ sehr gering. In der Innenstadt ist die nächtliche Temperatur höher als in der Umgebung. Die horizontale Temperaturverteilung um 02 MESZ variiert zwischen $19,8\text{ °C}$ und $29,3\text{ °C}$. Somit ist die Variabilität deutlich höher als um 18 MESZ. Wiederum ist die Temperatur in Gebieten mit hoher Gebäudedichte höher als im städtischen Umland. Gemittelt über das Modellgebiet ergibt sich eine Temperatur von $33,4\text{ °C}$ um 18 MESZ und $25,7\text{ °C}$ um 02 MESZ.



(a)



(b)

Abbildung 4-6: Karte der 2 m Lufttemperatur gemeinsam mit dem horizontalen Windvektor in 5 m Höhe um 18 MESZ (a) und 02 MESZ (b) für die nordöstliche Anströmung mit der Initialisierung $T_{c,max} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $rh_{c,min} = 42\%$ und $v_{c,min} = 0,7 \text{ m/s}$.

5 Ergebnisse für den Zeitraum 1971 - 2000

5.1 Evaluierung der simulierten Klimaindizes

Zunächst wird die beobachtete Zeitreihe am Flughafen Frankfurt/Main für den Zeitraum 1971 - 2000 als Eingabe für die Quadermethode gewählt. Diese Simulation wird zur Überprüfung der Belastbarkeit der Ergebnisse und zur Evaluierung des gesamten Verfahrens genutzt. Diese Simulation nennen wir im Folgenden EVAL (Evaluierungslauf). Für den Vergleich der klimatologischen Kenntage aus den Messungen mit den Simulationsergebnissen wird neben der Zeitreihe der Messstation Flughafen Frankfurt/Main auch die der DWD-Messstation Offenbach herangezogen.

Tabelle 5-1: Vergleich der beobachteten und simulierten klimatologischen Kenntage für 1971 - 2000 (mittlere jährliche Anzahl der Tage). Die Werte OBS stammen von den angegebenen DWD-Messstationen (siehe Abbildung 5-1). Die Werte unter EVAL resultieren aus der Quader-Methode (siehe Text). Proz. Abw. steht für prozentuale Abweichung von EVAL zu OBS.

Klimatologische Kenntage	Messstation	OBS	EVAL	proz. Abw.
Sommertage	Flughafen Frankfurt/Main	46,1	39,1	-15%
N_{Tmax≥25}	Offenbach*	49,6	52,2	+5%
Heiße Tage	Flughafen Frankfurt/Main	10,7	7,6	-29%
N_{Tmax≥30}	Offenbach*	12,4	13,3	+8%
Biergartentage	Flughafen Frankfurt/Main	75,4	87,7	+16%
N_{T20≥20}	Offenbach*	73,1	100,3	+37%
Sommerabende	Flughafen Frankfurt/Main	57,6	61,4	+7%
N_{T22≥20}	Offenbach**	–	73,3	–
Warme Nächte	Flughafen Frankfurt/Main	9,8	21,3	+117%
N_{Tmin≥17}	Offenbach*	20,9	28,9	+38%
Tropennächte	Flughafen Frankfurt/Main	0,6	4,8	+699%
N_{Tmin≥20}	Offenbach*	2,1	7,4	+251%

* fehlende Beobachtungen in den Jahren 1978 - 1979 und 1996 - 2000

** fehlende Beobachtungen in den Jahren 1978 - 2000

Tabelle 5-1 stellt die klimatologischen Kenntage aus den Beobachtungen (OBS) den Ergebnissen der Quader-Methode (EVAL) für den Zeitraum 1971 - 2000 gegenüber. Aufgrund fehlender Messungen kann für Offenbach keine Auswertung der Anzahl Sommerabende durchgeführt werden.

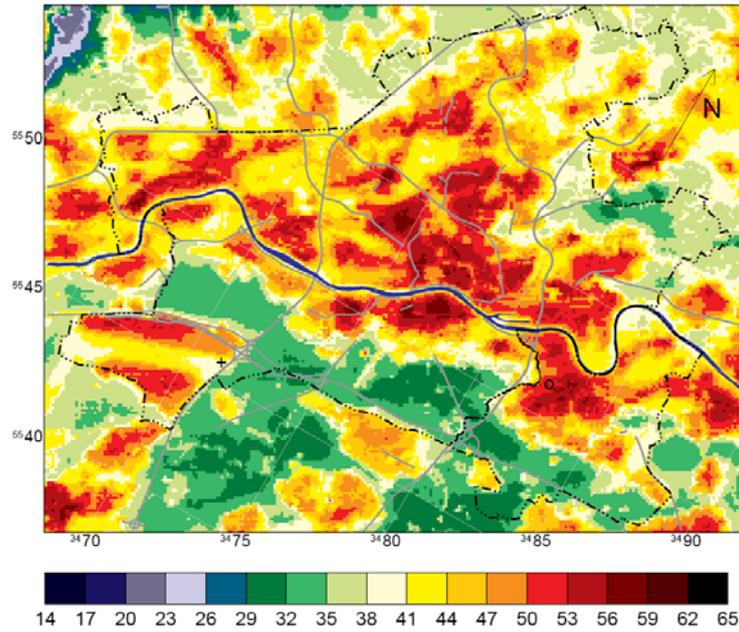
Aus den Simulationsergebnissen EVAL wurden die Tagesmaximumtemperaturen (Sommertage, heiße Tage), die Tagesminimumtemperaturen (warme Nächte, Tropennächte) und die Termine 20 MESZ (Biergartentage) bzw. 22 MESZ (Sommerabende) ausgewertet. Die

klimatologischen Kenntage für EVAL wurden über ein Gebiet von je 3 x 3 Gitterzellen um die Gitterzellen der Messstationen Flughafen Frankfurt/Main und Offenbach gemittelt. Die Abweichung zwischen beobachteter und berechneter Anzahl der Sommertage liegt bei maximal - 15%. An der Station Offenbach ist die Abweichung deutlich geringer (5%) als an der Station Flughafen Frankfurt/Main. Die höhere prozentuale Abweichung der heißen Tage ist teilweise durch die geringe Absolutanzahl dieser Extremereignisse im Vergleich zu mittleren Verhältnissen verursacht. Die Abweichung der Biergartentage an der Station Flughafen Frankfurt/Main liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie die der Sommertage. Allerdings sind hier die Abweichungen für Offenbach größer als für Frankfurt. Es wurde auch geprüft, welchen Einfluss die fehlenden Messungen der Jahre 1978 - 1979 und 1996 - 2000 an der Station Offenbach haben, die in den Simulationen jedoch enthalten sind: Eine Normierung der Offenbacher Zeitreihe mit Hilfe der analog verkürzten Frankfurter Zeitreihe zeigte keine markanten Unterschiede in der Anzahl der beobachteten klimatologischen Kenntage. Eine weitere Ursache der Abweichung kann in dem zwar geringen aber dennoch vorhandenen Unterschied zwischen der festen Sonnenuntergangszeit am 16. Juli in der Simulation und der variierenden im Verlauf eines Sommers liegen. Dies macht sich insbesondere bei den Biergartentagen bemerkbar, ist aber auch bei den Sommerabenden nicht auszuschließen. Bei den Sommerabenden ist die Abweichung mit 7% sehr gering. Die Abweichung der simulierten zur beobachteten Anzahl warmer Nächte und Tropennächte dagegen ist sehr groß. Dies ist, deutlicher noch wie bei den heißen Tagen, auf die vergleichsweise geringe Anzahl der Fälle zurückzuführen.

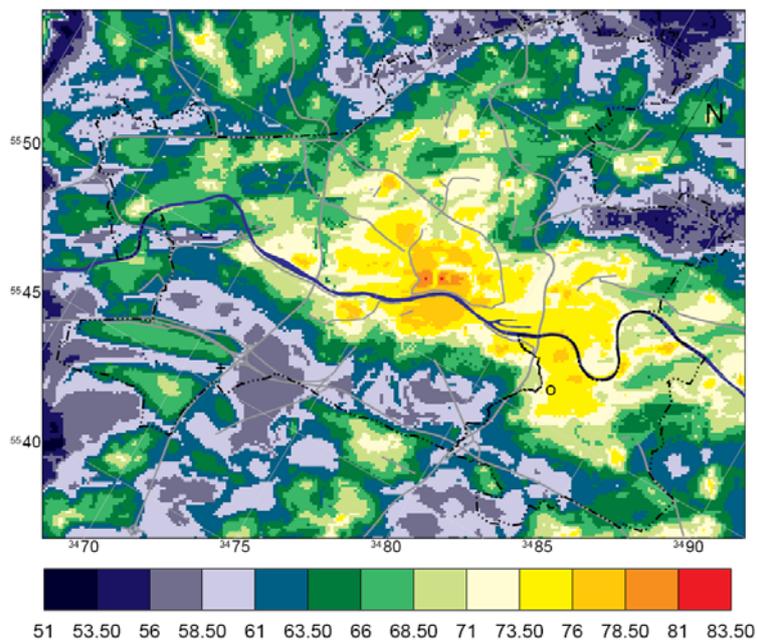
Die vorliegenden Evaluierungsergebnisse deuten darauf hin, dass die Quadermethode mit den Werten der Eckpunkte, wie sie hier verwendet wurden, gut für die Analyse der Wärmebelastung am Tage und Abend geeignet ist, jedoch weniger für extreme und seltene Ereignisse in der Nacht. Deshalb und aufgrund der gezeigten Abweichungen des Evaluationslaufs werden im Folgenden die Ergebnisse der Sommertage und Sommerabende vorgestellt und diskutiert. Auf die weitere Darstellung der übrigen klimatologischen Kenntage wird verzichtet, da diese Ergebnisse am wenigsten belastbar sind.

5.2 Analyse des Ist-Zustands 1971 - 2000

Die Karte der resultierenden Anzahl an Sommertagen ($N_{T_{max} \geq 25}$) für EVAL zeigt, dass diese in Gebieten mit hoher Gebäudedichte, wie in der Innenstadt von Frankfurt und am Flughafen Frankfurt/Main, am höchsten ist (Abbildung 5-1a). Der Karte mit der Anzahl an Sommerabenden ist zu entnehmen, dass die städtische Wärmeinsel am Abend und in der Nacht sehr deutlich auf den Bereich der Innenstädte von Frankfurt und Offenbach begrenzt ist (Abbildung 5-1b). Im Folgenden werden beispielhaft die Innenstadt mit dem Bankenviertel und der Flughafen Frankfurt/Main näher betrachtet.



(a) Anzahl Sommertage ($N_{T_{max} \geq 25}$)



(b) Anzahl Sommerabende ($N_{T_{22} \geq 20}$)

Abbildung 5-1 Karten der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage (a) und Sommerabende (b) für den Evaluierungslauf 1971 - 2000. Die Position der DWD-Messtationen sind mit einem '+' für den Flughafen Frankfurt/Main und einem 'o' für Offenbach gekennzeichnet.

Abbildung 5-2 zeigt die entsprechenden Kartenausschnitte für die Frankfurter Innenstadt. Im Bankenviertel ist die Anzahl der Sommertage um ca. 3 bis 10 Tage geringer als in dessen Umgebung (vgl. Abbildung 5-2a). Dies ist durch den Schattenwurf der Hochhäuser verursacht, welche die Tageshöchsttemperatur begrenzt. In den Abendstunden und während der Nacht ist die Anzahl an Sommerabenden im Bankenviertel um etwa 3 bis 8 Tage höher als in dessen Umgebung (vgl. Abbildung 5-2b). Dies ist sowohl durch die höhere Wärmekapazität der Ge-

bäude im Vergleich zur Freifläche (Oke, 1987; Hart und Sailor, 2009) als auch die verringerte Ventilation verursacht. Aber auch die durch die Gebäude verursachte reduzierte Himmelsicht⁵ führt zu einer Verringerung der nächtlichen Ausstrahlung und damit zu einer geringeren Abkühlung in der Nacht. Somit kann die nächtliche Wärmeinsel in der Stadt als Folge der Wärmespeicherung am Tage interpretiert werden (Giridharan et al., 2005). Am Beispiel des Bankenviertels zeigt sich dieser Effekt besonders ausgeprägt. Wegen der relativ großen Gebäudevolumen dort, wird während des Tages sehr viel Wärme gespeichert, die in der Nacht nur langsam abgegeben wird. Dies wiederum führt zu der relativ hohen Anzahl an Sommerabenden (Abbildung 5-2).

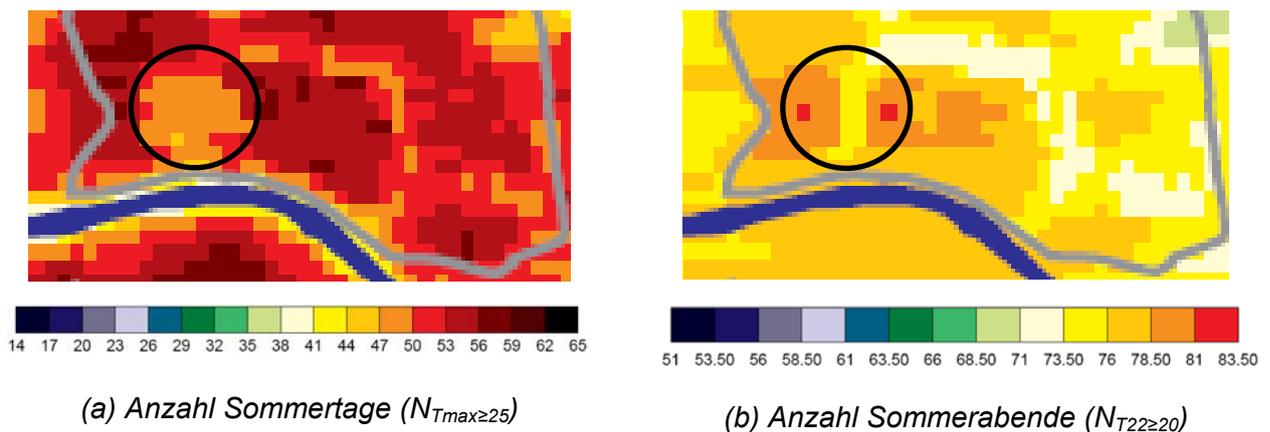


Abbildung 5-2: Kartenausschnitte aus Abbildung 5-1 für den Innenstadtbereich von Frankfurt/Main. Das Bankenviertel ist mit einem Kreis markiert. Mittlere jährliche Anzahl Sommertage (a) und Sommerabende (b) für 1971 - 2000 (EVAL).

Abbildung 5-2a ist auch zu entnehmen, dass am Main weniger Sommertage als in der angrenzenden Bebauung auftreten. Dies ist sowohl auf die kühlende Wirkung des Flusses und der teilweise angrenzenden Grünstreifen als auch auf die bessere Durchlüftung längs des Mainverlaufs zurückzuführen. Auch die Grünanlagen des halbkreisförmigen Anlagenrings (ehemalige Wallanlagen) heben sich teilweise von der umgebenden Bebauung ab: weniger Sommertage und Sommerabende, weisen auf die kühlende und abschattende Wirkung des Bewuchses hin. Aber auch eine bessere Durchlüftung der stellenweise sehr breiten gebäudefreien Abschnitte ist nicht auszuschließen.

Die Kartenausschnitte für den Flughafen Frankfurt/Main verdeutlichen, dass die dichte Bebauung dort (siehe Abbildung 4-2) zu einer höheren Anzahl sowohl an Sommertagen, als auch an Sommerabenden führt (Abbildung 5-3). Die starke Versiegelung durch die Start- und Landebahnen zwischen den Gebäudekomplexen hat eine höhere Anzahl an Sommertagen im Vergleich zur unbebauten Umgebung zur Folge. Die Anzahl der Sommerabende in diesem Gebiet entspricht jedoch in etwa der der bewaldeten Umgebung. Dies kann dadurch erklärt werden dass einerseits über versiegelten Flächen die höhere Wärmekapazität die abendliche Abküh-

⁵ **Himmelsicht:** Die dreidimensionale Geometrie der Städte bewirkt eine eingeschränkte Himmelsicht bzw. eine Anhebung des Horizonts auf Höhe der Gebäudedächer.

lung im Vergleich zur Freifläche abschwächt, und andererseits im Wald die Abstrahlung von Wärme durch das Laub der Bäume behindert.

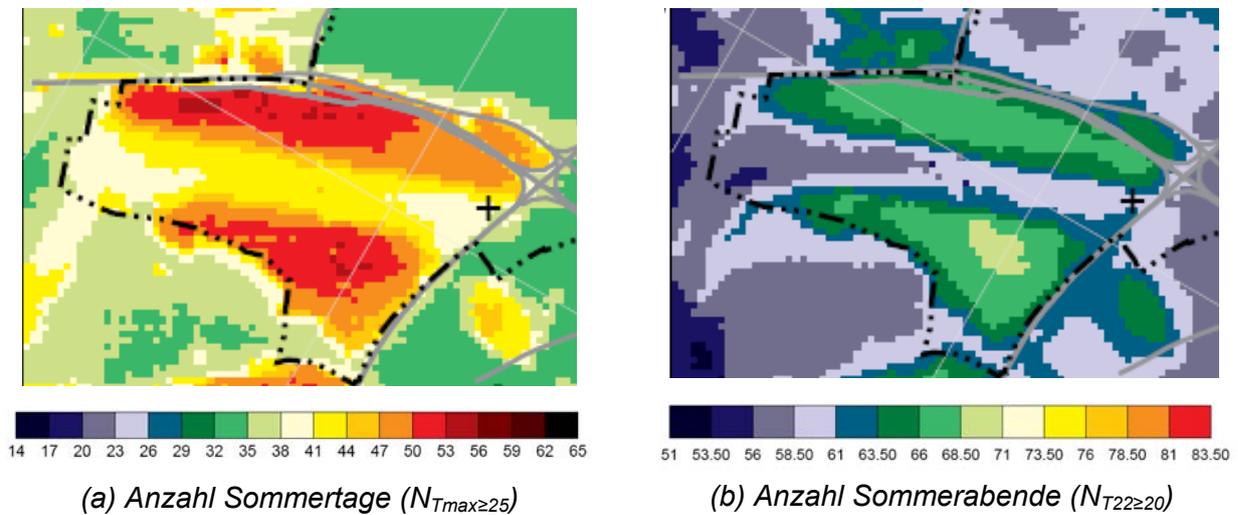


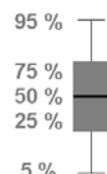
Abbildung 5-3: Kartenausschnitte aus Abbildung 5-1 für den Flughafen von Frankfurt/Main. Mittlere jährliche Anzahl Sommertage (a) und Sommerabende (b) für 1971 - 2000 (EVAL).

5.3 Auswirkungen unterschiedlicher Bebauungsstrukturen

Um die klimatologischen Auswirkungen der verschiedenen Landnutzungsklassen inklusive Bebauungsstrukturen systematisch zu untersuchen, wurden statistische Auswertungen durchgeführt, die mit einem Box-Whisker-Plot⁶ visualisiert werden.

Abbildung 5-4a zeigt für die Anzahl Sommertage ($N_{T_{max} \geq 25}$) die Box-Whisker-Plots für jede einzelne Landnutzungs-kategorie im Mittel über das Stadtgebiet von Frankfurt/Main für den Ist-Zustand 1971 - 2000 (EVAL). Die geringste Anzahl Sommertage entwickelt sich im Wald. Sie ist signifikant geringer als die Anzahl Sommertage gemittelt über alle anderen Landnutzungs-klassen. Die geringe Anzahl im Wald ist sowohl durch den Schattenwurf der Bäume als auch durch die Größe des zusammenhängenden Waldgebietes südlich des Mains verursacht. Unabhängig von der Landnutzung der betrachteten Gitterzelle findet immer auch ein horizontaler Austausch mit benachbarten Gitterzellen anderer Landnutzungen statt (Hommel, 2010). Durch die Größe des Waldgebietes ist der Einfluss von stark bebauten, benachbarten Gitterzellen gering. Parks und Grünflächen im Stadtgebiet haben, gerade bei wärmebelasteten Wetterlagen im Sommer, für die Stadtbewohner eine nicht unwesentliche Erholungswirkung. Sie bieten schattenspendende Bäume und sind kühler als ihre bebaute Umgebung. Bereits eine Freiflä-

⁶ Der **Box-Whisker-Plot** ist ein Kasten-Diagramm, bei dem das obere Ende des Kastens das 75% Quantil und das untere Ende des Kastens (Box) das 25% Quantil zeigt. Dabei beschreibt das 25% Quantil den Wert, der von 25% der Werte einer Stichprobe unterschritten wird. Der Median entspricht dem 50% Quantil und ist mit einem dicken Querstrich gekennzeichnet. Die aus dem Kasten herausragenden Linien (Whisker) umfassen bei der gewählten Darstellung den Bereich zwischen dem 5% und 95%Quantil und entspricht dem 90% Konfidenzintervall.



che (mit Grasbewuchs) bewirkt durch die Veränderung der Energiebilanz an ihrer Oberfläche, vor allem durch Verdunstungsprozesse, im Vergleich zur bebauten Umgebung eine Abkühlung der bodennahen Luftschicht. Baumbewuchs verhindert durch Abschattung zusätzlich die Aufheizung des Erdbodens, besonders von versiegelten Oberflächen. Darüber hinaus kann Schattenwurf durch Bäume auch die Überhitzung von Gebäuden verringern. Einen ähnlichen Effekt haben Fassaden- und Dachbegrünung (Köhler, 2008). Eine geringere Erwärmung des Stadtkörpers tagsüber bedeutet auch angenehmere Temperaturen in der Nacht. Untersuchungen haben gezeigt, dass schon kleinere Parkanlagen mit Flächen unter 10 ha eine deutlich temperaturreduzierende Wirkung aufweisen (Bongardt, 2006). Wasserflächen und Freiflächen zeichnen sich ebenfalls durch eine geringere Anzahl an Sommertagen im Vergleich zu bebauten Landnutzungsklassen aus. Im Allgemeinen nimmt die Anzahl Sommertage mit zunehmender Gebäudedichte zu, sofern die Gebäude niedrig bleiben. Jedoch ergibt sich kein statistisch signifikanter Unterschied in der Anzahl Sommertage zwischen den einzelnen Bebauungsstrukturen.

In den Abend- und Nachtstunden spielt der Schattenwurf der Hochhäuser keine Rolle mehr, so dass sich daher im Bankenviertel die größte Anzahl an Sommerabenden entwickelt (Abbildung 5-4b). Auch der Effekt der Wasserflächen hat sich umgekehrt. Von einer geringeren Belastung am Tage, kommt es zu einer größeren Belastung in der Nacht, da Wasser ähnlich wie Gebäude tagsüber viel Wärme speichert und nachts wieder an die Atmosphäre abgibt. Nachts fällt im Wald der Abschattungseffekt weg und die Ausstrahlung ist reduziert, so dass der Unterschied zu den übrigen Landnutzungsklassen nicht mehr signifikant ist. Die mittlere Anzahl an Sommerabenden im Wald entspricht damit in etwa denen der Freifläche.

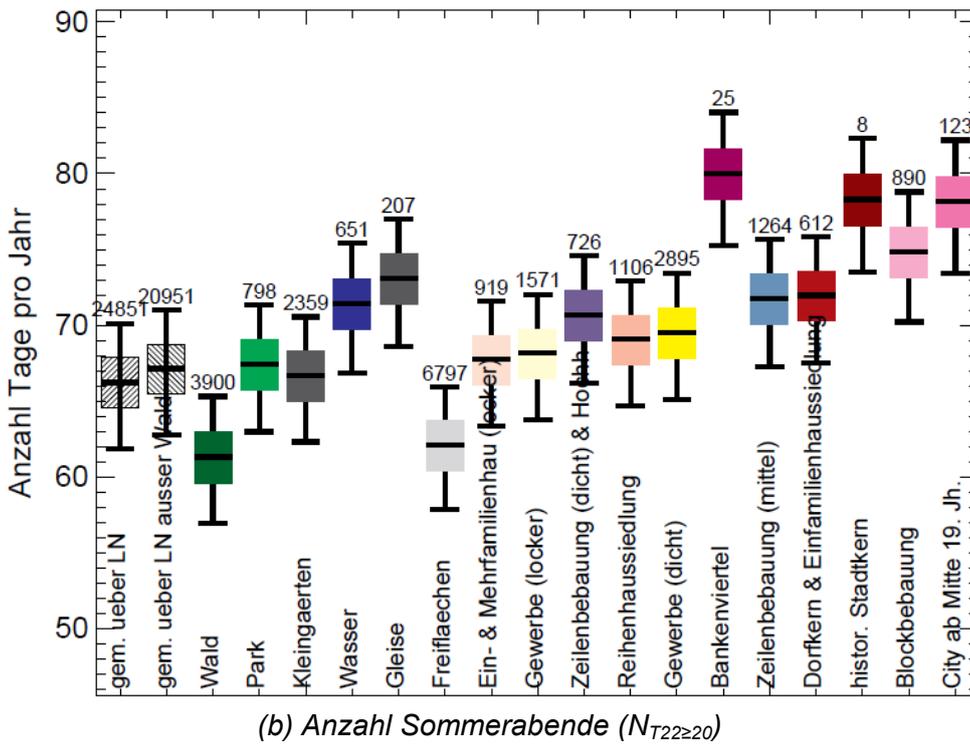
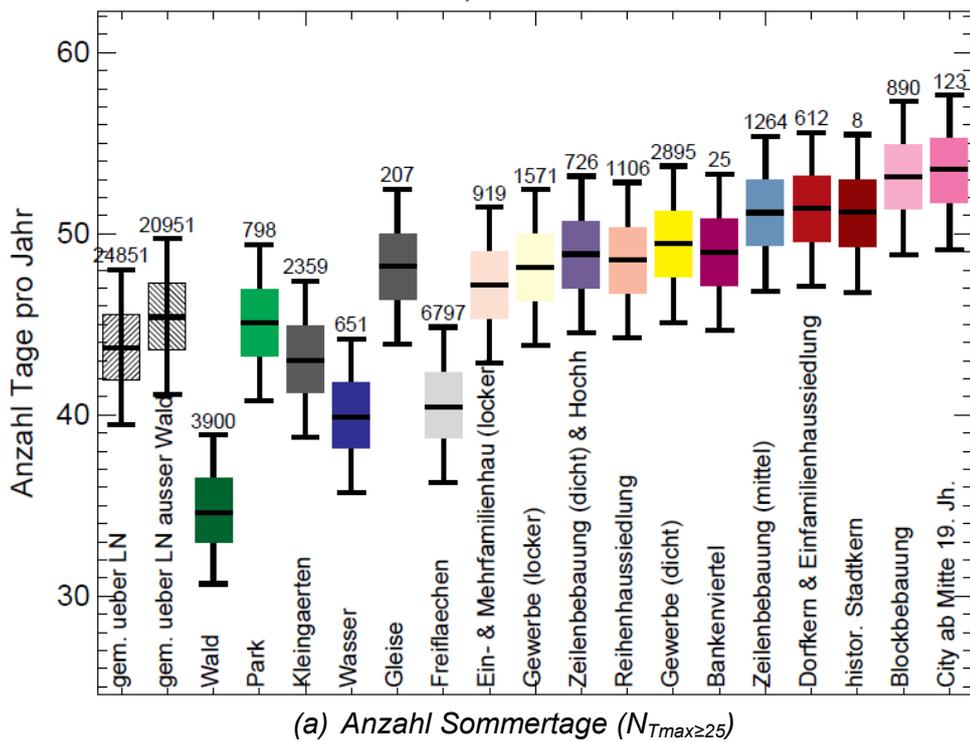


Abbildung 5-4: Box-Whisker-Plots für jede Landnutzungs-Klasse im Mittel über das Stadtgebiet von Frankfurt für 1971 - 2000 (EVAL), sowohl für die mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen (a) als auch Sommerabenden (b). Die beiden linken Klassen beziehen sich jeweils auf die Anzahl Tage gemittelt über alle Landnutzungen (1. Klasse von links) bzw. gemittelt über alle Landnutzungen mit Ausnahme des Waldes (2. Klasse von links). Die Zahlen über den Box-Whiskers geben die Anzahl der Gitterzellen für jede Landnutzungs-Klasse an.

5.4 Auswirkungen der geplanten Bebauung

Zur Untersuchung der Auswirkungen künftiger Planungs- und Bauvorhaben bzw. Grünflächenänderungen auf das Stadtklima stellte die Stadt Frankfurt Informationen über zukünftig geplante Landnutzungsänderungen (neue Bebauungsgebiete, Änderungen von Bebauungsstrukturen, Rückbau zu Grünflächen etc.) zur Verfügung (s. Kap. 4.1).

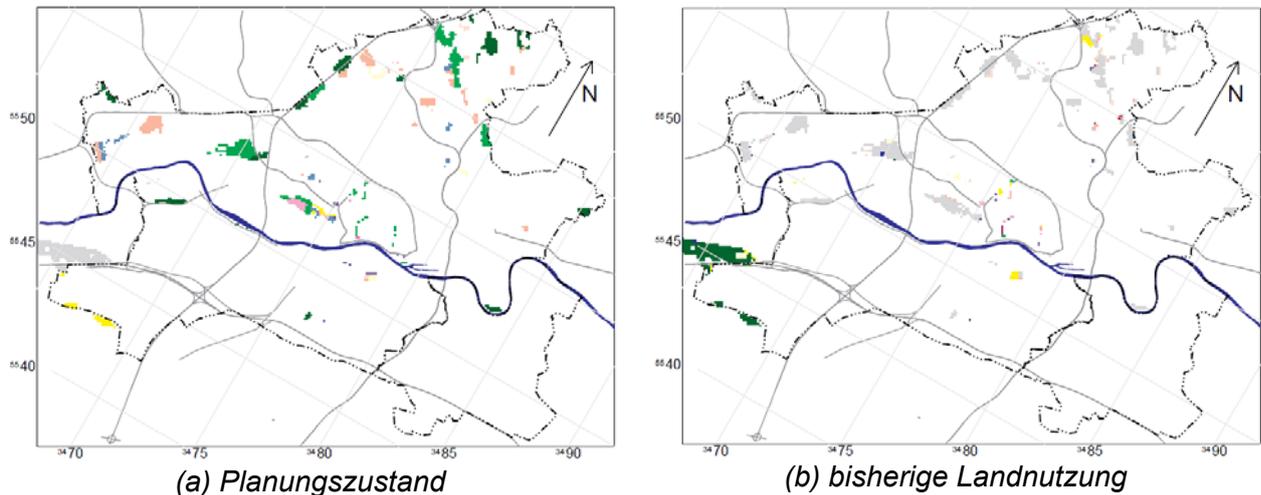


Abbildung 5-5: Geplante Landnutzung (a) im Vergleich zur bisherigen Landnutzung (b): 3 – Wald; 4 - Park; 5 – Gewerbe (dicht); 6 – Gewerbe (locker); 7 – Freiflächen; 9 – Wasser; 10 – Bankenviertel; 11 - Ein- Mehrfamilienhaus (locker); 12 – Dorfkern u. Einfamilienhaussiedlung (dicht); 13 - Reihenhaussiedlung; 14 – Zeilenbebauung (mittel); 15 – Zeilenbebauung (dicht) & Hochhäuser; 16 - Blockbebauung; 17 – City ab Mitte 19. Jh.

Abbildung 5-5 zeigt die Flächen auf denen die Landnutzung geändert wird: In Abbildung 5-5a ist die neue und in Abbildung 5-5b die bisherige Landnutzung auf diesen Flächen dargestellt. Die geplanten Baumaßnahmen und Grünanlagen im Stadtgebiet werden im Wesentlichen auf bisherigen Freiflächen umgesetzt (Abbildung 5-5). Diese Planungen sind über das gesamte Stadtgebiet verteilt. Deutlich erkennbar am linken Rand des Modellgebiets ist die Flughafenerweiterung (Landebahn Nordwest), die sich auf einer bisher bewaldeten Fläche befindet. Die gesamte Landnutzung des Bestands ist in Abbildung 4-2 dargestellt.

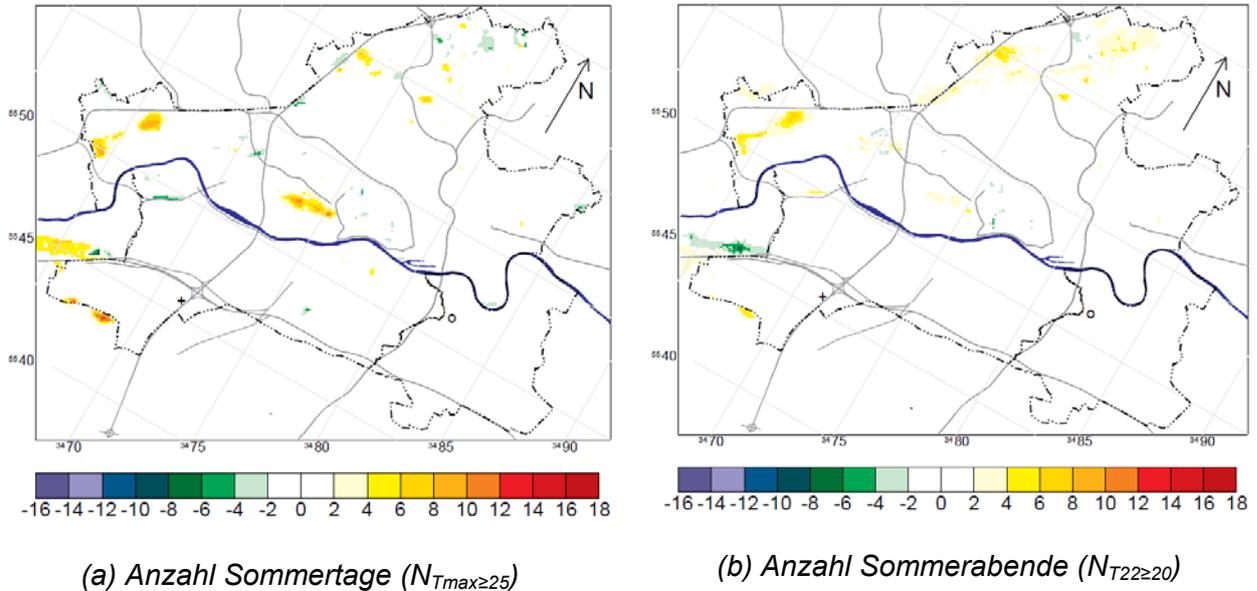


Abbildung 5-6: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage (a) und Sommerabende (b) auf Grund der geplanten Landnutzungsänderungen für 1971 - 2000 (EVAL).

Im Vergleich der Simulationsergebnisse für den Ist-Zustands mit denen des Planzustands (Abbildung 5-6) wird deutlich, dass Baumaßnahmen überwiegend zu einer Erhöhung und die neu geschaffenen Grünanlagen überwiegend zu einer Reduzierung der Anzahl Sommertage bzw. Sommerabende führen. Je stärker der bauliche Unterschied zum derzeitigen Bestand, desto größer ist die Zunahme des klimatologischen Kenntages. In der unmittelbaren Umgebung der erfolgten Landnutzungsänderungen sind die Auswirkungen recht deutlich. Gemittelt über das Stadtgebiet von Frankfurt jedoch sind die Auswirkungen gering. Im Mittel nehmen jedoch sowohl die Anzahl an Sommertagen als auch die Anzahl an Sommerabenden auf Grund der Planungsmaßnahmen zu. Das heißt, die Neuanlage der Grünanlagen kann die Erhöhung der klimatologischen Kenntage auf Grund der Baumaßnahmen im Mittel nicht vollständig aufwiegen (Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Räumliches Mittel über das Stadtgebiet von Frankfurt, Minimum und Maximum der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage und Sommerabende auf Grund von Landnutzungsänderungen.

Klimaindex	Mittlere Änderung	Minimum	Maximum
Sommertage ($N_{T_{max} \geq 25}$)	+0,06	-9,9	+12,7
Sommerabende ($N_{T_{22} \geq 20}$)	+0,26	-9,6	+7,7

Die Auswirkungen durch das geplante Europaviertel auf dem Gelände des ehemaligen Hauptgüterbahnhofs zeigt Abbildung 5-7. Die Fläche um die Bahngleise, welche in der Bestandssimulation bereits als Freifläche modelliert wurde, wird im Wesentlichen mit einer Block- (Klasse 16) und Zeilenbebauung (Klasse 14) neu bebaut. Kleinere Gebiete enthalten eine dichte Zeilenbebauung (Klasse 15) und ein dichtes (Klasse 5) und lockeres (Klasse 6) Gewerbegebiet. Um die Blockbebauung wird ein recht großzügiger Park angelegt.

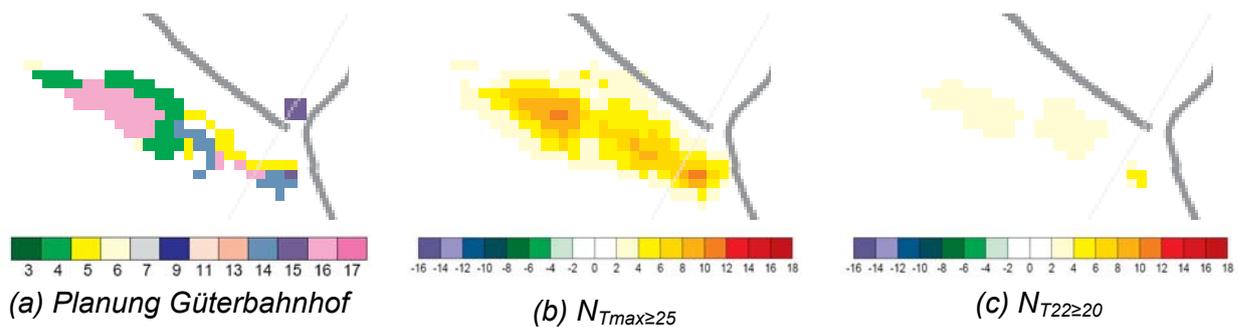


Abbildung 5-7: Kartenausschnitte für den Bereich Hauptgüterbahnhof mit geplanter Landnutzung (a). Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage (b) und der Anzahl Sommerabende (c) im Vergleich zum Ist-Zustand (Abbildung 5-1), jeweils für 1971 - 2000 (EVAL).

Die Realisierung dieser Planungsmaßnahme führt im Kern der Nachverdichtung zu einer Erhöhung der Anzahl Sommertage (Abbildung 5-7b) von bis zu 10 bis 12 Tagen pro Jahr. Durch die Wechselwirkung zwischen der Blockbebauung und dem umgebenden Park wird die Wärmebelastung in den äußeren Bereichen der Bebauung abgeschwächt. Umgekehrt dominiert im umgebenden Park der Einfluss der benachbarten Blockbebauung, so dass sich eine leichte Zunahme der Sommertage ergibt. Die Erhöhung der Anzahl Sommerabende (Abbildung 5-7c) ist mit maximal 4 bis 6 Tagen pro Jahr im Gebiet der neu errichteten Zeilenbebauung deutlich geringer als die der Sommertage. Somit kann durch die Anlage des Parks eine zusätzliche Belastung in den Abendstunden verhindert werden.

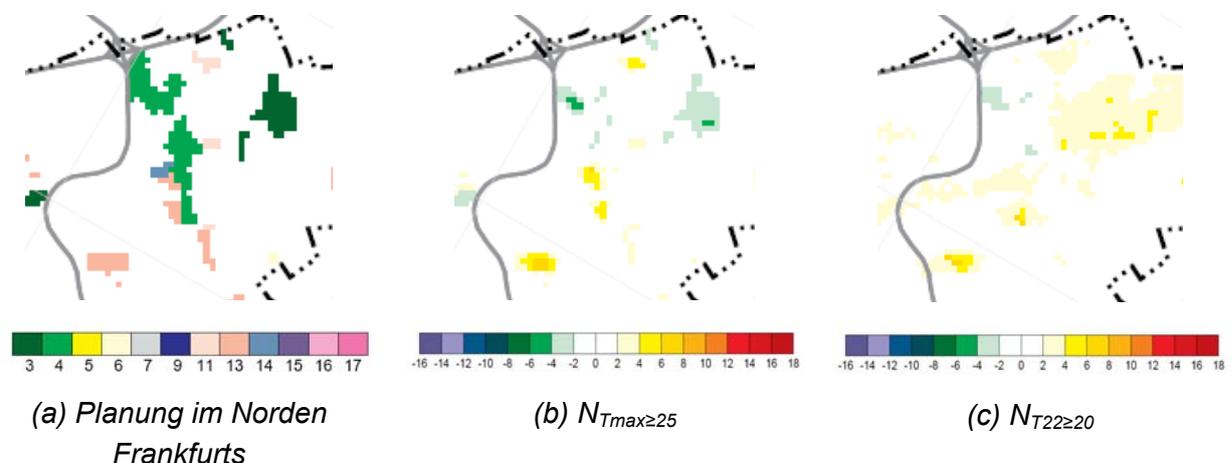


Abbildung 5-8: Kartenausschnitte für den Bereich im Norden Frankfurts mit geplanter Landnutzung (a). Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage (b) und der Anzahl Sommerabende (c) im Vergleich zum Ist-Zustand (Abbildung 5-1), jeweils für 1971 - 2000 (EVAL).

Im Norden von Frankfurt wird ein Teil der Freiflächen mit einer Reihenhaussiedlung (Klasse 13) bebaut. Zusätzlich wird eine kleinere lockere Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung (Klasse 11) und Zeilenbebauung (Klasse 14) errichtet. In einem weiteren Teil der Freiflächen dieser Region werden parkähnliche Grünflächen und ein Wald angelegt.

Auch hier führt die Realisierung der Planungsmaßnahme in der neu entstandenen Reihenhaussiedlung zu einer Erhöhung der Anzahl Sommertage (Abbildung 5-8b). Sie ist jedoch mit

etwa 6 bis 8 Tagen pro Jahr geringer als in der oben diskutierten geplanten Blockbebauung am Güterbahnhof. Der Neubau der Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung hat noch geringere Auswirkungen auf die Anzahl Sommertage. Sowohl der geplante Park als auch der Wald reduzieren überwiegend die Anzahl Sommertage, in einigen Bereichen sogar um bis zu 4 bis 6 Tagen pro Jahr. Die Erhöhung der Anzahl Sommerabende (Abbildung 5-8c) liegt bei maximal 4 bis 6 Tagen. In weiten Teilen des betroffenen Gebietes, inklusive des neu angelegten Waldes, beträgt die Erhöhung von $N_{T_{22} \geq 20}$ etwa 2 - 4 Tage pro Jahr. Lediglich in der größten der neu bepflanzten Parkanlagen kann eine Reduktion von $N_{T_{22} \geq 20}$ um etwa 2 bis 4 Tage pro Jahr erreicht werden.

5.5 Regionale Klimaprojektionen als Eingabe für die Quader-Methode

Anstatt der Stationsmessungen können auch regionale Klimaprojektionen als Eingabe für die Quader-Methode verwendet werden. Auch diese Ergebnisse müssen evaluiert werden. Dies geschieht hier, indem aus den Kontrollläufen der regionalen Klimaprojektionen (C20) gleichfalls der Zeitraum 1971 - 2000 simuliert und mit dem Evaluationslauf 1971 - 2000 verglichen wird (siehe Kap. 3.4). Zur Berücksichtigung der Unsicherheit der regionalen Klimamodelle verwenden wir ein Ensemble regionaler Klimaprojektionen bestehend aus REMO, CLM, WETTREG und STAR (Kap. 0) Projektionen. Im Folgenden werden diese Simulationen mit dem Namen des antreibenden regionalen Klimamodells benannt.

Der visuelle Vergleich der vier mit regionalen Klimaprojektionen angetriebenen Simulationen für den Zeitraum 1971 - 2000 in Abbildung 5-9 mit EVAL in Abbildung 5-1 zeigt, dass die Klimaprojektionen mit REMO, WETTREG und STAR sehr gut mit EVAL übereinstimmen. Die Simulation mit CLM als Eingabe für die Quader-Methode liefert jedoch eine deutlich geringere Anzahl Sommertage ($N_{T_{max} \geq 25}$).

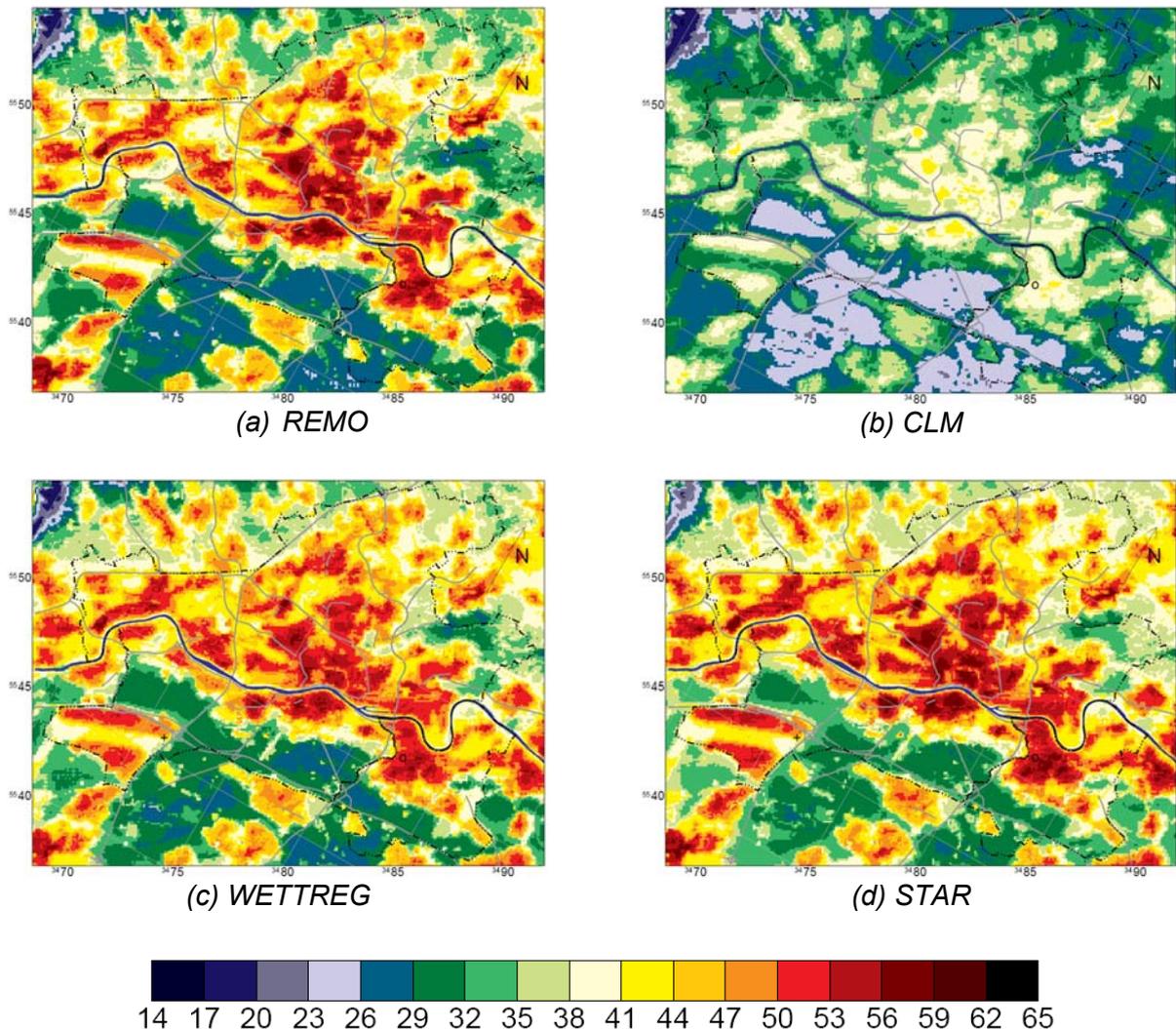


Abbildung 5-9: Karte der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage $N_{T_{max} \geq 25}$ aus REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d) für 1971 - 2000 (C20).

Zur Abschätzung der Unsicherheit und zur Einschätzung der internen Variabilität der 30-jährigen Stichprobe wird ein statistisches Verfahren (nicht-parametrisches Bootstrap-Verfahren) zur Bestimmung der Konfidenzintervalle angewendet. Details dazu sind Früh et al. (2011) zu entnehmen. Dieses Verfahren liefert das 5% und 95% Quantil, welche als untere und obere Grenze des Konfidenzintervalls auf dem 90% Signifikanzniveau zu verstehen sind. Dieses 90% Konfidenzintervall berücksichtigt die Unsicherheit auf Grund der kurzfristigen natürlichen Variabilität des Klimasystems (Kendon et al., 2008).

Zum besseren Vergleich von EVAL, REMO, CLM, WETTREG und STAR sind in Tabelle 5-3 die mittlere jährliche Anzahl Sommertage ($N_{T_{max} \geq 25}$) gemittelt über das Stadtgebiet von Frankfurt am Main sowie das Minimum und Maximum zusammengefasst.

Tabelle 5-3: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage zusammen mit dem räumlichen Mittel des Konfidenzintervalls auf dem 90% Signifikanzniveau für EVAL, REMO, CLM, WETTREG und STAR, jeweils bezogen auf das Stadtgebiet von Frankfurt (1971 - 2000).

Antrieb	Mittel	Minimum	Maximum	Max. - Min.	90% Konfidenzintervall
EVAL	43,8	29,4	58,8	29,4	8,5
REMO	42,0	25,5	61,0	35,5	9,9
CLM	33,4	22,8	43,2	20,4	8,1
WETTREG	42,9	26,8	59,2	32,4	5,5
STAR	44,0	28,8	60,7	31,9	8,4

Auch hier sieht man die gute Übereinstimmung zwischen den Mittelwerten von REMO, WETTREG and STAR mit EVAL, jedoch eine weniger gute zwischen CLM und EVAL. Die räumliche Variabilität (Max. - Min.) von EVAL wird von REMO, WETTREG und STAR leicht überschätzt, von CLM jedoch unterschätzt. Des Weiteren sind in Tabelle 5-3 die räumlichen Mittel des Konfidenzintervalls auf dem 90% Signifikanzniveau (Differenz zwischen dem 95% und 5% Quantil) aufgelistet. Für CLM und STAR entspricht die Breite des Konfidenzintervalls dem von EVAL. REMO dagegen überschätzt und WETTREG unterschätzt die jährlichen Schwankungen im Vergleich zu EVAL. Dies geht auch aus dem Vergleich der Box-Whisker-Plots (siehe S. 26) hervor (Abbildung 5-10a). Die entsprechende Auswertung bezüglich der Sommerabende zeigt ähnliche Zusammenhänge (Abbildung 5-10b).

Diese Vergleiche zeigen, dass für die Beschreibung des Ist-Zustands 1971 - 2000 stets der Evaluationslauf (EVAL) heranzuziehen ist. Für die nachfolgende Darstellung zukünftiger Situationen mit Hilfe der vier Klimaprojektionen ist stets die Differenz zu ihren Kontrollläufen 1971 - 2000 und nicht zum Evaluationslauf zu bilden. Damit werden die in Tabelle 5-3 gezeigten Abweichungen zum Gebietsmittel (sog. BIAS) weitgehend minimiert.

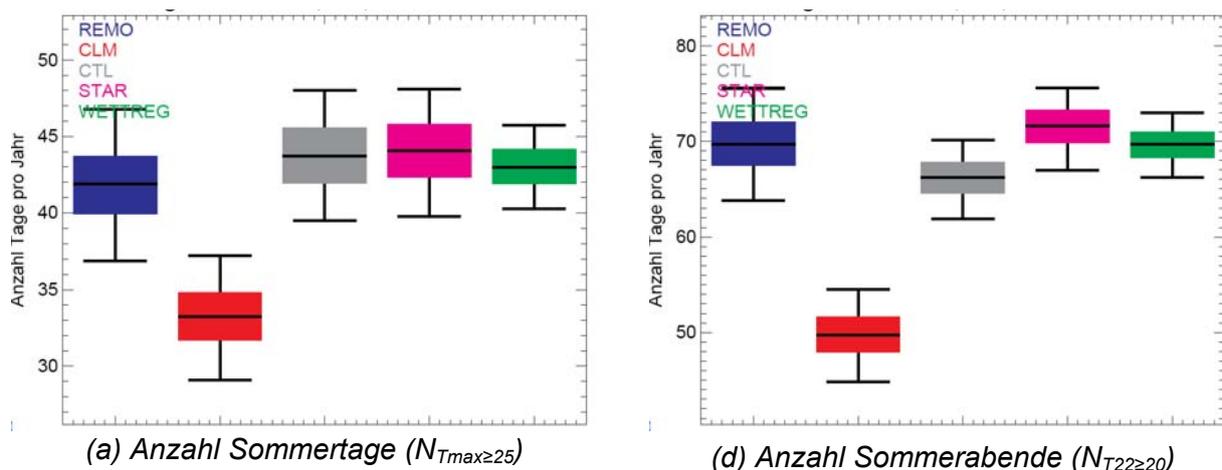


Abbildung 5-10: Box-Whisker-Plots für die Anzahl Sommertage (a) und Sommerabende (b) gemittelt über das Stadtgebiet von Frankfurt für EVAL (grau), REMO (blau), CLM (rot), WETTREG (grün) und STAR (magenta) für den Zeitraum 1971 - 2000.

6 Klimaänderungssignale in der Zukunft

6.1 Auswirkung der Klimaänderung bis zum Zeitraum 2021 - 2050

Zur Abschätzung der Änderung der klimatologischen Kenntage in Folge der globalen Erwärmung wird für das MUKLIMO_3 Modellgebiet ein Vergleich der zukünftigen Bedingungen (2021 - 2050) nach dem SRES A1B Szenario (Nakicenovic und Swart, 2000) mit denen der Kontrollperiode (C20) in der Vergangenheit (1971 - 2000) durchgeführt (siehe Kap. 3.1). Zunächst werden Ergebnisse zu den Auswirkungen des Klimawandels bei aktueller Landnutzung, im nachfolgenden Kapitel 6.2 dann in Kombination mit geplanten Landnutzungsänderungen präsentiert.

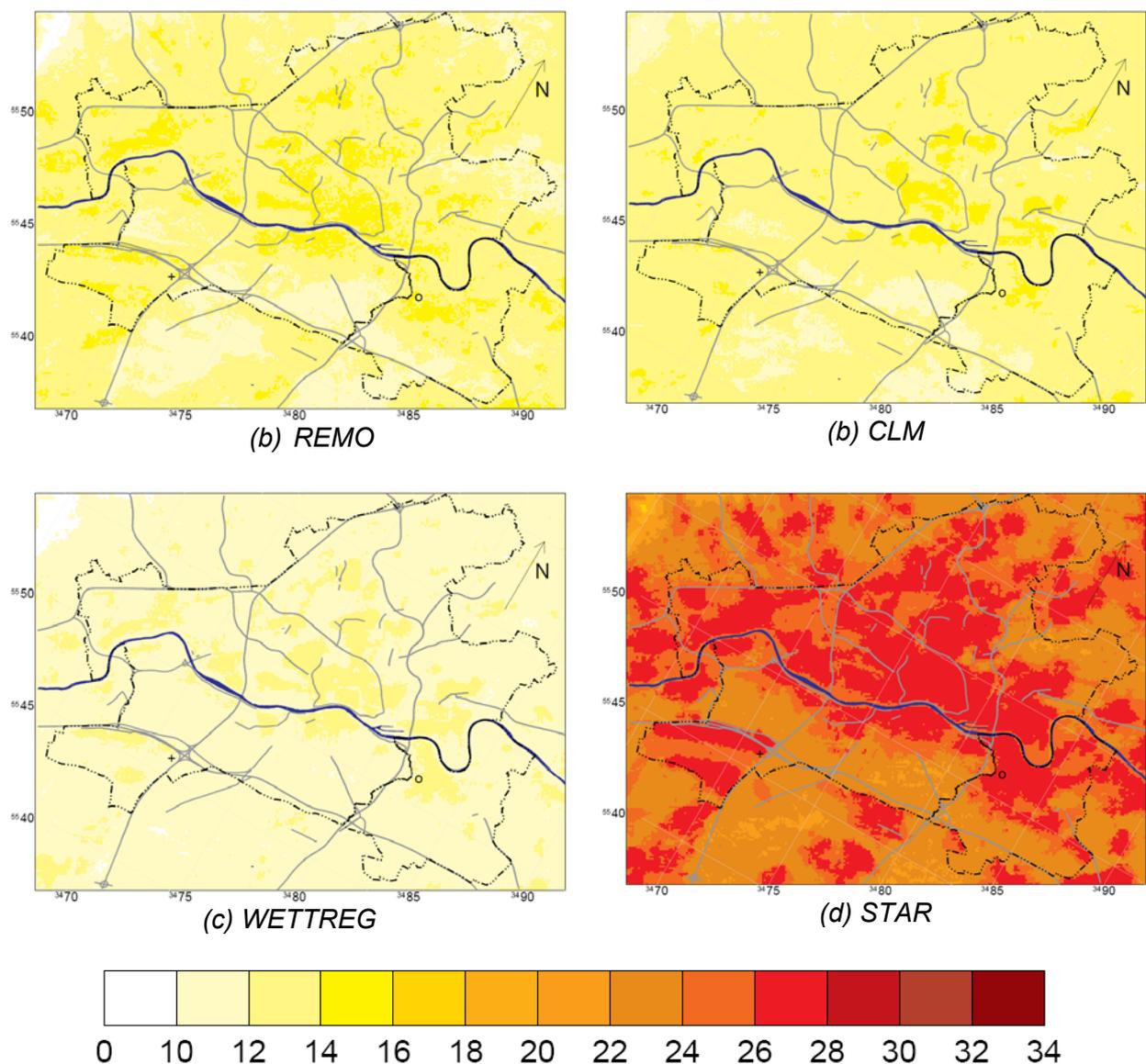


Abbildung 6-1: Karten der Änderungen der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage $\Delta N_{T_{\max} \geq 25}$ als Differenz zwischen den Zeiträumen 2021 - 2050 (A1B) und 1971 - 2000 (C20) für REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d).

Abbildung 6-1 zeigt die Änderung der Anzahl Sommertage ($\Delta N_{T_{max} \geq 25}$) für die vier Klimaprojektionen REMO, CLM, WETTREG und STAR als Differenz der Zeiträume 2021 - 2050 (A1B) zu 1971 - 2000 (C20) (vgl. Abbildung 5-9). Es wird deutlich, dass REMO, CLM und WETTREG sehr ähnliche Ergebnisse für $\Delta N_{T_{max} \geq 25}$ projizieren. Das Änderungssignal aus STAR ist jedoch deutlich größer. Insgesamt ist die räumliche Variabilität des Änderungssignals gering. Am ehesten ist eine räumliche Differenzierung bei STAR zu erkennen (z.B. höhere Werte über dem Flughafengelände, geringere über dem Stadtwald).

Tabelle 6-1: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage ($\Delta N_{T_{max} \geq 25}$) zusammen mit dem räumlichen Mittel des Konfidenzintervalls auf dem 90% Signifikanzniveau für REMO, CLM, WETTREG und STAR. Die Werte zeigen die Differenz zwischen den Zeiträumen 2021 - 2050 (A1B) und 1971 - 2000 (C20), gemittelt über das Stadtgebiet von Frankfurt.

Antrieb	Mittel	Minimum	Maximum	Max. - Min.	90% Konfidenzintervall
REMO	13,1	11,1	15,1	4,0	16,6
CLM	12,9	11,4	15,1	3,7	14,4
WETTREG	11,3	9,7	13,7	4,0	9,5
STAR	25,2	21,6	28,1	6,5	12,0

Die Werte in Tabelle 6-1 zeigen die Änderungssignale (Mittel, Minimum, Maximum), also die Differenzen zwischen den Zeiträumen 2021 - 2050 und 1971 - 2000. Auch hier wird deutlich, dass die räumliche Variabilität innerhalb des Stadtgebietes (Differenz zwischen Maximum und Minimum) von $\Delta N_{T_{max} \geq 25}$ gering ist und lediglich 4 bis 7 Tage pro Jahr beträgt. Das bedeutet, dass für das Änderungssignal der Unterschied zwischen dem Stadtgebiet und dem Umland sehr gering ist.

Des Weiteren zeigt sich, dass die räumliche Variabilität von $\Delta N_{T_{max} \geq 25}$ kleiner ist als die über das Stadtgebiet gemittelte Breite des Konfidenzintervalls auf dem 90% Signifikanzniveau. Aus dieser Tatsache kann geschlossen werden, dass die Zunahme von Sommertagen in der Stadt nicht signifikant höher ist als die Zunahme im Umland. Das heißt, dass der derzeitige Unterschied zwischen der Stadt und dem Umland in der Zukunft erhalten bleibt und nicht intensiviert wird. Allerdings verschiebt die Klimaänderung die Wärmebelastung sowohl in der Stadt als auch in deren Umland relativ gleichmäßig auf ein höheres Niveau.

Das räumliche Mittel über das Stadtgebiet von Frankfurt von $\Delta N_{T_{max} \geq 25}$ ist für REMO, CLM und WETTREG sehr ähnlich und projiziert eine mittlere Zunahme von etwa 30% (ca. +12 Sommertage/Jahr). Auf der Basis der Klimaprojektion STAR ergibt sich für Frankfurt allerdings ein deutlich höheres Änderungssignal $\Delta N_{T_{max} \geq 25}$ (ca. +25 Sommertage/Jahr). Dies kann teilweise auf den stärkeren regionalen Temperaturanstieg von STAR im Vergleich zu den anderen regionalen Klimaprojektionen (siehe Abbildung 3-4) zurückgeführt werden.

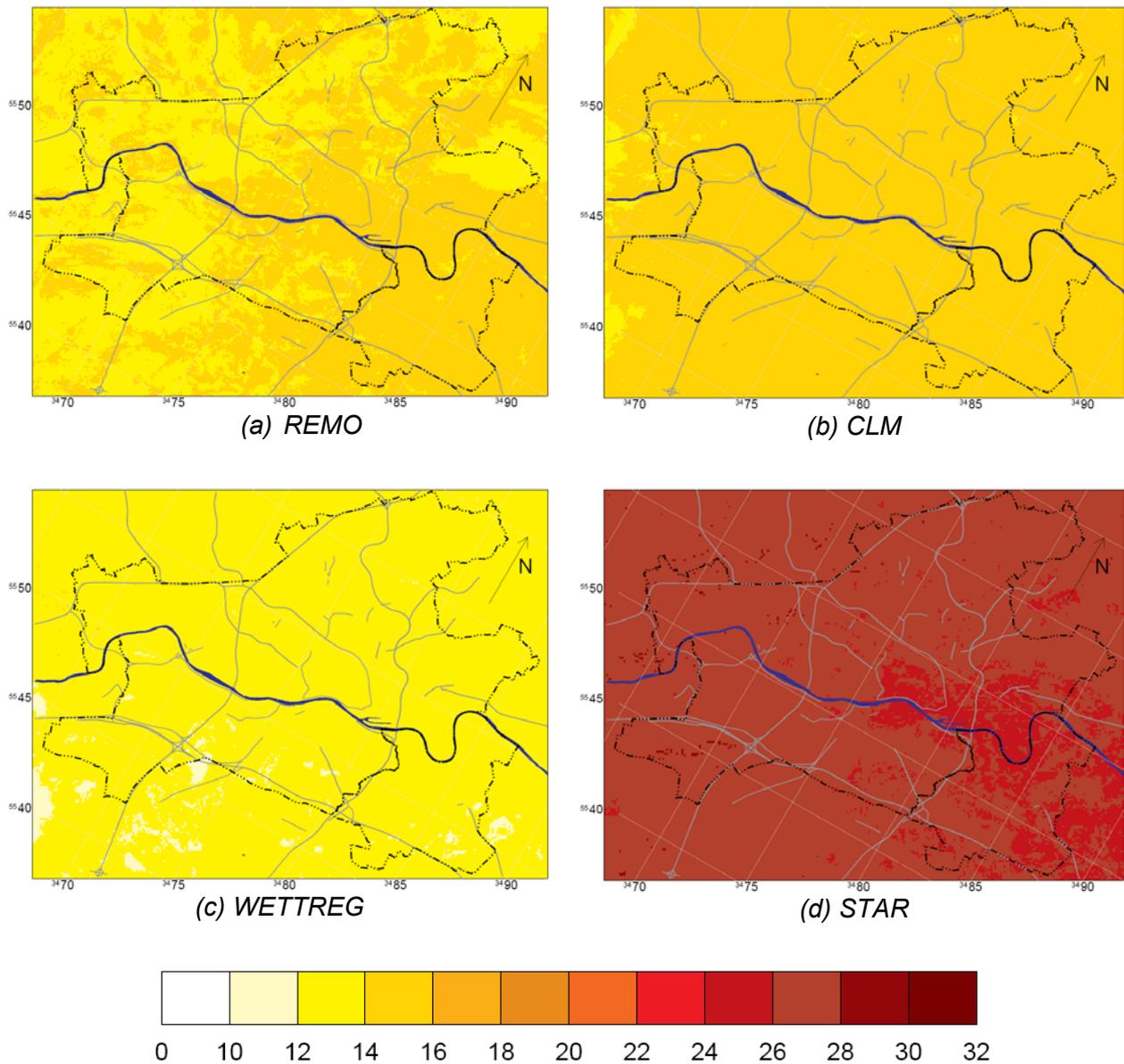


Abbildung 6-2: Karten der Änderungen der mittleren jährlichen Anzahl Sommerabende $\Delta N_{T22 \geq 20}$ als Differenz zwischen den Zeiträumen 2021 - 2050 (A1B) und 1971 - 2000 (C20) für REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d).

Die Änderung der Anzahl Sommerabende ($\Delta N_{T22 \geq 20}$) für die vier Klimaprojektionen REMO, CLM, WETTREG und STAR zeigt ebenfalls nur eine geringe räumliche Variabilität (Abbildung 6-2). Auch hier ist das von STAR projizierte Änderungssignal deutlich größer, als das der anderen Klimaprojektionen.

Tabelle 6-2: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommerabende ($\Delta N_{T_{22} \geq 20}$) zusammen mit dem räumlichen Mittel des Konfidenzintervalls auf dem 90% Signifikanzniveau für REMO, CLM, WETTREG und STAR. Die Werte zeigen die Differenz zwischen den Zeiträumen 2021 - 2050 (A1B) und 1971 - 2000 (C20), gemittelt über das Stadtgebiet von Frankfurt.

Antrieb	Mittel	Minimum	Maximum	Max. - Min.	90% Konfidenzintervall
REMO	14,1	12,6	15,8	3,2	17,5
CLM	14,9	13,7	16,2	2,5	15,7
WETTREG	13,0	11,4	14,2	2,8	11,1
STAR	26,8	25,2	28,4	3,2	11,9

Wie Tabelle 6-2 zu entnehmen ist, ist der Mittelwert, das Minimum und das Maximum der Änderung der Anzahl Sommerabende im Stadtgebiet von Frankfurt etwas höher, aber die räumliche Variabilität noch etwas geringer als bei den Sommertagen. Die mit diesen Ergebnissen verknüpfte Unsicherheit ist, wie sich an der Breite des 90% Konfidenzintervalls zeigt, auch etwas größer als bei den Sommertagen. Die Unterschiede sind jedoch unerheblich.

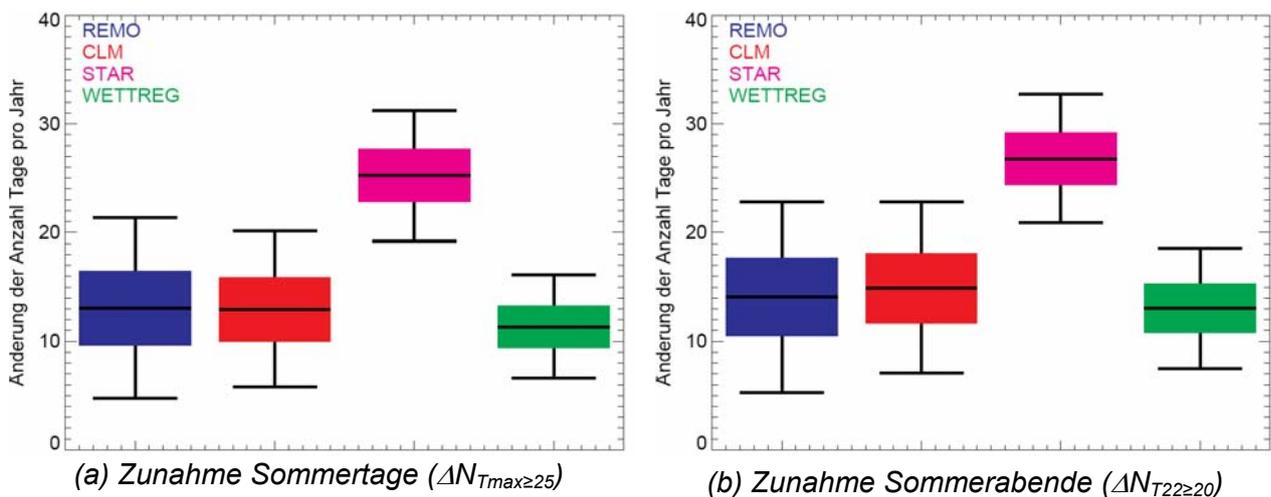


Abbildung 6-3: Box-Whisker-Plots für die Änderung der mittleren jährliche Anzahl der Sommertage und Sommerabende 2021 - 2050 (A1B) im Vergleich zu 1971 - 2000 (C20) für REMO (blau), CLM (rot), STAR (magenta) und WETTREG (grün), gemittelt über das Stadtgebiet von Frankfurt.

Sowohl für $\Delta N_{T_{max} \geq 25}$ (Abbildung 6-3a) als auch für $\Delta N_{T_{22} \geq 20}$ (Abbildung 6-3b) stimmen die Konfidenzintervalle von REMO, CLM und WETTREG gut überein. STAR jedoch simuliert eine deutlich höhere Zunahme als die anderen Klimaprojektionen.

Die Länge der Whiskers und damit die Breite des Konfidenzintervalls ist größer für die zukünftige Änderung (Abbildung 6-3, Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2) als für den Evaluierungszeitraum 1971 - 2000 (Abbildung 5-3 und Tabelle 5-3). Dies ist auf die Summe der Variabilität der Vergangenheit und Zukunft zurückzuführen, aber auch auf die höhere Variabilität der zukünftigen Temperatur selbst (Schär et al., 2004).

Der Bereich, der von den vier Box-Whiskers umschlossen wird (Abbildung 6-3), zeigt die Unsicherheit der Projektion auf Grund der Verwendung unterschiedlicher regionaler Klimamodells-

mulationen als Eingabe für die Quader-Methode. Aus den Ergebnissen für die vier verwendeten Ensemble-Mitglieder können wir schließen, dass die mittlere jährliche Anzahl Sommertage in Frankfurt bis 2021 - 2050 auf dem 90% Signifikanzniveau um 5 bis 31 Tage zunehmen wird. Die mittlere jährliche Anzahl Sommerabende wird um 5 bis 33 Tage ansteigen.

Legt man die auf Basis der Messungen im Zeitraum 1971 - 2000 simulierte Anzahl Sommertage von 39 bis 48 Tage und Sommerabende von 62 bis 70 innerhalb des Stadtgebietes zu Grunde, so ergibt sich, dass bis zur Mitte dieses Jahrhunderts etwa jeder zweite bis vierte Tag des Sommerhalbjahres (April bis September) ein Sommertag und jeder zweite bis dritte Tag ein Sommerabend sein wird. Die relativ hohe Unsicherheit dieser Aussage ist zum einen durch die jährlichen Schwankungen des Klimasystems (sog. aleatorische Unsicherheit) und zum anderen durch die Simulation der Realität durch ein Modell (sog. epistemische Unsicherheit) verursacht. Eine Vergrößerung des Ensembles von derzeit vier Mitgliedern würde zumindest die epistemische Unsicherheit verringern. Die aleatorische Unsicherheit dagegen ist systemimmanent.

Die Anzahl der „heißen Tage“ mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 °C und der Tropennächte mit Lufttemperaturen, die nicht unter 20 °C sinken, wird unserem Ensemble folgend um 2 bis 15 Tage bzw. 1 bis 11 Tage zunehmen (nicht gezeigt). Aufgrund der heute noch geringen Anzahl dieser Kenntage (11 heiße Tage bzw. 0,6 Tropennächte pro Jahr an der Station Flughafen Frankfurt/Main, siehe Tabelle 5-1) lassen sich jedoch keine verlässlichen Aussagen über deren zukünftige Entwicklung treffen.

Abbildung 6-4 zeigt die Box-Whisker-Plots für die Änderung der Sommertage ($\Delta N_{T_{\max} \geq 25}$) bis 2021 - 2050 im Vergleich zu 1971 - 2000 für alle Landnutzungsklassen im Stadtgebiet von Frankfurt. Die Ergebnisse für REMO, CLM, WETTREG und STAR sind für jede Landnutzung in dieser Reihenfolge dargestellt. Auch in dieser Abbildung wird deutlich, dass sich das Änderungssignal der einzelnen Landnutzungsklassen nicht signifikant unterscheidet. Der Unterschied zwischen Stadt und Umland wird demnach bewahrt, jedoch nicht intensiviert. Für die anderen klimatologischen Kenntage (z.B. Sommerabende) ergibt sich ein ähnliches Bild (nicht dargestellt), so dass auch dort keine Intensivierung der Unterschiede zwischen Stadt und Umland erwartet wird.

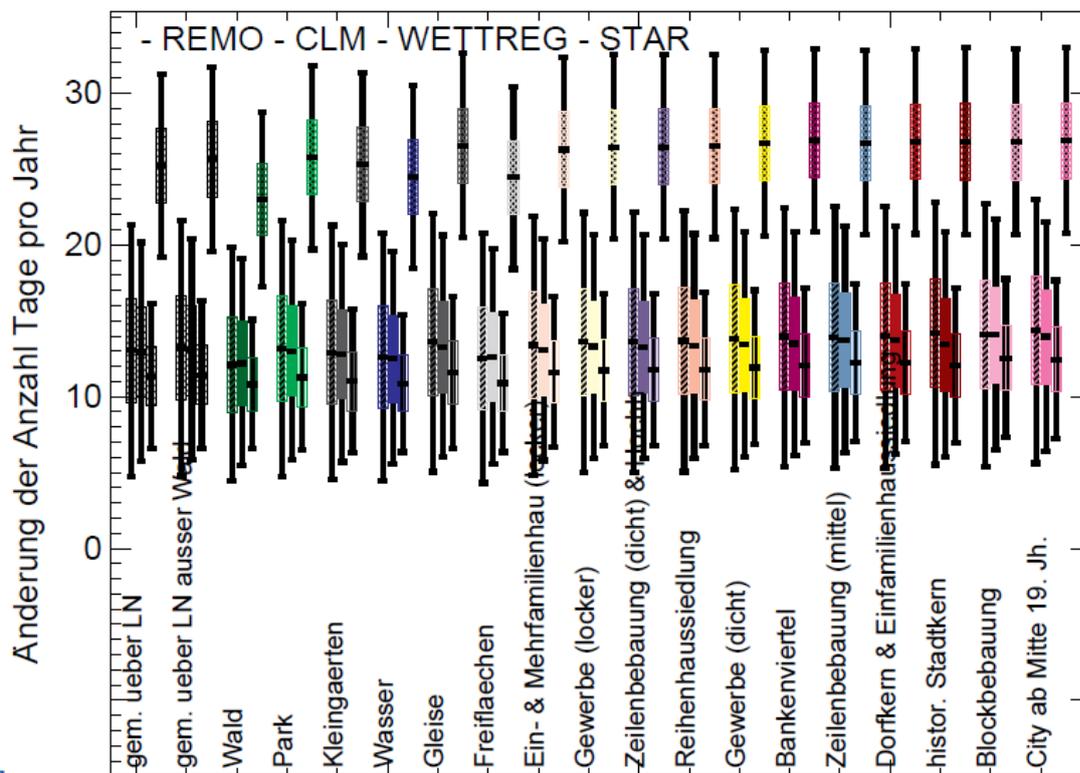


Abbildung 6-4: Box-Whisker-Plots für alle Landnutzungsklassen getrennt für die Änderung der Anzahl Sommertage 2021 - 2050 (A1B) im Vergleich zu 1971 - 2000 (C20) gemittelt über das Stadtgebiet von Frankfurt. Die Ergebnisse für REMO (schräg schraffiert), CLM (ausgefüllt), WETTREG (längs schraffiert) und STAR (kreuz schraffiert) sind für jede Landnutzung in dieser Reihenfolge dargestellt.

6.2 Auswirkung der geplanten Bebauung im Zeitraum 2021 - 2050

Abbildung 6-5 zeigt Karten der Änderung der Anzahl Sommertage ($N_{T_{max} \geq 25}$) bis 2021 - 2050 mit geplanter Landnutzungsänderung im Vergleich zu 1971 - 2000 ohne Landnutzungsänderung für REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d). Es wird deutlich, dass in den Gebieten in denen das Klimaänderungssignal durch Bebauungsverdichtung oder Versiegelung überlagert ist, die Änderung der Anzahl Sommertage am größten ist. Besonders stark wird die Anzahl Sommertage daher im Bereich des Neubaus der Landebahn Nordwest und dem Ausbau des Logistikzentrums südlich der alten Start- und Landebahnen am Flughafen Frankfurt/Main erhöht. Auch die Baumaßnahmen im Westen der Stadt und im Gebiet des ehemaligen Güterbahnhofs führen zu einer deutlich höheren Anzahl an Sommertagen im Vergleich zu den Flächen ohne bauliche Maßnahmen. Die geplanten Grünflächen dagegen führen räumlich eng begrenzt zu einer Reduktion des Klimaänderungssignals.

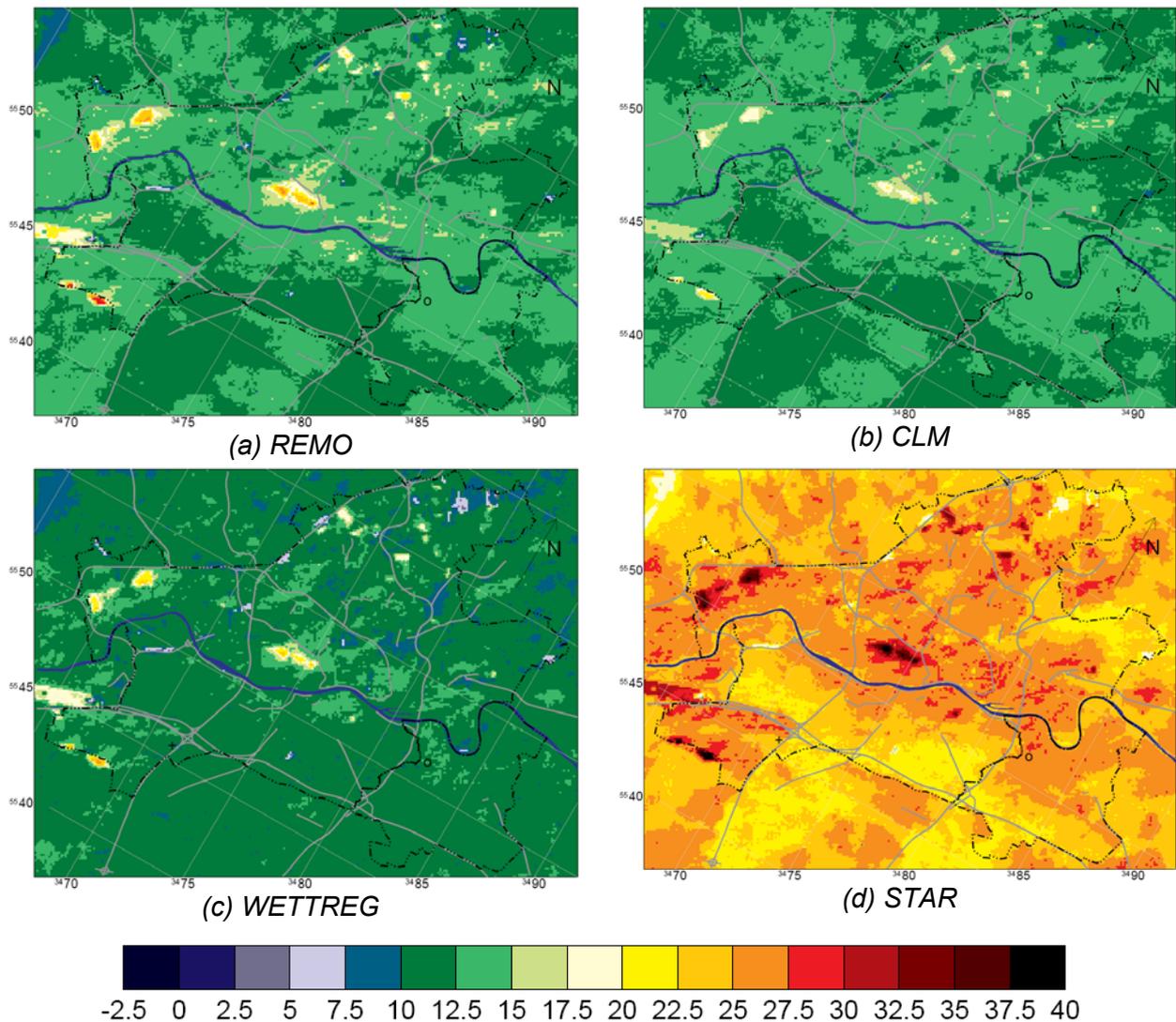


Abbildung 6-5: Karten der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage auf Grund der Landnutzungsänderung und Klimaänderung bis 2021 - 2050 (A1B) im Vergleich zu 1971 - 2000 (C20), für REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d).

Auch in Tabelle 6-3 zeigt sich, dass die mittlere Änderung der Anzahl Sommertage im Wesentlichen von der Klimaänderung beeinflusst ist, da die Unterschiede zu den Werten ohne Landnutzungsänderung (vgl. Tabelle 6-1) sehr gering sind. Die minimalen und maximalen Änderungen sind zwar beträchtlich, aber räumlich sehr stark auf das Gebiet in welchem die Landnutzungsänderung stattfand begrenzt. So wird durch das Einrichten von Parks das Minimum der Änderung der Anzahl Sommertage nahezu halbiert (vgl. Tabelle 6-3 mit Tabelle 6-1). In Gebieten in denen die Bebauung eher verdichtet wird, ist die maximale Änderung der Anzahl an Sommertagen anzutreffen. Dort wird $N_{T_{\max} \geq 25}$ nahezu verdoppelt. Etwa gleichgroße Tendenzen ergeben sich aus der entsprechenden Auswertung für die Sommerabende (Vergleich von Tabelle 6-4 mit Tabelle 6-2). Diese Zahlen machen deutlich, dass durch die Erschließung von Grünflächen die Auswirkungen des Klimawandels zumindest lokal reduziert werden können.

Tabelle 6-3: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl **Sommertage** ($\Delta N_{T_{\max} \geq 25}$) für REMO, CLM, WETTREG und STAR. Die Werte zeigen die Differenz zwischen dem Zeitraum 2021 - 2050 (A1B) mit geplanter Landnutzungsänderung und 1971 - 2000 (C20), gemittelt über das Stadtgebiet von Frankfurt.

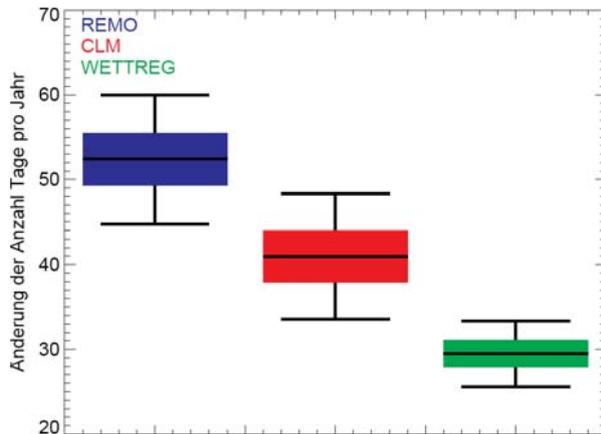
Antrieb	Mittel	Minimum	Maximum
REMO	13,1	5,5	29,0
CLM	13,0	8,6	22,1
WETTREG	11,4	3,2	24,6
STAR	25,4	16,2	39,6

Tabelle 6-4: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl **Sommerabende** ($\Delta N_{T_{22} \geq 20}$) für REMO, CLM, WETTREG und STAR. Die Werte zeigen die Differenz zwischen dem Zeitraum 2021 - 2050 (A1B) mit geplanter Landnutzungsänderung und 1971 - 2000 (C20), gemittelt über das Stadtgebiet von Frankfurt.

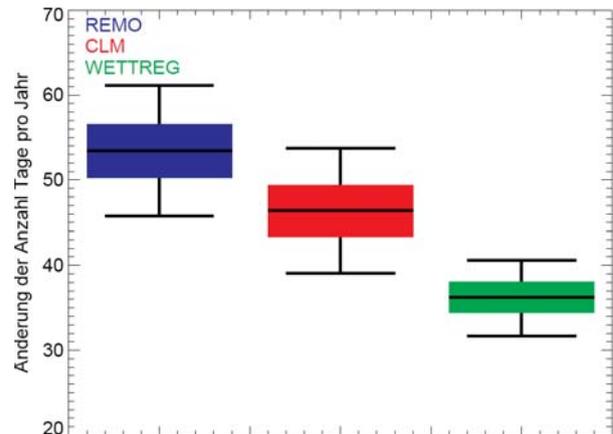
Antrieb	Mittel	Minimum	Maximum
REMO	14,6	7,6	23,9
CLM	15,3	11,1	20,4
WETTREG	13,9	2,3	30,3
STAR	27,8	15,0	45,5

6.3 Auswirkung der Klimaänderung zum Ende des Jahrhunderts

Zum Ende des Jahrhunderts (2071 - 2100) liegen nur die Klimaprojektionen von REMO, CLM und WETTREG vor. In Abbildung 6-6 sind die Box-Whisker-Plots für die über das Stadtgebiet von Frankfurt gemittelte Änderung der Anzahl Sommertage (a) und Sommerabende (b) bis 2071 - 2100 im Vergleich zu 1971 - 2000 dargestellt. Sowohl für $\Delta N_{T_{\max} \geq 25}$ als auch für $\Delta N_{T_{22} \geq 20}$ zeigen die Konfidenzintervalle von REMO, CLM und WETTREG nur eine geringe Übereinstimmung. Dies spiegelt die größere Unsicherheit des Änderungssignals zum Ende des Jahrhunderts wider. Aus den Ergebnissen für die drei verwendeten Ensemble-Mitglieder können wir schließen, dass die mittlere jährliche Anzahl Sommertage und Sommerabende in Frankfurt bis 2071 - 2100 auf dem 90% Signifikanzniveau um 25 bis 60 Tage bzw. 31 bis 61 Tage zunehmen wird. Die für diesen Zeitraum abgeleiteten Unsicherheiten sind tatsächlich jedoch noch größer, da in dem verwendeten Ensemble lediglich die Klimaprojektionen des A1B Emissionsszenarios analysiert wurden. Zum Ende des Jahrhunderts sind die Auswirkungen der unterschiedlichen Emissionsszenarien jedoch so groß, dass sie zusätzlich berücksichtigt werden müssen (siehe Abbildung 3-4).



(a) Zunahme Sommertage ($\Delta N_{T_{max} \geq 25}$)



(b) Zunahme Sommerabende ($\Delta N_{T_{22} \geq 20}$)

Abbildung 6-6 Box-Whisker-Plots für die Änderung der klimatologischen Kenntage bis 2071 - 2100 (A1B) im Vergleich zu 1971 - 2000 (C20) für REMO (blau), CLM (rot) und WETTREG (grün) im Mittel über das Stadtgebiet von Frankfurt.

Trotz der großen Unsicherheiten zeigt diese Untersuchung, dass sich die Wärmebelastung in den Städten bis zum Ende des Jahrhunderts mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit deutlich verstärken wird. Adaptationsmaßnahmen zur Minderung der Wärmebelastung des Menschen werden somit umso wichtiger.

7 Schlussbemerkungen

Mit dem vorliegenden Ergebnisbericht des Deutschen Wetterdienstes verfügt das Umweltamt der Stadt Frankfurt am Main nun erstmals über lokale Daten zum Klima im Stadtgebiet bis zum Jahr 2050. Die Daten können genutzt werden um eine dem Klimawandel gerechte Stadtplanung zu entwickeln und somit negative Folgen für die Gesundheit und einen erhöhten Energiebedarf nach Möglichkeit zu vermeiden. Mit dem vom Deutschen Wetterdienst entwickelten Verfahren lässt sich hierbei die Wirksamkeit konkreter Planungen vorab einschätzen, ohne diese umsetzen zu müssen.

Eine klimawandelgerechte Stadtplanung ist nicht nur in Frankfurt am Main erforderlich, sondern in allen deutschen Ballungsräumen. Im Rahmen von BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) geförderten Projekten und in Kooperation mit Kommunen und Behörden setzt der Deutsche Wetterdienst das Verfahren daher inzwischen auch für weitere Städte ein und unterstützt somit die notwendige Anpassung an den Klimawandel.

Für die Zukunft sind noch weitere Verbesserungen und Ergänzungen des Verfahrens wünschenswert. Die mit dem Stadtklimamodell für wärmebelastende Wetterlagen erzielten Aussagen zu den Temperaturunterschieden zwischen den verschiedenen Bebauungsstrukturen und Landnutzungen sind mit Messungen zu evaluieren. Die Klimamessstationen in der Innenstadt von Frankfurt/Main geben zwar erste Anhaltspunkte hierzu, sind aber aufgrund ihrer zeitlich verschoben Messperioden nicht für belastbare Aussagen geeignet. Da die Quadermethode, wie sie hier angewandt wurde, weniger für extreme und seltene Ereignisse in der Nacht geeignet ist, ist noch ein Weg zu finden, wie die städtische Wärmeinsel, die in den frühen Morgenstunden am stärksten ausgeprägt ist, nach Intensität und Häufigkeit ausgewertet werden kann.

An dieser Stelle sei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Umweltamts, des Stadtplanungs- und des Vermessungsamts der Stadt Frankfurt am Main sowie des Zentralen Klimabüros des Deutschen Wetterdienstes in Offenbach gedankt, die durch ihre Mitwirkung und Unterstützung die Modellrechnungen und die Erstellung des vorliegenden Berichts möglich gemacht haben.

8 Literatur

BMBau (Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau) 1980: Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen. Schriftenreihe Raumordnung 06.044, Forschungsprojekt BMBau RS II 4-70 41 02-77. 10.

Böhm, U., M. Kücken, W. Ahrens, A. Block, D. Hauffe, K. Keuler, B. Rockel, A. Will, 2006: CLM - the climate version of LM: Brief description and long-term applications. COSMO Newsletter, COSMO, Vol. 6.

Bongardt, B., 2006: Stadtklimatische Bedeutung kleiner Parkanlagen – dargestellt am Beispiel des Dortmunder Westparks - Essener Ökologische Schriften, Bd. 26, Westarp-Wissenschaften, 227 S.

DWD, 1950: Klima-Atlas von Hessen, Deutscher Wetterdienst in der US-Zone, Bad Kissingen.

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

Enke, W., T. Deutschländer, F. Schneider, W. Küchler, 2005: Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulations. Meteorol. Zeitschrift, 14, 247–257.

Früh B., P. Becker, T. Deutschländer, J.-D. Hessel, M. Koßmann, I. Mieskes, J. Namyslo, M. Roos, U. Sievers, T. Steigerwald, H. Turau, U. Wienert, 2011: Estimation of climate change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate projections. Journal Applied Meteorology and Climatology, Vol. 50, No. 1, 167-184.

Giridharan, R., S.S.Y. Lau, S. Ganesan, 2005: Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong. Energy Buildings, 37, 964–971.

Gross, G., 1989: Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographics. Beitr. Phys. Atmosph. 62, S. 57-72.

Hagemann, S., K. Arpe, and E. Roeckner, 2006: Evaluation of the hydrological cycle in the ECHAM5 model. J. Climate, 19, 3810–3827.

Hart, M. A., D. J. Sailor, 2009: Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island. Theor. Appl. Climatol., 95, 397–406, doi:10.1007/s00704-008-0017-5.

Hommel, A., 2010: Untersuchung verschiedener Bebauungsstrukturen hinsichtlich klimatologischer Kenntnisse im Raum Frankfurt am Main. Diplomarbeit an der Fachhochschule des Bundes für öffentliche Verwaltung, Fachbereich Wetterdienst.

Hollweg, H.-D., I. Fast, B. Hennemuth, K. Keuler, E. Keup-Thiel, M. Lautenschlager, S. Legutke, K. Radtke, B. Rockel, M. Schubert, A. Will, M. Woldt, C. Wunram, 2008: Ensemble simulations over Europe with the regional climate model CLM forced with IPCC AR4 global scenarios. Tech. Rep. no. 3, Model and Data group at the Max-Planck Institut for Meteorology, Hamburg. ISSN printed: 1619-2249, ISSN electronic: 1619-2257.

IPCC, 2007: Climate Change 2007 – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Hrsg.). Cambridge University Press, 996 S.

Jacob, D., 2001: A Note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the baltic sea drainage basin. Meteorol. Atmos. Phys., 77, 61–73.

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>

Jacob, D., H. Göttel, S. Kotlarski, P. Lorenz, K. Sieck, 2008: Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Tech. Rep. Abschlussbericht zum UFOPLAN Vorhaben 204 41 138, 11, 154pp, UBA-Reihe Climate Change, Dessau.

Kendon, E. J., D. P. Rowell, R. G. Jones, E. Buonomo, 2008: Robustness of future changes in local precipitation extremes. J. Clim., 21, 4280–4297, doi:10.1175/2008JCLI2082.1.

Keuler, K., M. Lautenschlager, 2006: Climate Simulations with CLM. Climate of the 20th Century run No.1, 1960-2000, Data Stream 2 und Scenario AIB run No.1, 2001-2100, Data Stream 2. European region, MPI-M/MaD. CERA-Datenbank: [http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/BrowseExperiments.jsp?proj=CLM regional climate model runs](http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/BrowseExperiments.jsp?proj=CLM_regional_climate_model_runs)

Köhler, M., 2008: Green facades – a view back and some visions. – Urban Ecosystems. doi: 10.1007/s11252-008-0063-x.

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/BrowseExperiments.jsp?proj=WETTREG-UBA>

Kuttler, W., 2009: Zum Klima im urbanen Raum. Klimastatusbericht 2008. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), Offenbach, S. 6 -12.

Möller, F., 1954: Ein Kurzverfahren zur Bestimmung der langwelligen Ausstrahlung dicker Atmosphärenschichten. Arch. Met. Geophys. Biokl. A7, S. 158-169.

Nakicenovic, N., R. Swart, (Eds.), 2000: Emissions scenarios - Summary for policymakers. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 20 pp.

Oke, T. R., 1987: Boundary Layer Climates. 2. Aufl., Routledge, London, UK.

Orlowsky, B., F.-W. Gerstengarbe, P.C. Werner, 2008: A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theor. Appl. Climatol*, 92 (3-4), 209–223, doi:10.1007/s00704-007-0352-y.

Roeckner, E., R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, L. Kornblueh, E. Manzini, U. Schlese, U. Schulzweida, 2006a: Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *J. Climate*, 19, 3771–3791.

Roeckner, E., M. Lautenschlager, and H. Schneider, 2006b: IPCC-AR4 MPIECHAM5 T63L31 MPI-OM GR1.5L40 20C3M run no.1: Atmosphere monthly mean values MPImet/MaD Germany. doi:10.1594/WDCC/EH5-T63L31 OMGR1.5L40 20C 1 MM.

Schär, C., P. L. Vidale, D. Lüthi, C. Frei, C. Häberli, M. A. Liniger, C. Appenzeller, 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427, 332–336.

Siebert, J.; Sievers, U.; Zdunkowski, W., 1992: A one-dimensional simulation of the interaction between land surface processes and the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorology* 59, S. 1-34.

Sievers, U., 1990: Dreidimensionale Simulationen in Stadtgebieten. *Umweltmeteorologie, Schriftenreihe Band 15: Sitzung des Hauptausschusses II am 7. und 8. Juni in Lahnstein. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Düsseldorf. S. 92-105.*

Sievers, U., 1995: Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen. *Meteorol. Zeitschrift, N. F. 4, S. 3-15.*

Sievers, U., R. Forkel und W. Zdunkowski, 1983: Transport equations for heat and moisture in the soil and their application to boundary layer problems. *Beitr. Phys. Atmosph.* 56, S. 58-83.

Sievers, U. und B. Früh, 2010: A practical approach to compute short-wave irradiance at the surface of sub-grid scale buildings. *Manuskript zur Einreichung bei Meteorol. Zeitschrift.*

Sievers, U. und W. Zdunkowski, 1986: A microscale urban climate model. *Beitr. Phys. Atmosph.* 59, S. 13-40.

VDI, 1994: *Umweltmeteorologie – Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberfläche – Berechnung der kurz- und langwelligen Strahlung.* Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Richtlinie 3789 Blatt 2, Beuth-Verlag, Berlin.

VDI, 2008: *Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima.* Beuth-Verlag, Berlin.

Zdunkowski, W.G., J. Paegle, und J. Reilly, 1975: The effects of soil moisture upon the atmospheric and soil temperature near the air-soil interface. *Arch. Met. Geophys. Biokl.*, A24, 245-268.

9 **Ansprechpartner**

Deutscher Wetterdienst

Anschrift: Deutscher Wetterdienst
 Klima- und Umweltberatung
 Frankfurter Str. 135
 63067 Offenbach

Projektleitung: Dipl.-Met. Marita Roos
 Tel. 069/8062-2965
 Fax: 069/8062-2993
 mailto: marita.roos@dwd.de

Bearbeitung: Dr. Barbara Früh
 Tel. 069/8062-2968
 Fax: 069/8062-2993
 mailto: barbara.frueh@dwd.de

 Dr. Meinolf Koßmann
 Tel. 069/8062-2969
 Fax: 069/8062-2993
 mailto: meinolf.kossmann@dwd.de

Stadt Frankfurt am Main

Anschrift: Stadt Frankfurt am Main
 Der Magistrat / Umweltamt
 Galvanistraße 28
 60486 Frankfurt am Main

Projektleitung: Dipl.-Geogr. Hans-Georg Dannert
 Tel. 069/212-39476
 Fax: 069/212-39106
 mailto: hans-georg.dannert@stadt-frankfurt.de

Berichte des Deutschen Wetterdienstes

- Nr. 235 U. Maier, G. Müller-Westermeier:
Verifikation klimatologischer Rasterfelder.
- Nr. 234 W. Riecke, G. Rosenhagen:
Das Klima in Hamburg : Entwicklung in Hamburg und der Metropolregion
- Nr. 233 P. Winkler:
Wissenschaftshistorische Untersuchungen zur Geschichte und insbesondere zur Datenqualität der langen meteorologischen Reihen des Observatoriums Hohenpeißenberg
- Nr. 232 H.-J. Heinemann:
Eine Winterchronik : die Kälte der Winter von 1960/61 bis 2007/08
- Nr. 231 A. Kolodziej:
Klimawandel in Sachsen-Anhalt: Auswirkungen auf die phänologischen Phasen wildwachsender Pflanzen
- Nr. 230 F. Beyrich, W. K. Adam:
Site and Data Report for the Lindenberg Reference Site in CEOP-Phase I
- Nr. 229 U. Maier u.a.:
Klimatologische Auswertungen von Zeitreihen der Monatsmittel von Temperaturminima und Temperaturmaxima im 20. Jahrhundert
- Nr. 228 B. Tinz, P. Hupfer:
Die thermischen Verhältnisse im Bereich der deutschen Ostseeküste unter besonderer Berücksichtigung des Bioklimas und der Eisverhältnisse
- Nr. 227 U. Sievers:
Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21 : theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells
- Nr. 226 C. Koppe:
Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse
- Nr. 225 S. Trepte, P. Winkler:
Rekonstruktion der UV-Strahlung am Hohen Peißenberg und in Würzburg ab 1968 unter Berücksichtigung der langfristigen Veränderungen von Gesamt ozon, Bewölkung und atmosphärischer Trübung
- Nr. 224 C. Leifeld:
Weiterentwicklung des Nowcastingsystems ADWICE zur Erkennung vereisungsgefährdeter Lufträume
- Nr. 223 U. Maier u.a.:
Klimatologische Auswertungen von Zeitreihen des Monatsmittels der Lufttemperatur und der monatlichen Niederschlagshöhe im 20. Jahrhundert
- Nr. 222 P. Lange u.a.:
KONRAD – Ein operationelles Verfahren zur Analyse von Gewitterzellen und deren Zugbahnen, basierend auf Wetterradarprodukten
- Nr. 221 Gaßmann, A.:
Numerische Verfahren in der nichthydrostatischen Modellierung und ihr Einfluß auf die Güte der Niederschlagsvorhersage
- Nr. 220 Kurz, M.:
Die Dezemberstürme 1999
- Nr. 219 K. Blümel u.a.:
Hydrometeorologische Untersuchungen zum Problem der Klimaveränderungen
- Nr. 218 A. Walter:
Zur Anwendung neuronaler Netze in der Klimatologie
- Nr. 217 J. Ballach:
Entwicklung und Absicherung leistungsfähiger Analyseverfahren zur Bestimmung von Benzol und Ruß in der Lufthygiene
- Nr. 216 W. Janssen, R. Sedlatschek:
Ablauf der Datenprüfung und –vervollständigung im Geschäftsfeld Landwirtschaft
- Nr. 215 U. Kaminski u.a.:
Qualitätssicherung von Meßreihen, Untersuchungen zu Sammelverlusten eines Berner Niederdruck-Impaktors
- Nr. 214 P. Winkler u.a.:
Beobachtungen am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg während der Sonnenfinsternis vom 11.8.1999
- Nr. 213 G. Kluge, G. Müller-Westermeier:
Das Klima ausgewählter Orte der Bundesrepublik Deutschland: Jena
- Nr. 212 J. Rapp:
Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland
- Nr. 211 F. Fricke u.a.:
Filterung luftchemischer Meßreihen im Alpenraum zur Charakterisierung ihrer Repräsentanz. GAW-DACH-Projekt
- Nr. 210 W. Steinbrecht, P. Winkler:
Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Ozon und Temperatur in der Stratosphäre
- Nr. 209 U. Görsdorf:
Genauigkeit und Verfügbarkeit von Windprofiler/RASS-Messungen
- Nr. 208 W. Höhne:
Komponenten automatischer meteorologischer Meßsysteme
- Nr. 207 S. Tilmes:
Verfahren zur Analyse von Messungen atmosphärischer Spurengase mit dem Ziel der Assimilation in Chemie-Transportmodellen
- Nr. 206 D. Spänkuch:
Climatology of Total Ozone Measurements 1964 – 1997 at Potsdam, Based on Re-evaluated Dobson Series
- Nr. 205 H. Berresheim:
Beiträge zur Rolle des natürlichen Schwefelkreislaufs in der Atmosphäre
- Nr. 204 U. Kohler u.a.:
Spectral and Integral Observations of UV-B-Radiation and Ozone Measurements
- Nr. 203 C. Köpken:
Assimilation von direkten Messungen und Satellitenretrievals in der Atmosphäre
- Nr. 202 J. Herzog, G. Müller-Westermeier:
Homogenitätsprüfung und Homogenisierung klimatologischer Meßreihen im Deutschen Wetterdienst