

Reihe KLIMOPASS-Berichte

Projektnr.: 4500280092/23

Quantitative Bestimmung des Adaptations- und Mitigationspotenzials von urbanen Grünflächen und Räumen auf das thermische Bioklima im 21. Jahrhundert

von

D. Fröhlich, A. Matzarakis,

Finanziert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Dezember 2014

KLIMOPASS

– Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
KONTAKT KLIMOPASS	Dr. Kai-Achim Höpker, Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klima- wandel; Tel.:0721/56001465, Kai.Hoepker@lubw.bwl.de
FINANZIERUNG	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - Programm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg (KLIMOPASS)
BEARBEITUNG UND VERANTWORTLICH FÜR DEN INHALT	Prof. Andreas Matzarakis, Dominik Fröhlich Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Professur für Meteorologie und Klimatologie Werthmannstraße 10 D-79085 Freiburg
BEZUG	http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/ ID Umweltbeobachtung U41-W03-N12
STAND	Dezember 2015, Internetausgabe August 2015

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autorinnen und Autoren. Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Nachdruck für kommerzielle Zwecke - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG	6
1 HUMAN-BIOMETEOROLOGISCHER HINTERGRUND DER AUSGEWÄHLTEN STÄDTE	8
1.1 Auswahl der Städte	8
1.2 Daten und Methoden	9
1.2.1 Messdaten	9
1.2.2 Indizes zur Beurteilung des thermischen Komforts von Menschen	9
1.2.3 Gefühlte Temperatur	10
1.2.4 Universal Thermal Climate Index	10
1.2.5 Physiologisch Äquivalente Temperatur	11
1.2.6 Human-Biometeorologische Bewertungsklassen	11
1.2.7 RayMan	11
1.2.8 Sensitivität der thermischen Indizes	13
1.2.8.1 Sensitivität gegenüber Änderung der Lufttemperatur	13
1.2.8.2 Sensitivität gegenüber Änderung der Windgeschwindigkeit	16
1.2.8.3 Sensitivität gegenüber der Luftfeuchtigkeit	17
1.2.8.4 Sensitivität gegenüber der Mittleren Strahlungstemperatur	17
1.3 Hintergrundsituation der Projektstädte	19
1.3.1 Karlsruhe	19
1.3.1.1 Klimatischer Hintergrund	19
1.3.1.2 Human-Bioklimatischer Hintergrund	20
1.3.2 Mannheim	22
1.3.2.1 Klimatischer Hintergrund	22
1.3.2.2 Human-Bioklimatischer Hintergrund	23
1.3.3 Freiburg	25
1.3.3.1 Klimatischer Hintergrund	25
1.3.3.2 Human-Bioklimatischer Hintergrund	26
1.3.4 Ulm	27
1.3.4.1 Klimatischer Hintergrund	27
1.3.4.2 Human-Bioklimatischer Hintergrund	28
1.3.5 Konstanz	30

1.3.5.1	Klimatischer Hintergrund	30
1.3.5.2	Human-Bioklimatischer Hintergrund	30
1.4	Zusammenfassung	32
2	ENTWICKLUNG DES THERMISCHEN BIOKLIMAS	34
2.1	Entwicklung nach Testreferenzjahren	34
2.1.1	Entwicklung des Bioklimas der einzelnen Regionen	36
2.1.1.1	Entwicklung in der Region 6	36
2.1.1.2	Entwicklung in der Region 12	40
2.1.1.3	Entwicklung in der Region 13	45
2.1.2	Entwicklung des thermischen Bioklimas in Karlsruhe	49
2.1.3	Entwicklung des thermischen Bioklimas in Mannheim	54
2.1.4	Entwicklung des thermischen Bioklimas in Freiburg	60
2.1.5	Entwicklung des thermischen Bioklimas in Ulm	70
2.1.6	Entwicklung des thermischen Bioklimas in Konstanz	74
2.1.7	Diskussion	80
2.2	Entwicklung nach REMO	80
2.2.1	Entwicklung des thermischen Bioklimas in Freiburg	81
2.3	Zusammenfassung	85
3	ADAPTATIONS- UND MITIGATIONS MÖGLICHKEITEN	86
3.1	Einfluss von städtischem Grün	86
3.1.1	ENVI-met	87
3.1.1.1	Atmosphärenmodell	87
3.1.1.2	Bodenmodell	88
3.1.1.3	Vegetationsmodell	88
3.1.2	Szenario „Straße ohne Grün“	88
3.1.3	Szenario „Fassadengrün“	89
3.1.4	Szenario „Straße mit Bäumen“	91
3.2	Fernwirkung von städtischem Grün	92
3.2.1	Szenario „Park mit Rasen“	92
3.2.2	Szenario „Park mit Bäumen“	93
3.2.3	Szenario „Park mit vielen Bäumen“	94
3.3	Zusammenfassung	95

4	VERBESSERUNG VON MODELLEN	96
4.1	SkyHelios	96
4.1.1	Sky View Factor und Sonnenscheindauer	96
4.1.2	Berechnung abgeleiteter (bio-) meteorologischer Größen	97
4.1.2.1	Thermische Indizes	97
4.1.3	Grafische dreidimensionale Darstellung des Modellgebiets	97
4.2	Erweiterung des Modells SkyHelios	98
4.2.1	Aufbau des implementierten Windmodells	100
4.2.1.1	Erstellung einer Liste der Strömungshindernisse	100
4.2.1.2	Erstellung der ungestörten Flussgitter	100
4.2.1.3	Berechnung einer luvseitigen Stagnation	101
4.2.1.4	Berechnung eines leeseitigen Rücklaufs	102
4.2.1.5	Berechnung des fernen Nachlaufs	103
4.2.1.6	Straßenschluchten	103
4.2.1.7	Zusammenfügen der Modifikationen	104
4.2.2	Minimierung der Divergenz	104
4.2.3	Ausblick	104
4.3	Zusammenfassung	106
5	LITERATURVERZEICHNIS	107
6	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	112
7	TABELLENVERZEICHNIS	117

Zusammenfassung

Das zukünftige Klima unserer Städte setzt sich aus zwei wichtigen modifizierenden Komponenten zusammen. Eine dieser Komponenten stellt die klimatische Hintergrundsituation dar. Die zweite Komponente bildet der Einfluss der Stadt selbst, die sich auf ihr Klima auswirkt.

Der klimatische Hintergrund einer Stadt wird durch das regionale Klima bestimmt. Dieses kann durch den Einsatz regionaler Klimamodelle in Verbindung mit Emissionsszenarien für zukünftige Zeiträume abgeschätzt werden. Dass sich der städtische Einfluss auf ihr Klima nur langsam ändert, kann dieser für den Projektzeitraum annähernd als konstant angenommen werden. Das zukünftige Klima der Projektstädte Karlsruhe, Mannheim, Freiburg, Ulm und Konstanz kann somit aus lokalen Messdaten (die den städtischen Hintergrund enthalten) und der durch Regionalmodelle errechneten Änderungen annähernd bestimmt werden.

Die Bewertung zukünftiger klimatischer Verhältnisse sollte anhand ihrer Auswirkung auf Menschen durchgeführt werden. Diese nehmen keine einzelnen meteorologischen Parameter, sondern immer die Summe mehrerer war. So setzt sich das thermische Empfinden von Menschen aus allen Parametern zusammen, die deren Energiebilanz beeinflussen. Neben nicht-meteorologischen Parametern wie dem Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung gehen in diese die meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit und die mittlere Strahlungstemperatur die Summe aller Strahlungsflüsse, ein. Hieraus lassen sich thermische Indizes wie die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) berechnen, die das thermische Empfinden, sowie thermischen Stress wiedergeben. Zur Vereinfachung der Bewertung der thermischen Bedingungen ist es hilfreich, die Ergebnisse in thermische Belastungsklassen einzuteilen und deren Häufigkeit zu untersuchen.

Betrachtet man PET für die fünf Projektstädte vergleichend für die Perioden 1970 – 2000, 2020 – 2050 und 2070 – 2100 zeigt sich eine deutliche Zunahme des Auftretens von Klassen mit großer Wärmebelastung. Dies kann bei allen untersuchten Städten beobachtet werden. Unterschiede zeigen sich jedoch im Umfang der Zunahme. Eine deutliche Variation zeigt sich dabei nicht nur zwischen den Städten, sondern auch durch die zugrunde liegenden regionalen Modelle. Diese errechnen zwar denselben Trend, divergieren jedoch im Umfang der zu erwartenden Änderungen. Selbst die günstigsten Ergebnisse zeigen eine deutliche Zunahme an Stunden mit thermischem Hitzestress vor allem für die Tagstunden der Sommermonate. Es ist jedoch auch ein Trend hin zu Klassen mit erhöhter Wärmebelastung während der Nachtstunden zu beobachten.

Zur Erfassung und Ergreifung geeigneter Adaptations- und Mitigationsmaßnahmen ist es zunächst erforderlich, den Einfluss der einzelnen meteorologischen Parameter auf das thermische Empfinden von Menschen zu kennen. Dabei zeigt sich, dass der Einfluss des häufig damit assoziierten Parameters Lufttemperatur von dem der mittleren Strahlungstemperatur (T_{mrt}) und der Windgeschwindigkeit bei weitem übertroffen werden kann. Eine gemäßigte T_{mrt} wirkt sich dabei fast immer positiv auf die thermische Empfindung aus. Da dies, durch Verschattung, mit einfachen Mitteln erreicht werden kann, stellt T_{mrt} eine vielversprechende Stellenschraube für Mitigationsmaßnahmen dar.

Neben der Bebauungsstruktur selbst stellt städtisches Grün die häufigste Art der Schattenspende in Städten dar. Seine Effektivität hängt jedoch nicht allein von der Art der Begrünung ab, sondern auch von deren Verteilung. So kann ein lokaler Park mit einer Rasenfläche auf dieser selbst für komfortablere Bedingungen

sorgen als eine Straße. Deutlich verbessert sich die Situation innerhalb des Parks durch das Hinzufügen von Bäumen. Die Wirkung bleibt jedoch auf den Park selbst beschränkt. Eine weitreichende Verbesserung für größere Bereiche kann somit nur durch den flächendeckenden Einsatz von städtischem Grün erreicht werden.

Um den Einfluss verschiedener Planungsszenarien auf das thermische Empfinden einfach und schnell untersuchen zu können wurde das Modell SkyHelios um ein Windmodell erweitert. Das Modell ermöglicht nun schnell und mit geringem Aufwand das Errechnen thermischer Indizes (z.B. PET). Dabei können übliche Datenformate (z.B. shp) als räumliche Eingangsdaten eingesetzt werden.

1 Human-biometeorologischer Hintergrund der ausgewählten Städte

1.1 AUSWAHL DER STÄDTE

Im Zuge des Klimawandels wird erwartet, dass die Lufttemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um 3°C ansteigt (z. B. Matzarakis und Endler 2010). Der Anstieg der Lufttemperatur entspricht in etwa dem heutigen städtischen Einfluss auf das lokale Klima (Matzarakis 2013), welches aufgrund der künstlichen Oberflächenstrukturen modifiziert ist. Diese Modifikation geht vornehmlich auf eine veränderte Strahlungsbilanz, sowie eine Modifikation des Windfeldes durch vertikale Strukturen zurück (Runnalls und Oke 2000). Dadurch wird ein weiterer Anstieg der Hitze- und Wärmebelastung in urbanen Räumen erwartet, zumal auch die Intensität, Dauer und Häufigkeit von großräumigen Hitzewellen im mitteleuropäischen Raum bis Ende des 21. Jahrhunderts zunehmen soll (Schär et al. 2004). Das Land Baden-Württemberg weist mit 302 EW/km² eine sehr hohe Bevölkerungsdichte auf (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2013). Etwa 20 % (etwa 2 Mio. EW) der Bevölkerung konzentrieren sich dabei wiederum auf folgende neun Stadtkreise Baden-Baden, Freiburg im Breisgau, Heidelberg, Heilbronn, Karlsruhe, Mannheim, Pforzheim, Stuttgart und Ulm (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2013). Gegenüber der Landbevölkerung ist die Stadtbevölkerung in größerem Ausmaß von den lokalen Auswirkungen des globalen Klimawandels betroffen. Dies ist darin begründet, dass sich in urbanen Räumen die Klimaänderungen mit dem Stadtklima überlagern (z.B. Matzarakis 2013). Der Stadtbevölkerung Baden-Württembergs müssen jedoch auch Einwohner kleinerer Städte zugerechnet werden, die nicht über eigene Stadtkreise verfügen (z.B. Offenburg oder Konstanz). Sie sind ebenfalls stärker von den lokalen Auswirkungen des globalen Klimawandels betroffen, da auch diese Städte bereits ein eigenes Stadtklima erzeugen (Matzarakis und Endler, 2010, Matzarakis, 2013). Die Anzahl der Menschen, welche von lokalen Auswirkungen globaler Klimaveränderungen und städtischer Modifikationen betroffen sind, wird in Zukunft voraussichtlich weiter steigen. Dies begründet sich nicht allein mit der erwarteten Zunahme thermisch belastender Bedingungen für Menschen in mitteleuropäischen Städten (z.B. Matzarakis 2013), sondern auch in den anhaltenden (Re-) Urbanisierungsprozessen (Schmidt 2012).

Die weitere Untersuchung konzentriert sich auf folgende fünf exemplarisch ausgewählte Städte (Abb. 1.1):

- Freiburg im Breisgau: südwestliche Standort im Übergang von der Oberrheinischen Tiefebene in den Schwarzwald mit besondere Exposition gegenüber thermischer Belastung,
- Karlsruhe: die zweitgrößte Stadt Baden-Württembergs erfährt eine hohe thermischer Belastung,
- Mannheim: repräsentativ für mehrere Städte im nordwestlichen Teil Baden-Württembergs, teilt sich mit Karlsruhe und Freiburg den Rekord der höchsten jemals gemessenen Lufttemperatur (40.2 °C) in Deutschland am 13. August 2003,
- Konstanz: in komplexer Topographie am Bodensee an der südlichen Grenze zur Schweiz gelegen,
- Ulm: östlichste Stadt im Übergang zwischen der Schwäbischen Alb und des Alpenvorland.

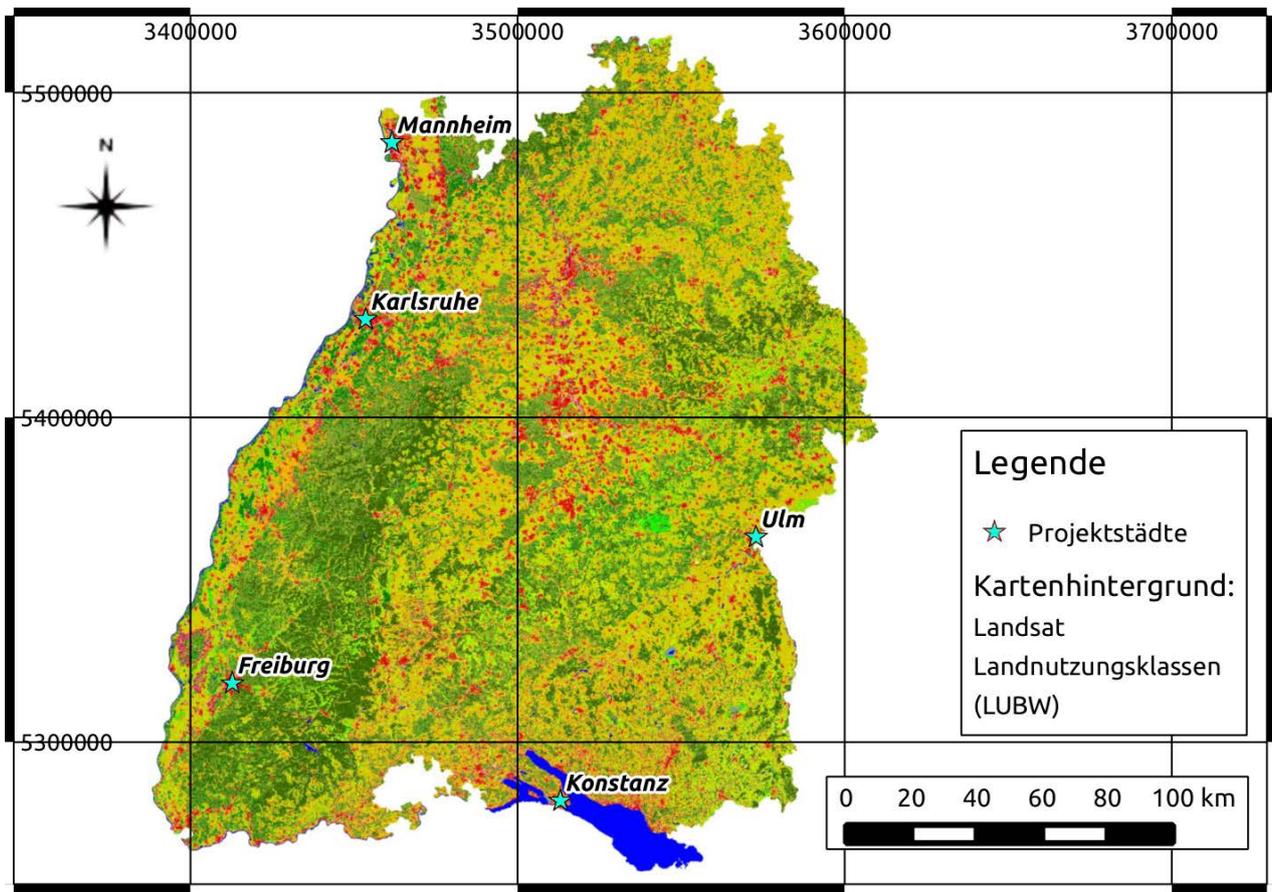


Abb. 1.1: Übersicht über die Städte, die zur Untersuchung im Rahmen des vorliegenden Projektes ausgewählt wurden (Eigener Entwurf, Datengrundlage: LUBW).

1.2 DATEN UND METHODEN

1.2.1 MESSDATEN

Grundlage der Berechnungen für alle Modellstädte sind Messdaten der lokalen Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Aufgezeichnet werden die Parameter Lufttemperatur (T_a), Luftdruck (P), Bedeckungsgrad (cc), relative Luftfeuchte (RH), Windrichtung (WD) und Windgeschwindigkeit (v). Diese liegen für alle fünf Projektstädte in stündlicher Auflösung vor. Der Datensatz für Karlsruhe deckt den Zeitraum 01.01.1981 bis 02.11.2008 ab (ca. 27 Jahre). Für Mannheim, Freiburg, Ulm und Konstanz liegen Daten für den Zeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 vor (ca. 32 Jahre). Die Daten wurden hinsichtlich ihrer Qualität und des Anteils an Fehlwerten überprüft. Hieraus ergab sich für alle Städte ein hoher Anteil von Fehlwerten für den Bedeckungsgrad (vgl. Tab. 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 und 1.10).

1.2.2 INDIZES ZUR BEURTEILUNG DES THERMISCHEN KOMFORTS VON MENSCHEN

Das Wärmeempfinden verschiedener Menschen kann bei gleicher Lufttemperatur höchst unterschiedlich ausfallen (Höppe 1993). Denn dieses Wärmeempfinden wird nicht alleine von der Lufttemperatur verursacht, für welche der Mensch auch gar keine Sensoren hat und somit nicht wahrnehmen kann (Höppe 1993, Jendritzky et al. 2012, Blazejczyk et al. 2012). Vielmehr setzt es sich das thermische Wohlbefinden aus einer Reihe von meteorologischen und nicht-meteorologischen Faktoren zusammen. Als meteorologische Faktoren wären hierbei beispielsweise Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und vor allem die verschiedenen Strahlungsflüsse, welche durch die mittlere Strahlungstemperatur (T_{mrt}) parametrisiert werden, zu

nennen. Zu den nicht-meteorologischen Faktoren zählen unter anderem die metabolische Rate, der Arbeitsenergieumsatz, die Schweißrate und der Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung. Zur Annäherung des thermischen Empfindens von Menschen wurden verschiedene thermische Indizes entwickelt. Laut Büttner (1938) sind dabei Indizes, die nur einzelne thermische Größen betrachteten, nicht generell anwendbar. Stattdessen sollte die ganze thermische Energiebilanz des Menschen (Höppe 1999) Berücksichtigung finden.

$$M + W + R + C + E_D + E + E + S = 0 \quad \text{Gl. 1.1}$$

wobei:

M	Metabolische Rate
W	Physikalische Arbeit
R	Nettostrahlung des Körpers
C	Konvektiver Wärmefluss
E_D	Energieumsatz aufgrund von Wasserdampfdiffusion durch die Haut
E_{Re}	Energieumsatz durch die Atmung (fühlbar und latent)
E_{Sw}	Energieumsatz Aufgrund von Schweißverdunstung
S	Speicheränderung (Erwärmung, oder Abkühlung des Körpers)

Die Einheit dieser Parameter ist Watt (W).

Die weltweit am häufigsten verwendeten thermischen Indizes, welche auf der Energiebilanz des Menschen basieren sind:

- Predicted Mean Vote (PMV) (Fanger 1972)
- Gefühlte Temperatur (PT) (Staiger et al. 1997, 2012)
- Universal Thermal Climate Index (UTCI) (Jendritzky et al. 2012)
- Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) (Mayer und Höppe 1987, Höppe 1999, Matzarakis et al. 1999).

Die thermischen Indizes weisen tagsüber, besonders bei Strahlungswetterlagen eine hohe Korrelation mit der mittleren Strahlungstemperatur. Die mittlere Strahlungstemperatur ist als einheitliche Temperatur einer schwarz strahlenden Umschließungsfläche definiert, die zum gleichen Strahlungsenergiegewinn eines Menschen führt wie die aktuellen, unter Freilandbedingungen meist sehr uneinheitlichen kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse (VDI 1988, Fanger 1972).

1.2.3 GEFÜHLTE TEMPERATUR

Die Gefühlte Temperatur ist eine Äquivalenttemperatur, die auf dem Klima-Michel Modell, einem Energiebilanzmodell für Menschen, beruht (Jendritzky et al. 1990). Sie ist für den Aufenthalt im Freien ausgelegt und definiert als die Oberflächentemperatur einer Referenzumgebung, die zum gleichen Temperaturempfinden führen würde, wie die aktuelle Umgebung (Staiger et al. 2012). Die Bewertung des thermischen Empfindens erfolgt dabei auf Grundlage des PMV Index (Fanger 1972). Die Gefühlte Temperatur enthält ein Kleidungsmodell, das sich automatisch an die jeweiligen meteorologischen Bedingungen anpasst (Staiger et al. 2012).

1.2.4 UNIVERSAL THERMAL CLIMATE INDEX

Der Universal Thermal Climate Index (UTCI) folgt ebenfalls dem Konzept einer Äquivalenttemperatur. Die Referenzumgebung wird definiert als 50 % relativer Luftfeuchte (wobei der Dampfdruck (VP) 22 hPa nicht überschreiten darf), Windstille und mittlere Strahlungstemperatur gleich Lufttemperatur (Jendritzky et al.

2012). UTCI ist definiert als „die isotherme Lufttemperatur einer Referenzumgebung, die dieselbe dynamische physiologische Reaktion des menschlichen Körpers auslösen würde, wie die aktuelle Umgebung“ (Jendritzky et al. 2012). UTCI beinhaltet ein Kleidungsmodell, das sich automatisch den aktuellen Umgebungsbedingungen anpasst (Havenith et al. 2012). UTCI basiert auf einem sehr komplexen Energietransportmodell (Fiala et al. 2012). Da UTCI operationell, d.h. für Wettervorhersagen berechnet werden soll, wird der Index zur schnelleren Berechnung mit Hilfe einer Regressionsformel angenähert. Dabei wird der Bereich der meteorologischen Eingangsbedingungen wie folgt eingeschränkt:

- $-50^{\circ}\text{C} < T_a < 50^{\circ}\text{C}$,
- $0.5 \text{ m/s} < v < 17 \text{ m/s}$
- $\text{VP} < 20 \text{ hPa}$.

1.2.5 PHYSIOLOGISCH ÄQUIVALENTE TEMPERATUR

Die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) ist definiert als diejenige Lufttemperatur in einer Referenzumgebung, bei der Hautoberflächen- und Kerntemperatur sowie Schweißverdunstung dieselben sind wie durch die gegebenen Bedingungen verursacht, wobei die Energiebilanz ausgeglichen ist (Höppe 1999, Mayer und Höppe 1987, Matzarakis et al. 1999). Die Referenzumgebung wird definiert mit einem Wasserdampfdruck von 12 hPa, bei einer Windgeschwindigkeit von 0.1 m/s, einer relativen Luftfeuchte von 50 %, einer Lufttemperatur von 20 °C, wobei diese mit der mittleren Strahlungstemperatur gleichzusetzen ist. PET basiert auf dem Münchner Energiebilanzmodells für Individuen (MEMI) (Höppe 1984). Die Aktivität des 1.75 m großen und 75 kg schweren Mannes beträgt 80 W und der Wärmedurchgangswiderstand 0.9 clo, was einem leichten Anzug mit kurzärmeligem Hemd entspricht. PET ist als Äquivalenttemperatur mit der Einheit °C leicht interpretierbar.

1.2.6 HUMAN-BIOMETEOROLOGISCHE BEWERTUNGSKLASSEN

Zur Interpretation der PET-Werte wurden diese in neun thermische Belastungsklassen eingeteilt (Tab. 1.1). Die verwendete Klassifikation wurde von Matzarakis und Mayer (1996) für PET in Mitteleuropa entwickelt und ist daher für das Projektgebiet am besten geeignet.

Tab. 1.1: Thermische Empfindungsklassen für Menschen in Mitteleuropa mit einer Aktivität von 80 W und einem Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung von 0.9 clo (verändert nach Matzarakis und Mayer 1996).

PET (°C)	Thermisches Empfindung	Thermophysiologische Belastungsstufen
< 4	sehr kalt	extremer Kältestress
4 – 8	kalt	starker Kältestress
8 – 13	kühl	moderater Kältestress
13 – 18	etwas kühl	leichter Kältestress
18 – 23	komfortabel	kein thermischer Stress
23 – 29	etwas warm	leichter Hitzestress
29 – 35	warm	moderater Hitzestress
35 – 41	heiß	starker Hitzestress
> 41	sehr heiß	extremer Hitzestress

1.2.7 RayMan

Die bioklimatischen Berechnungen bezüglich der Hintergrundsituation sowie der zu erwartenden Entwicklung wurden mit Hilfe des Modells RayMan (Matzarakis et al. 2007; 2010) durchgeführt. RayMan ist ein

Modell zur Berechnung von Strahlungsflüssen in einfachen und komplexen Umgebungen. Als zentraler Bestandteil ist hierbei die Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur (T_{mrt}) zu nennen. Hierfür werden folgende Eingangsgrößen benötigt:

- direkte Sonnenstrahlung
- diffuse Sonnenstrahlung
- reflektierte kurzwellige Strahlung
- atmosphärische Gegenstrahlung
- langwellige Ausstrahlung der Umgebung

(Die Einheit aller oben genannten Strahlungsflussdichten ist W/m^2)

Sind die Strahlungsflussdichten nicht einzeln bekannt, können diese in RayMan entweder mit Hilfe von Angaben der Globalstrahlung, dem Bedeckungsgrad oder der Sonnenscheindauer in Verbindung mit dem genauen Zeitpunkt berechnet werden. Zudem werden Informationen über den Standpunkt benötigt, für welchen T_{mrt} berechnet werden soll:

- Fish-Eye-Foto (Sky View Faktor; siehe Abb. 4.1)
- der sichtbare Anteil verschiedener fester Oberflächen,
- die Albedo dieser Oberflächen und
- das Emissionsvermögen der Oberflächen.

Wichtig ist zudem die Haltung der Person, für die T_{mrt} berechnet werden soll (sitzend oder stehend). Die Umgebung der Person wird für die Berechnung in eine beliebige Anzahl isothermer Oberflächen eingeteilt, denen jeweils eine eigene Oberflächentemperatur und ein Emissionsvermögen zugewiesen wird. Die entsprechend ihrer Anteile gewichteten Oberflächen können anschließend in einer Gleichung aus Fanger (1972), Jendritzky und Nübler (1981) verrechnet werden. Diese hat folgende Form:

$$T_{mrt} = \left[\frac{1}{\sigma} + \sum_{i=1}^n \left(E_i + a_k \frac{D_i}{\varepsilon_p} \right) F_i \right]^{0,25} \quad \text{Gl. 1.2}$$

dabei ist σ die Stefan-Boltzmann Konstante [$5,67 \times 10^{-8} W/(m^2K^4)$], n die Anzahl der isothermen Oberflächen, E_i die langwellige Ausstrahlung einer solchen, a_k der Absorptionskoeffizient eines Menschen, D_i die diffuse Strahlung, ε_p der Emissionskoeffizient eines menschlichen Körpers und F_i der jeweilige Gewichtungsfaktor. Bei Vorhandensein direkter solarer Einstrahlung muss diese gesondert berücksichtigt werden. Die hierfür benötigte Formel lautet nach Jendritzky et al. (1990):

$$T_{mrt}^* = \left[T_{mrt}^4 + \frac{f_p a_k \gamma I^*}{\varepsilon_p \sigma} \right]^{0,25} \quad \text{Gl. 1.3}$$

dabei steht T_{mrt}^* für die mittlere Strahlungstemperatur bei Vorhandensein direkter Sonneneinstrahlung, f_p für den Projektionsfaktor der Oberflächen, γ der Höhenwinkel der Sonne in Grad, σ für die Stefan-Boltzmann-Konstante ($5,67 \cdot 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$) und I^* die solare Einstrahlung auf eine lotrecht zur Einstrahlungsrichtung liegende Fläche. Zur Verbesserung der Genauigkeit wird die mittlere Strahlungstemperatur in RayMan für den oberen und den unteren Halbraum, die sich der Höhe des Körperschwerpunktes in 1.1 m über Grund treffen, berechnet (Fanger 1972, Jendritzky und Nübler 1981). Vergleiche mit Messdaten (Matzarakis et al.

2007; 2010) bescheinigen RayMan bei der Berechnung von T_{mrt} eine gute Genauigkeit. In Verbindung mit einigen weiteren Eingangsgrößen ist RayMan in der Lage die oben genannten thermischen Indizes zu berechnen. Benötigt werden hierfür die meteorologischen Parameter

- Lufttemperatur,
- Dampfdruck,
- Windgeschwindigkeit,
- Kurz- und langwellige Strahlungsflüsse/Globalstrahlung/Bewölkungsgrad/Sonnenscheindauer

sowie thermophysiologische Größen und Informationen über den Untersuchungsort.

1.2.8 SENSITIVITÄT DER THERMISCHEN INDIZES

Für die drei oben vorgestellten human-biometeorologischen Indizes wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um Schwächen und Unsicherheiten aufzudecken und diese zu vermeiden. Hierzu wurden für alle Stationen Testdatensätze hergestellt. Der erste dieser Testdatensätze entsprach dabei exakt den Messdaten und dient als Referenz. Für alle anderen Datensätze wurde jeweils einer der wichtigsten Eingangsparameter in vier Stufen variiert. Geprüft wurde dabei die Sensitivität der Indizes PT, UTCI und PET gegen die Lufttemperatur, die Windgeschwindigkeit, die relative Luftfeuchte und die mittlere Strahlungstemperatur. Diesen wurden jeweils in einem eigenen Datensatz um einen bestimmten Betrag verändert:

- Lufttemperatur: $\pm 1^\circ\text{C}$, $\pm 2^\circ\text{C}$
- Windgeschwindigkeit: ± 1 m/s, ± 2 m/s
- Relative Luftfeuchte: ± 5 %, ± 10 %.
- Mittlere Strahlungstemperatur wurde berechnet für Globalstrahlung bei wolkenfreiem Himmel, wobei die Bewölkung in drei Schritten erhöht wurde bis zur völligen Abschattung ($T_a = T_{mrt}$).

Die für Freiburg erstellten Testdatensätze werden exemplarisch analysiert, wobei die Häufigkeitsverteilung der absoluten Zahlen und der thermischen Belastungsklassen mittels Beanplots (Kampstra 2008) verglichen wird. Jede Verteilung ist dabei als „Bean“ dargestellt, deren Dicke in einer bestimmten Höhe die Häufigkeit von Ergebnissen in diesem Bereich anzeigt. Der Mittelwert der Verteilung ist mit einer horizontalen Linie markiert. Die Länge der „Bohne“ zeigt die Bandbreite der Ergebnisse an. Die thermischen Belastungsklassen sind zwar nur für PET anwendbar, sie wurden jedoch für alle Indizes verwendet um den Vergleich zu vereinfachen. Rückschlüsse auf den thermischen Komfort können für die Indizes PT und UTCI aber nicht gezogen werden.

1.2.8.1 SENSITIVITÄT GEGENÜBER ÄNDERUNG DER LUFTTEMPERATUR

Als erstes wurde die Sensitivität der drei Indizes gegenüber der Lufttemperatur untersucht (Abb. 1.2). Während die Verteilungen für UTCI (Mitte) und PET (rechts) relativ homogen sind, weist die für PT (links) deutliche Unregelmäßigkeiten auf, welche auf die Methode zurückzuführen sind. So ist eine Zunahme der Häufigkeit bei 5 und 11 °C zu sehen. UTCI und PET zeigen dagegen eine gleichmäßigere Verteilung, wobei die für UTCI etwas gestreckter ist. Die Mittelwerte der Verteilungen der drei Indizes für den Referenzdatensatz (horizontaler, schwarzer, durchgezogener Strich an den einzelnen „Beans“) stimmen mit 8.5 °C für PT, 8.0 °C für UTCI und 8.5 °C für PET gut überein. Dies zeigt auch der Mittelwert aller Verteilungen, der in Abb. 1.2 als gepunktete Linie dargestellt ist.

Sensitivität Lufttemperatur Freiburg

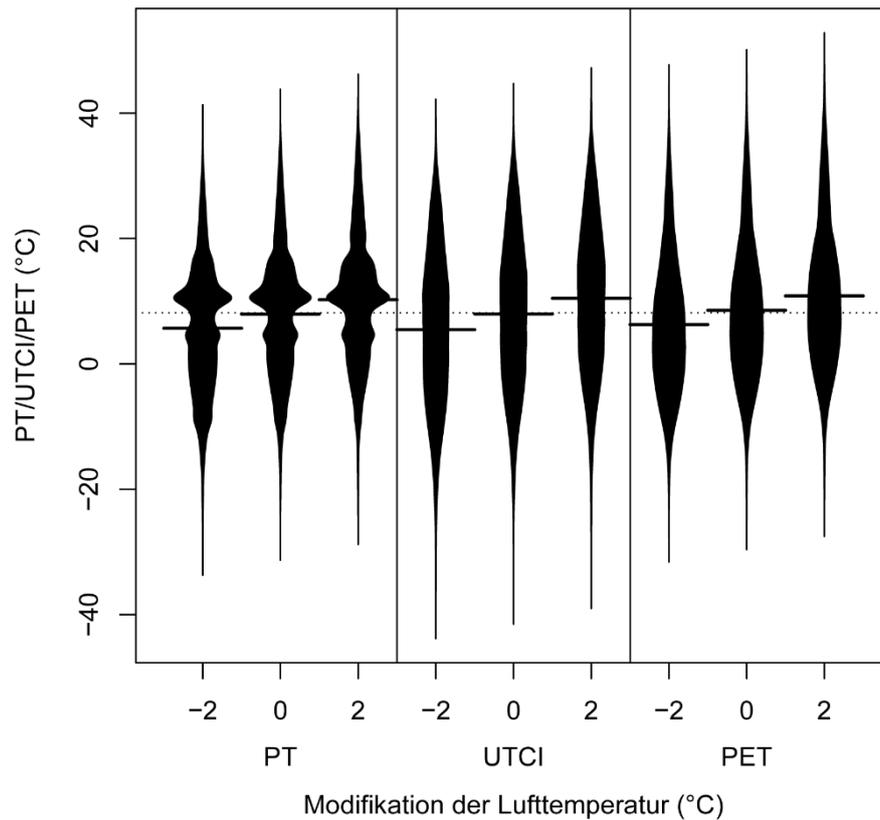


Abb. 1.2: Verteilung der Ergebnisse von PT (links), UTCI (Mitte) und PET (rechts) für die Datensätze mit modifizierter Lufttemperatur T_a . Für jeden Index ist je eine Verteilung für $T_a - 2^\circ\text{C}$, den Referenzdatensatz und eine für $T_a + 2^\circ\text{C}$ dargestellt. Eine dickere Verteilung zeigt dabei ein häufigeres Ergebnis in diesem Bereich an. Die hier dargestellten Verteilungen gelten für Freiburg.

Die Mediane der Verteilungen weichen jedoch schon deutlich voneinander ab. Während der Median für UTCI und PET mit 8.0°C und 7.6°C relativ nah beieinander liegen, weicht der von PT mit 9.2°C durch die ungleiche Verteilung ab. Vor allem das Minimum der Ergebnisse für UTCI liegt mit -38.6°C deutlich niedriger als die Minima für PT und PET von -28.4°C und -26.7°C . Bei den Maxima liegt hingegen das von PET mit 47.2°C deutlich höher als die von PT (40.9°C) und UTCI (41.8°C). Die Differenz der Maxima ist mit 6.3°C jedoch deutlich geringer als die der Minima mit 11.9°C . Dabei ist zu beachten, dass die Bewertungsskalen der drei vorgestellten Indizes besonders im Bereich des Kältestresses stark variieren. Für den Datensatz mit einer Reduktion oder Erhöhung der Lufttemperatur um 2°C , verändert sich der Mittelwert und der Median mit demselben Vorzeichen um zwischen 2.2°C (PT) und 2.5°C (UTCI). Die Differenz des Medianes von PT ist bei $T_a - 2^\circ\text{C}$ mit 3.1°C höher und bei $T_a + 2^\circ\text{C}$ mit 1.3°C geringer. Grund dafür ist die Häufigkeitsverteilung von PT. Die Extremwerte verändern sich dagegen in ähnlichem Umfang wie die Mittelwerte. Beide Extrema bewegen sich für die beiden Indizes um ca. 2.5°C . Bei PET steigt das Minimum mit 2.1°C dagegen deutlich schwächer als das Maximum, das um 2.7°C zunimmt.

Abb. 1.3 zeigt die Häufigkeit der thermischen Belastungsklassen (Tab. 1.1) für alle drei Indizes. Vergleicht man die Veränderung der Häufigkeit der einzelnen Klassen entlang des Gradienten der ΔT_a von -2°C zu $+2^\circ\text{C}$ sieht man zunächst wieder für alle drei Indizes dieselbe Tendenz: eine Abnahme des Kältestresses und eine Zunahme des Hitzestresses. Dieser nimmt jedoch für PT mit steigender Lufttemperatur stärker zu als die für UTCI und PET, die für alle Klassen eher einen linearen Anstieg zeigen (Abb. 1.3).

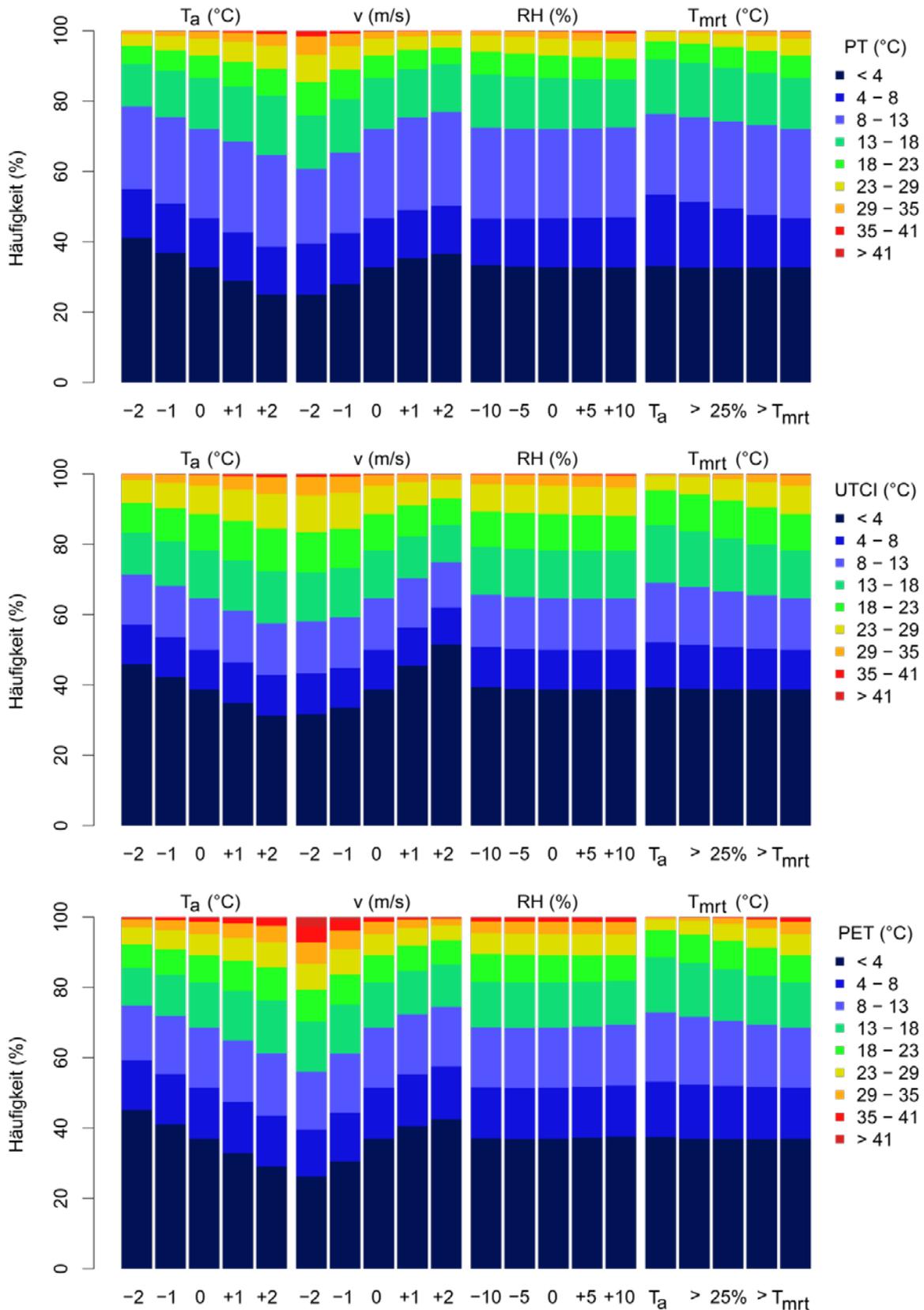


Abb. 1.3: Häufigkeit thermischer Belastungsklassen (Tab. 1.1) in den Ergebnissen für PT (oben), UTCI (Mitte) und PET (unten) in Freiburg. Die Grafik zeigt in jeweils eigenen Blocks von links nach rechts die Häufigkeit entsprechend dem unveränderten Datensatz und den modifizierten Testdatensätzen für die Lufttemperatur (T_a), die Windgeschwindigkeit (v), die relative Luftfeuchte (RH) und die mittlere Strahlungstemperatur (T_{mrt}). Die Modifikation des Datensatzes ist jeweils unterhalb der Säule angegeben. Eine Modifikation von 0 (bzw. T_{mrt} ganz rechts) entspricht dem Referenzdatensatz.

1.2.8.2 SENSITIVITÄT GEGENÜBER ÄNDERUNG DER WINDGESCHWINDIGKEIT

Tendenziell nehmen die Werte der thermischen Indizes und somit auch die Hitzestresshäufigkeit bei Verringerung der Windgeschwindigkeit zu (Abb. 1.4). PT zeigt im Mittel eine Erhöhung um 3.2°C, UTCI eine um 2.5°C, welche aber deutlich niedriger ist, als die von PET (4.5°C). Der Median der Ergebnisse für PT nimmt durch die verringerte Windgeschwindigkeit aufgrund der Häufigkeitsverteilung nur schwach um 1.3°C zu. Der Median für UTCI steigt dagegen deutlicher um 2.3°C, der für PET sogar um 3.6°C an. Die Höchstwerte steigen um 1.5 °C (PT) und um bis zu 7.1 °C (PET). Während der Hitzestress mit Verringerung der Windgeschwindigkeit zunimmt, reduziert sich die Häufigkeit des Kältestresses. Die Tiefstwerte erhöhen sich um 2.8 °C (PET) bis 3.8 °C (UTCI).

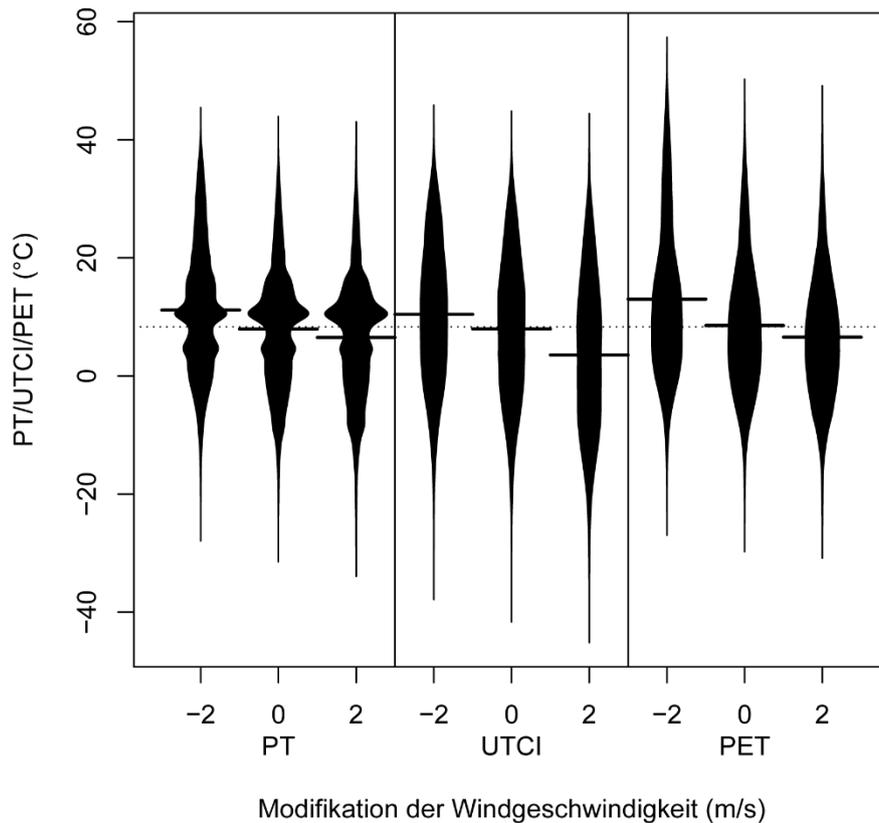


Abb. 1.4: Verteilung der Ergebnisse von PT (links), UTCI (Mitte) und PET (rechts) für die Datensätze mit modifizierter Windgeschwindigkeit. Für jeden Index ist je eine Verteilung für $v -2$ m/s, den Referenzdatensatz und eine für $v +2$ m/s dargestellt. Eine dickere Verteilung zeigt dabei ein häufigeres Ergebnis in diesem Bereich an. Die hier dargestellten Verteilungen gelten für Freiburg.

Bei einer Erhöhung der Windgeschwindigkeit um $+2$ m/s reduzieren sich Median und Mittelwert zwischen 1.4 °C (PT) und 4.4 °C (UTCI). Bei den Minima zeigt UTCI die stärkste Abnahme von 3.5 °C im Vergleich zum Referenzdatensatz. Die Höchstwerte gehen um 0.9 °C (PT), 0.4 °C (UTCI) und 1.1 °C (PET) zurück. Die unterschiedlich starke Veränderung der Ergebnisse der einzelnen Indizes bei modifizierter Windgeschwindigkeit lässt sich auch an der Änderung der Häufigkeiten der verschiedenen thermischen Belastungsklassen ablesen (Abb. 1.3). Hier zeigt UTCI die schwächste Zunahme der Häufigkeit wärmerer Klassen mit sinkender Windgeschwindigkeit.

Es ist zu beachten, dass UTCI nicht für Windgeschwindigkeiten unter 0.5 m/s oder über von 17 m/s berechnet werden kann. Beide Grenzwerte werden in den Daten der Untersuchungsgebiete häufig unter- und über-

schritten. Abgesehen von dieser Einschränkung zeigen alle drei Indizes eine exponentielle Zunahme der Häufigkeit heißerer Klassen mit sinkender Windgeschwindigkeit.

1.2.8.3 SENSITIVITÄT GEGENÜBER DER LUFTFEUCHTIGKEIT

Der Einfluss der Relativen Luftfeuchte auf die thermischen Indizes ist sehr viel schwächer als der der Lufttemperatur oder Windgeschwindigkeit (Abb. 1.5). Die Verteilungen aller drei Indizes strecken, bzw. stauchen sich bei erhöhter relativer Feuchte um 10 % leicht und bei reduzierter Relativen Feuchte um 10 % leicht gestaucht. Das heißt, dass sich eine Veränderung der Relativen Feuchte besonders in sehr kalten oder sehr warmen Bedingungen auswirkt. Die Änderung des Median und Mittelwerts liegt zwischen $\pm 0.1 - 0.3$ K. Dabei bedeutet eine Zunahme der Relativen Feuchte eine Intensivierung des Kälte-, bzw. Hitzestresses und eine Abnahme eine Verringerung, wobei der Einfluss von RH auf höhere PET-Werte deutlich größer ist als auf niedrigere. Dies wird auch durch die Änderung der Häufigkeit der thermischen Belastungsklassen für die drei Indizes bei variiert relativer Luftfeuchte (Abb. 1.3) deutlich, wo sich nur die Häufigkeiten der höheren Klassen nennenswert zu ändern scheinen. Diese Änderung ist dabei für PT am stärksten, während sich die Häufigkeiten für PET kaum verändern.

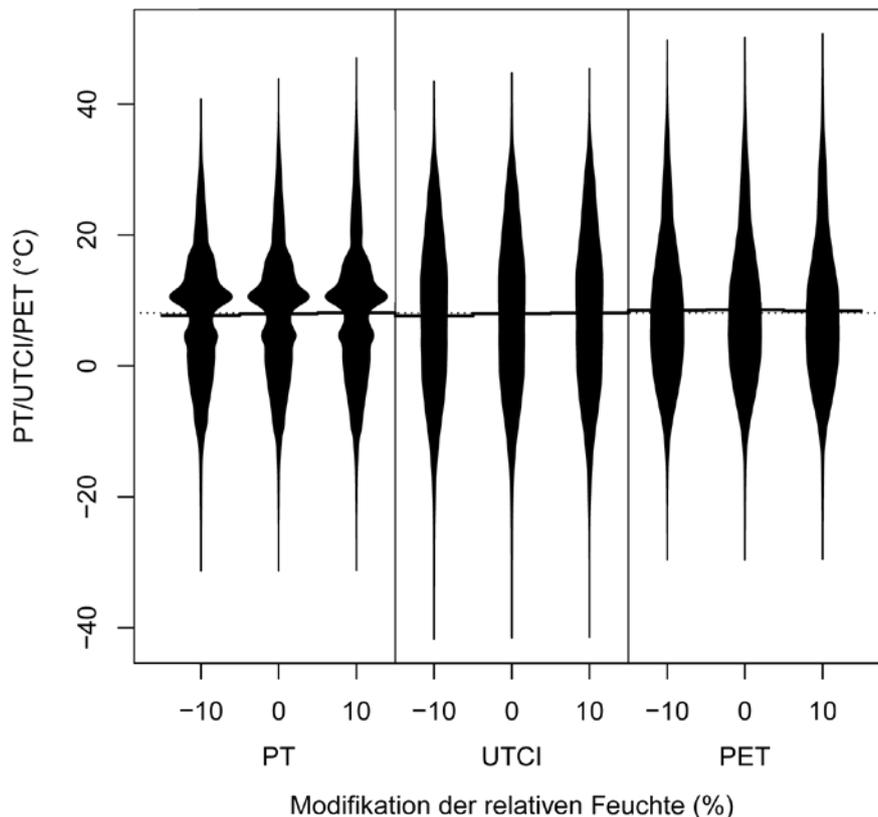


Abb. 1.5: Verteilung der Ergebnisse von PT (links), UTCI (Mitte) und PET (rechts) für die Datensätze mit modifizierter relativer Feuchte. Für jeden Index ist je eine Verteilung für RH -10 %, den Referenzdatensatz und eine für RH +10 % dargestellt. Eine dickere Verteilung zeigt dabei ein häufigeres Ergebnis in diesem Bereich an. Die hier dargestellten Verteilungen gelten für Freiburg.

1.2.8.4 SENSITIVITÄT GEGENÜBER DER MITTLEREN STRAHLUNGSTEMPERATUR

In der Abb. 1.6 wird Häufigkeit der Indizes für eine variiierende mittlere Strahlungstemperatur, berechnet für Schatten, Halbschatten und den Originaldatensatz, dargestellt. Vom Schatten in die Sonne übergehend erhöhen sich sowohl der Mittelwert als auch die Höchstwerte um 3.0 °C (UTCI) bis 6.2 °C. Im „Halbschatten“-Szenario sind die Mittelwerte um 0.5 und 0.6 °C höher im Vergleich zum „Schatten“ Datensatz, wobei sich

der Median um 0.1 (PET, UTCI) bis 1.0°C (PT) ändert. Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass eine Annäherung der mittleren Strahlungstemperatur an die Lufttemperatur bei allen drei Indizes zu einer Verringerung der Standardabweichung führt. Dies wird auch durch den Vergleich der Häufigkeiten der in thermische Belastungsklassen eingeteilten Ergebnisse für die verschiedenen Datensätze (Abb. 1.3) gestützt. Hier führt eine an die Lufttemperatur angenäherte mittlere Strahlungstemperatur, also bei Abschattung bei allen drei Indizes zu einer deutlichen Reduktion der Häufigkeit heißer Klassen. Auch die Häufigkeit sehr kalter Klassen ist für alle drei Indizes leicht reduziert. Dies führt zu einem deutlichen Anstieg der Häufigkeit der Klassen mit thermischem Komfort.

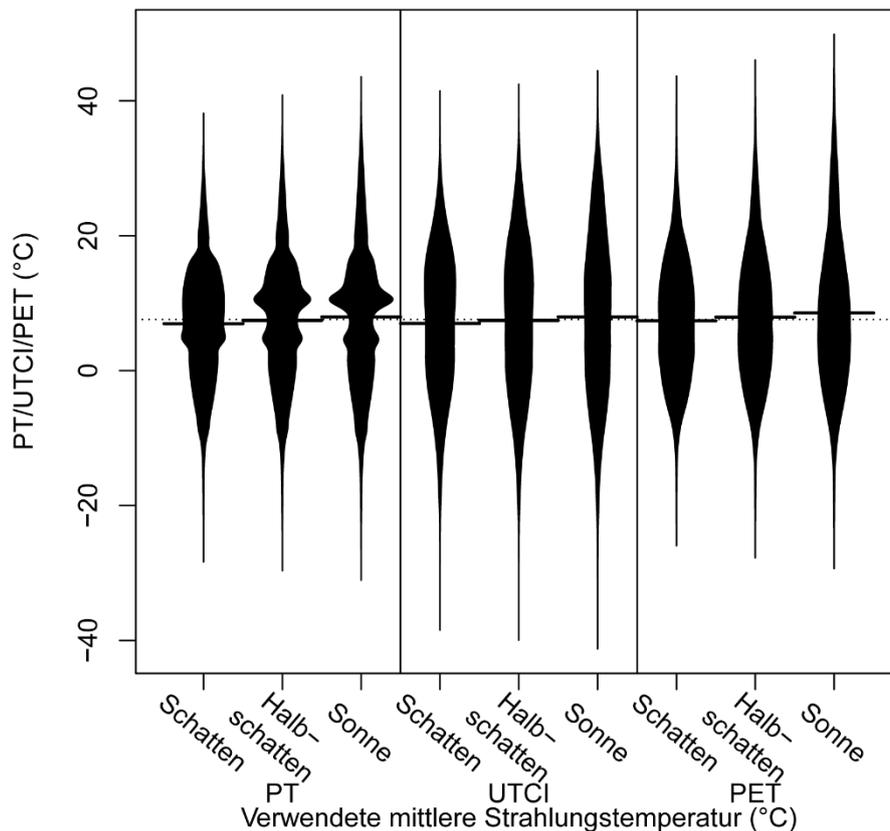


Abb. 1.6: Verteilung der Ergebnisse von PT (links), UTCI (Mitte) und PET (rechts) für die Datensätze mit modifizierter mittlerer Strahlungstemperatur. Für jeden Index ist je eine Verteilung für einen Datensatz mit $T_{\text{mrt}} = T_a$ („Schatten“), einen Datensatz mit $T_{\text{mrt}} = 0.5 * T_{\text{mrt}} + 0.5 * T_a$ („Halbschatten“) und den Referenzdatensatz mit $T_{\text{mrt}} = T_{\text{mrt}}$ („Sonne“) dargestellt. Eine dickere Verteilung zeigt dabei ein häufigeres Ergebnis in diesem Bereich an. Die hier dargestellten Verteilungen gelten für Freiburg.

Der größte Einfluss hat die mittlere Strahlungstemperatur auf das thermische Empfinden, zweitgrößter Einfluss hat die Windgeschwindigkeit, gefolgt von der Lufttemperatur. Eine Änderung der Relativen Feuchte ist vernachlässigbar. Abschattungsmaßnahmen lassen die mittlere Strahlungstemperatur signifikant absenken und somit auch die Häufigkeit von Hitzestress maßgeblich reduzieren. Abschattungsmaßnahmen sind durch stadtplanerische Maßnahmen relativ einfach umzusetzen und wirken sich positiv auf das thermische Bioklima in Städten aus.

1.3 HINTERGRUNDSITUATION DER PROJEKTSTÄDTE

Zur Einschätzung der Entwicklung des thermischen Bioklimas der Projektstädte wird zunächst die Hintergrundsituation auf der Grundlage langjähriger Messreihen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) über 27 bis 32 Jahre analysiert.

1.3.1 KARLSRUHE

1.3.1.1 KLIMATISCHER HINTERGRUND

Die Stadt Karlsruhe liegt im Westen Baden-Württembergs südlich von Mannheim. Sie weist im Sommer ähnlich wie die Projektstädte Mannheim und Freiburg eine relativ hohe Lufttemperatur auf. Karlsruhe erhält mit ca. 760 mm pro Jahr jedoch den geringsten Niederschlag (*NN*) unter den Projektstädten.

Tab. 1.2: Überblick über die Meteorologischen Daten der Station Karlsruhe. Die Aufzeichnungen decken den Zeitraum 01.01.1981 bis 02.11.2008 in stündlicher Auflösung ab. Die Windgeschwindigkeit ist für eine Höhe von 1.1 m angegeben.

	Einheit	Min	1. Qu.	Median	Mean	3. Qu.	Max	Fehlwerte (%)
T_a	°C	-19.4	5.0	11.0	11.2	16.9	42	0.9
RH	%	13.2	64.0	81.0	76.1	92.0	100	0.9
P	hPa	916	1012	1017	1017	1023	1050	0.9
cc	/8	0	3	7	5.4	8	8	1.4
WS	m/s	0.0	1.3	2.0	2.4	3.3	38.7	0.9

Während des Messzeitraums von Januar 1981 bis November 2008 bewegte sich die Lufttemperatur zwischen -19.4 °C und 42 °C. Das Mittel von 11.2 °C unterliegt typischen jahreszeitlichen Schwankungen mit mittlerem Minimum im Januar und mittlerem Maximum im Juli. Die relative Luftfeuchte ist in Karlsruhe mit einem Median von 81 % relativ hoch. Selbiges gilt für den Bedeckungsgrad, für den jedoch die Unsicherheit des hohen Anteils an Fehlwerten zu beachten ist. Die Windgeschwindigkeit, die für alle Projektstädte entsprechend einer Formel aus (Matzarakis et al. 2009) für die biometeorologisch relevante Höhe von 1.1 m höhenkorrigiert wurde, ist mit einem Median von 2 m/s ebenfalls recht hoch. Hier ist jedoch der dominierende Einfluss der Bebauung und sonstiger Strömungshindernisse zu berücksichtigen, die die lokale Windgeschwindigkeit innerhalb der Stadt stark beeinflussen. Gleiches gilt für die Windrichtung, die nur für ungestörte Freiflächen und im Überdachniveau repräsentativ gemessen werden kann. Diese sind stark von der Ausrichtung des Rheingrabens geprägt (Abb. 1.7).

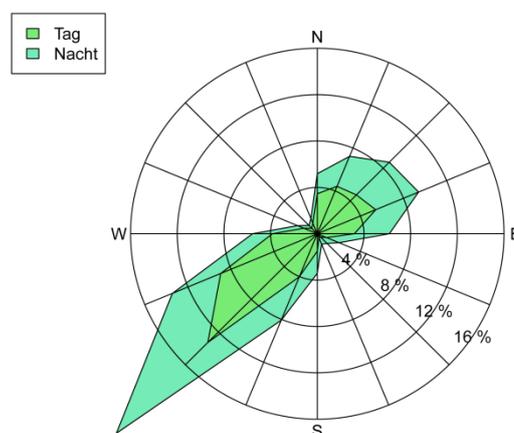


Abb. 1.7: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Karlsruhe. Die Häufigkeiten für Tag und Nachtstunden sind gestapelt dargestellt.

Entsprechend dominieren die Windrichtungen Süd-Südwest bis West-Südwest. Mit etwas geringerer Häufigkeit treten die Windrichtungen Nord bis Ost auf. Die Windrichtungen Nordwest und Südost wurden dagegen kaum beobachtet.

1.3.1.2 HUMAN-BIOKLIMATISCHER HINTERGRUND

Zur Beurteilung des derzeitigen thermischen Bioklimas in Karlsruhe wurden zunächst T_{mrt} und daraus die Indizes PET und UTCI berechnet (Tab. 1.2).

Tab. 1.3: Überblick über T_{mrt} und die Indizes PET und UTCI in Karlsruhe für 01.01.1981 bis 02.11.2008.

	Einheit	Min	1. Qu.	Median	Mean	3. Qu.	Max	Fehlwerte (%)
T_{mrt}	°C	-34.4	3.1	13	16.8	31.7	62	21.5
PET	°C	-28	0	7.4	8.7	16.1	53.6	21.0
UTCI	°C	-38.9	-2.9	7.1	7.1	17.2	43.8	25.0

PET bewegt sich in Karlsruhe zwischen -28.0 °C und 53.6 °C. Das Mittel über alle Werte liegt bei 8.7 °C. Aussagekräftiger ist jedoch die Verteilung der Stundenmittel im Tages- und Jahresverlauf (Abb. 1.8). Dieser zeigt, dass die größten Hitzebelastungen in den Tagstunden im Juli und August zu erwarten sind. Große Belastungen sind jedoch auch in den Nachtstunden der beiden Monate zu erwarten, in denen selbst im Mittel um 24 Uhr häufig noch 13 °C erreicht wird. Insgesamt kommen thermisch belastenden Bedingungen im Mittel in Karlsruhe von Mitte Mai bis Mitte September vor. Die kälteste Zeit des Jahres war im Messzeitraum das erste Februardrittel. Hier liegen 92.0 % aller Stundenwerte unter 4 °C. Der Anteil der wärmeren Klassen nimmt jedoch im Jahresverlauf zu, so dass der Anteil für die Klasse von unter 4 °C von Mitte Juli bis Ende August kleiner als 1 % ist. Von Mitte Mai bis Ende September trat starker Hitzestress in Karlsruhe auf. Von Mitte Juli bis Ende August wurde sogar extremer Hitzestress (PET > 41 °C) berechnet.

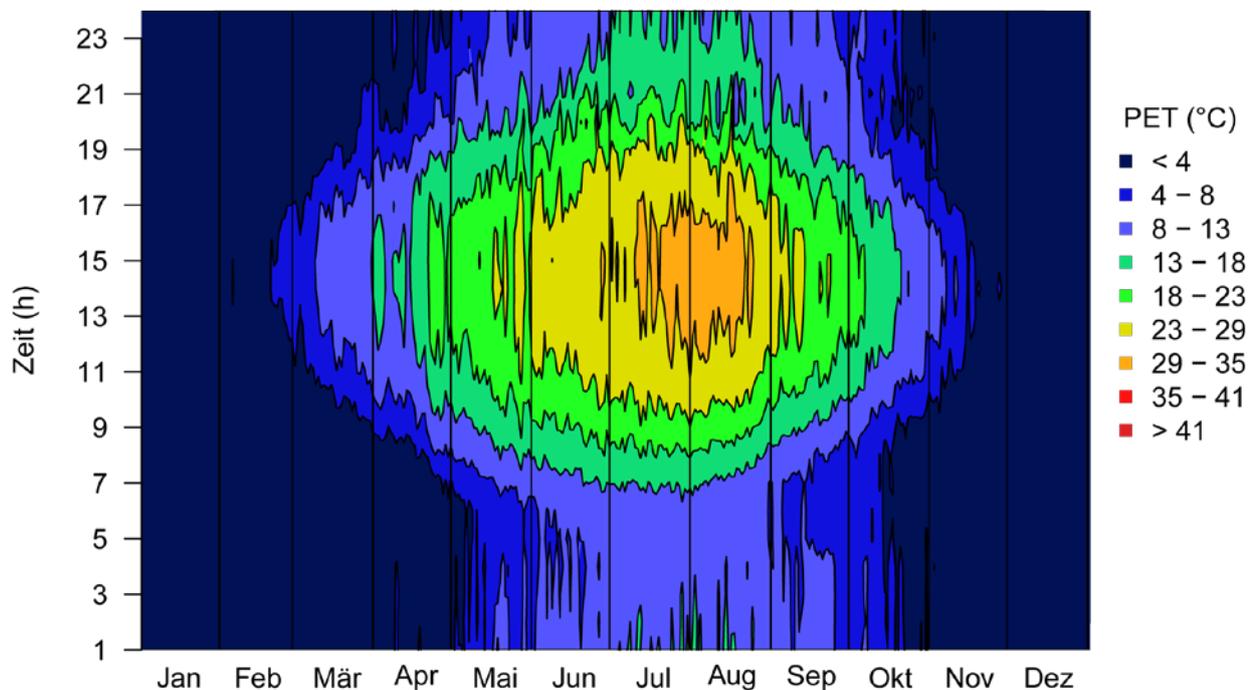


Abb. 1.8: Isoplethendiagramm zur Verteilung des Mittelwerts von PET im Tages- und Jahresverlauf in Karlsruhe.

Starker Hitzestress tritt mit 12.3 % am häufigsten Mitte August auf, während extremer Hitzestress Anfang August mit 2.8 % am häufigsten ist (Abb. 1.9).

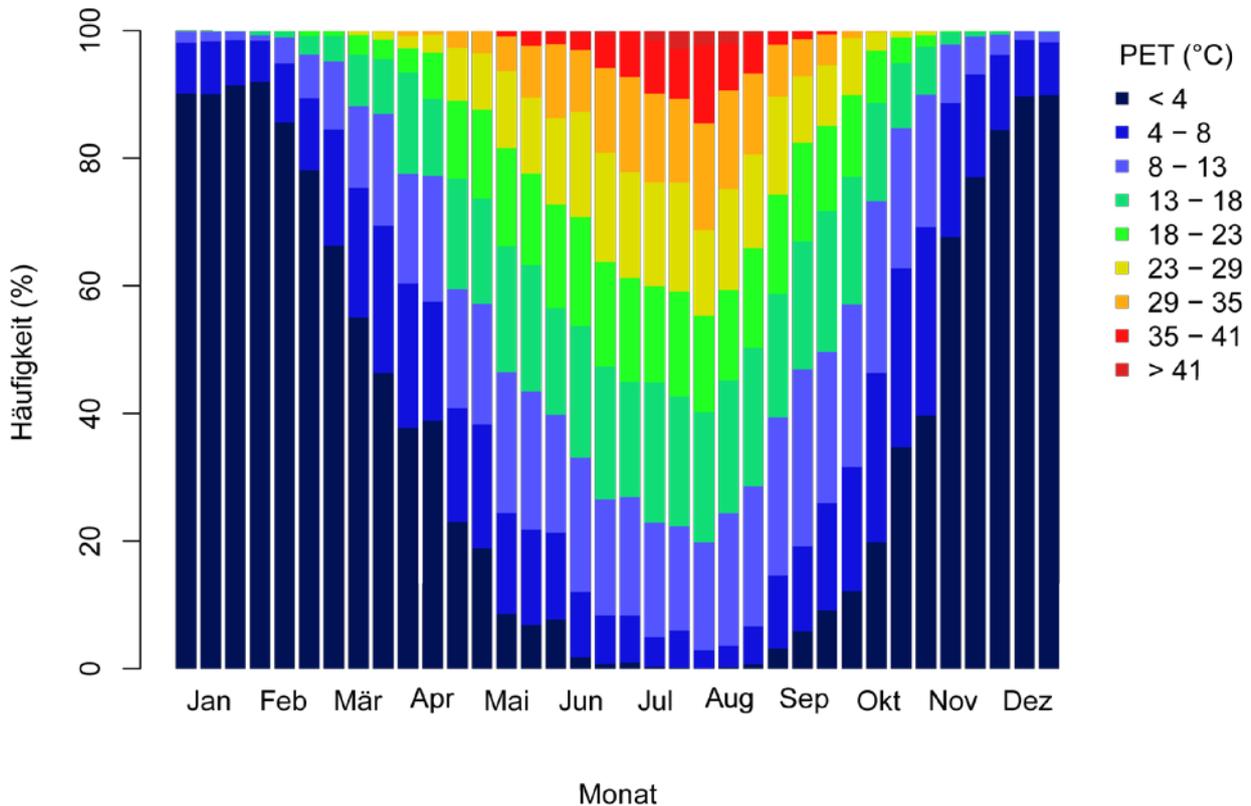


Abb. 1.9: Häufigkeitsverteilung von PET für Karlsruhe über alle Jahre in Dekaden. Die Einteilung entspricht den thermischen Empfindungsklassen für Mitteleuropa (Tab. 1.1).

1.3.2 MANNHEIM

1.3.2.1 KLIMATISCHER HINTERGRUND

Die Stadt Mannheim ist die nördlichste der ausgewählten Städte. Wie die Städte Freiburg und Karlsruhe liegt Mannheim im Rheingraben. Der Jahresgang von T_a ist somit ähnlich im Mittel mit $10.8\text{ }^\circ\text{C}$, jedoch etwas kühler. Das absolute Minimum von $-20.0\text{ }^\circ\text{C}$ und das absolute Maximum von $40.1\text{ }^\circ\text{C}$ liegen in einem ähnlichen Bereich wie in Karlsruhe. Die Station Mannheim erhält mit durchschnittlich 670 mm im Jahr etwas mehr Niederschlag als Karlsruhe. Die Aufzeichnung des Bedeckungsgrades weist mit 8.7% einen hohen Anteil an Fehlwerten auf (Tab. 1.3).

Tab. 1.3: Überblick über die Meteorologischen Daten der Station Mannheim. Die Aufzeichnungen decken den Zeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 in stündlicher Auflösung ab. Die Windgeschwindigkeit ist für eine Höhe von 1.1 m angegeben.

	Einheit	Min	1. Qu.	Median	Mean	3. Qu.	Max	Fehlwerte (%)
T_a	$^\circ\text{C}$	-18.7	4.9	10.8	10.9	16.8	40.1	0.2
RH	%	11.0	62.0	79.0	74.1	90.0	100	0.2
P	hPa	918.5	1012	1017	1017	1023	1045	0.2
cc	/8	0	3.0	7.0	5.3	8.0	8.0	8.7
WS	m/s	0	1	1.6	1.8	2.5	37	0.2

Alle übrigen Parameter haben eine Datenverfügbarkeit von 99.8% . Die relative Luftfeuchte liegt in Mannheim mit einem Median von 79.0% etwas niedriger als in Karlsruhe, verglichen mit anderen Städten jedoch recht hoch. Auch der Bedeckungsgrad ist mit einem Mittel von 5.3 überdurchschnittlich.

Die Windgeschwindigkeit ist mit einem Median von 1.6 m/s etwas niedriger als in Karlsruhe. Auch der Maximalwert von 37.0 m/s liegt geringfügig unter dem der südlicheren Projektstadt. Ähnlich ist jedoch die Prägung der Windrichtung durch den Rheingraben (Abb. 1.10). So dominieren Windrichtungen aus Nord-Nordwest bis Nord-Nordost

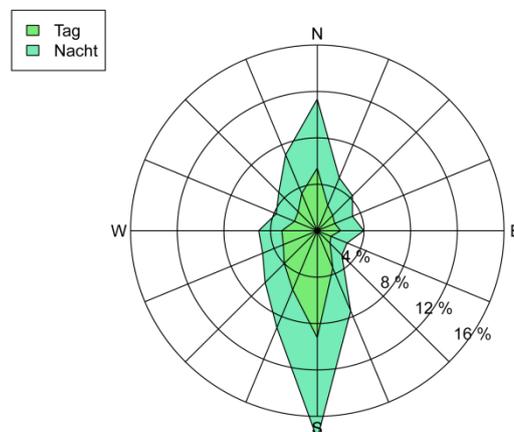


Abb. 1.10: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Mannheim. Die Häufigkeiten für Tag und Nachtstunden sind gestapelt dargestellt.

Die Windgeschwindigkeit ist mit einem Median von 1.6 m/s etwas niedriger als in Karlsruhe. Auch der Maximalwert von 37.0 m/s liegt geringfügig unter dem der südlicheren Projektstadt. Ähnlich ist jedoch die Prägung der Windrichtung durch den Rheingraben. So dominieren Windrichtungen aus Nord-Nordwest bis Nord-Nordost und Süd-Südost bis Süd-Südwest. Anströmung aus Ost und West ist hingegen selten.

1.3.2.2 HUMAN-BIOKLIMATISCHER HINTERGRUND

Mit durchschnittlich 8.4 °C ist PET in Mannheim verglichen mit Karlsruhe geringfügig niedriger (Tab. 1.4). Das absolute Minimum liegt in Mannheim mit -25.3 °C jedoch etwas höher als in Karlsruhe. Das absolute Maximum liegt mit 49.7 °C etwas niedriger. Somit weist Mannheim ein leicht gemäßigteres Klima auf als Karlsruhe.

Tab. 1.4: Überblick über T_{mrt} und die Indizes PET und UTCI in Mannheim. Der Berechnungszeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 deckt sich mit dem der Messdaten (vergl. Abschnitt 1.2.1 und Tab. 1.4).

	Einheit	Min	1. Qu.	Median	Mean	3. Qu.	Max	Fehlwerte (%)
T_{mrt}	°C	-34.4	1.7	10.9	14.8	28.2	61.4	8.8
PET	°C	-25.3	-0.1	7	8.4	15.5	49.7	8.8
UTCI	°C	-35.4	-1.4	7.7	7.9	16.9	42.2	12.5

Dies spiegelt sich auch im Tages- und Jahresverlauf der Mittelwerte für PET wieder (Abb. 1.11), der eine leichte Tendenz zu gemäßigteren Klassen zeigt. Die Grafik zeigt auch den deutlich niedrigeren Anteil an Fehlwerten (vgl. Tab. 1.3), der sich durch eine homogenere Verteilung bemerkbar macht. Die Monate mit den höchsten mittleren Werten für PET sind Juli und August. Für beide gilt, dass auch für die Nachtstunden relativ hohe mittlere PET berechnet wurden, was Auswirkungen auf die Nachtruhe und damit die Gesundheit erwarten lässt. Die dekadische Verteilung der absoluten Häufigkeiten von PET (Abb. 1.12) zeigt, dass die kälteste Zeit des Jahres, wie auch in Karlsruhe, das erste Februardrittel darstellt. Hier liegen 93.0 % aller Werte unter 4 °C. Starker Hitzestress ($PET \geq 35$ °C) tritt von Mitte Mai bis Ende September auf. Im Ersten Augustdrittel herrscht in 8.0 % aller Stunden starker Hitzestress. Extremer Hitzestress ($PET > 41$ °C) kommt in Mannheim von Mitte Juli bis Ende August vor. Am Häufigsten tritt er im letzten Julidrittel in 1.7 % aller Stunden auf.

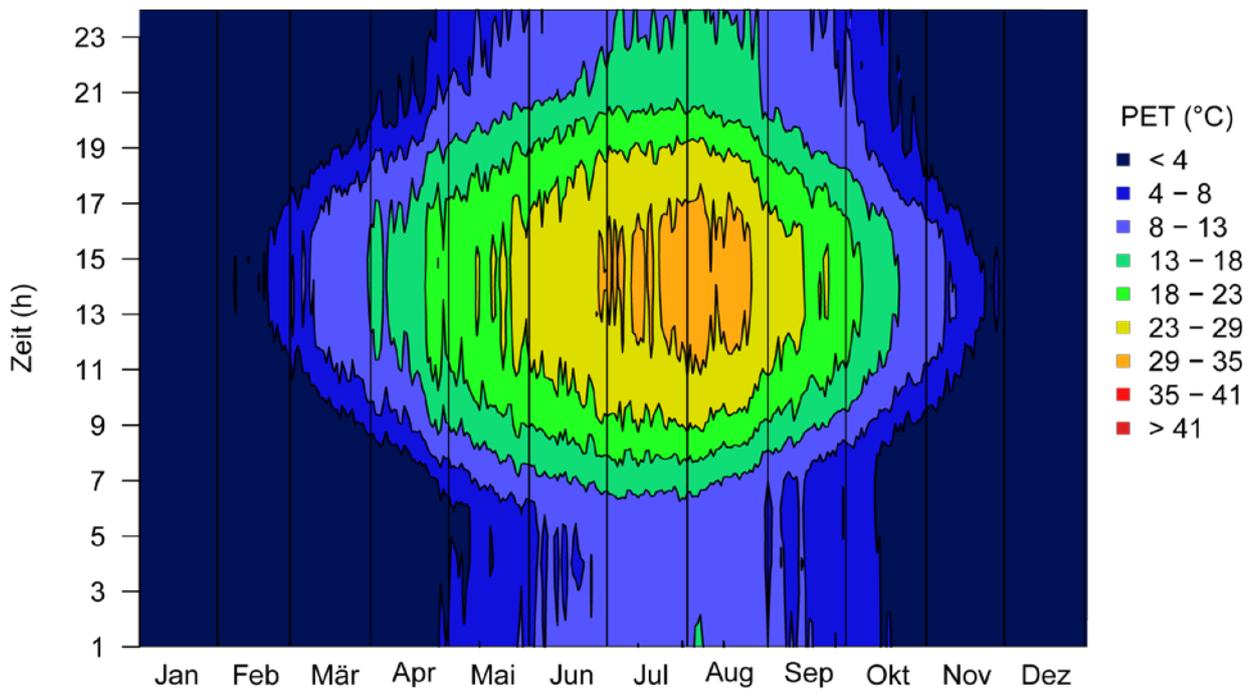


Abb. 1.11: Isoplethendiagramm zur Verteilung des Mittelwerts von PET im Tages- und Jahresverlauf in Mannheim.

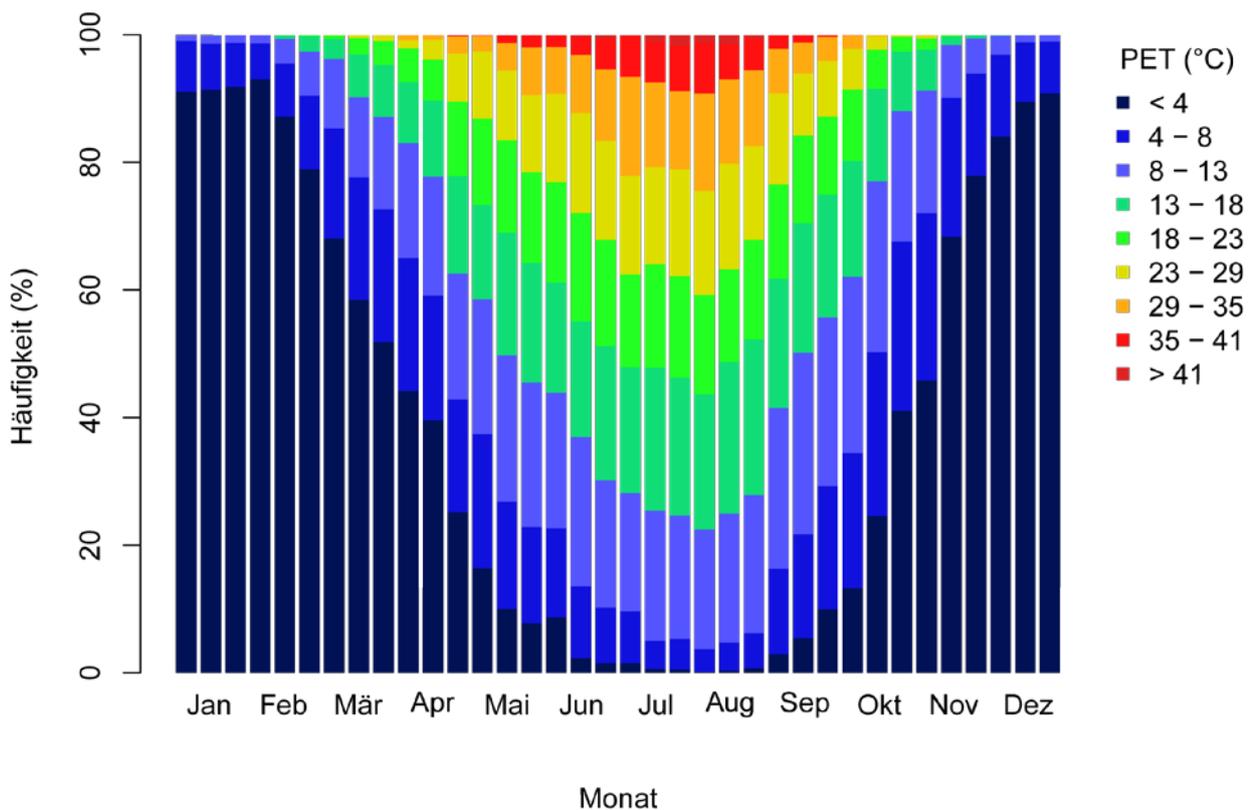


Abb. 1.12: Häufigkeitsverteilung von PET für Mannheim über alle Jahre in Dekaden. Die Einteilung entspricht den thermischen Empfindungsklassen für Mitteleuropa (Tab. 1.1).

1.3.3 FREIBURG

1.3.3.1 KLIMATISCHER HINTERGRUND

Die Stadt Freiburg liegt als südlichste Projektstadt am südlichen Ende des Oberrheingrabens und wird häufig als wärmste Stadt Deutschlands geführt. Unter den Projektstädten weist sie den höchsten Jahresmittelwert der Lufttemperatur von 11.4 °C auf. Freiburg erhält durch seine Lage am westlichen Schwarzwaldrand mit durchschnittlich 956 mm deutlich mehr Niederschlag als Karlsruhe und Mannheim. Die mittlere relative Feuchte mit 72.3 % etwas niedriger als in Karlsruhe und Mannheim. Der mittlere Bedeckungsgrad entspricht in etwa dem in Karlsruhe und Mannheim. Der Median der Windgeschwindigkeit liegt mit 1.6 m/s im selben Bereich wie in Mannheim. Deutliche Unterschiede zu den ersten beiden Projektstädten zeigen sich in der Häufigkeitsverteilung der Windrichtung (Abb. 1.13). Während die häufigsten Windrichtungen mit Nord-Nordwest bis Nord und Süd-Südwest bis Südwest weiterhin der Ausrichtung des Rheingrabens entsprechen, wurden in Freiburg auch die Windrichtungen Südost und Ost-Südost, sowie West beobachtet. Letztere sind stark von der Tageszeit abhängig und sind einem lokalen Bergwindssystem geschuldet, das quer zum Rheingraben durch das Dreisamtal verläuft.

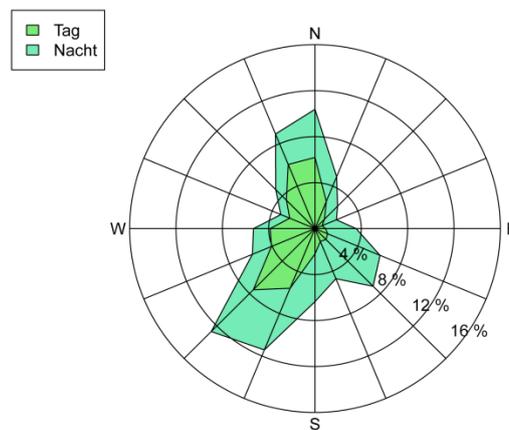


Abb. 1.13: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Freiburg. Die Häufigkeiten für Tag und Nachtstunden sind gestapelt dargestellt.

Einen hohen Anteil an Fehlwerten weisen die Beobachtungen des Bedeckungsgrades auf (23.0 %). Die Datenverfügbarkeit aller verwendeter Parameters liegt bei über 99 % (Tab. 1.5).

Tab. 1.5: Überblick über die Meteorologischen Daten der Station Freiburg. Die Aufzeichnungen decken den Zeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 in stündlicher Auflösung ab. Die Windgeschwindigkeit ist für eine Höhe von 1.1 m angegeben.

	Einheit	Min	1. Qu.	Median	Mean	3. Qu.	Max	Fehlwerte (%)
T_a	°C	-18.5	5.4	11.4	11.3	17.2	39.6	0.2
RH	%	12.0	60.0	75.0	72.3	87.0	100	0.2
P	hPa	915.5	1012	1017	1018	1023	1067	0.2
cc	/8	0	3	7	5.3	8	8	23.0
WS	m/s	0	0.9	1.6	2	2.7	62.2	0.2

Die Stadt Freiburg liegt mit einer mittleren PET von 8.5°C in einem ähnlichen Bereich wie die beiden anderen Projektstädte im Rheingraben (Tab. 1.6). Auch die Varianz der Werte ist mit einem absoluten Minimum von -26.7°C und einem absoluten Maximum von 47.2°C ähnlich weit. Mit 23.1 % enthalten die Daten für Freiburg jedoch wieder deutlich mehr Fehlwerte als die für Mannheim.

Tab. 1.6: Überblick über T_{mrt} und die Indizes PET und UTCI in Freiburg. Der Berechnungszeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 deckt sich mit dem der Messdaten (vergl. Abschnitt 1.2.1 und Tab. 1.6).

	Einheit	Min	1. Qu.	Median	Mean	3. Qu.	Max	Fehlwerte (%)
T_{mrt}	°C	-33.4	2.4	11.4	14.8	26.9	59.6	23.1
PET	°C	-26.7	0.7	7.6	8.5	15.3	47.2	23.1
UTCI	°C	-38.6	-0.9	8	8	16.7	41.8	26.0

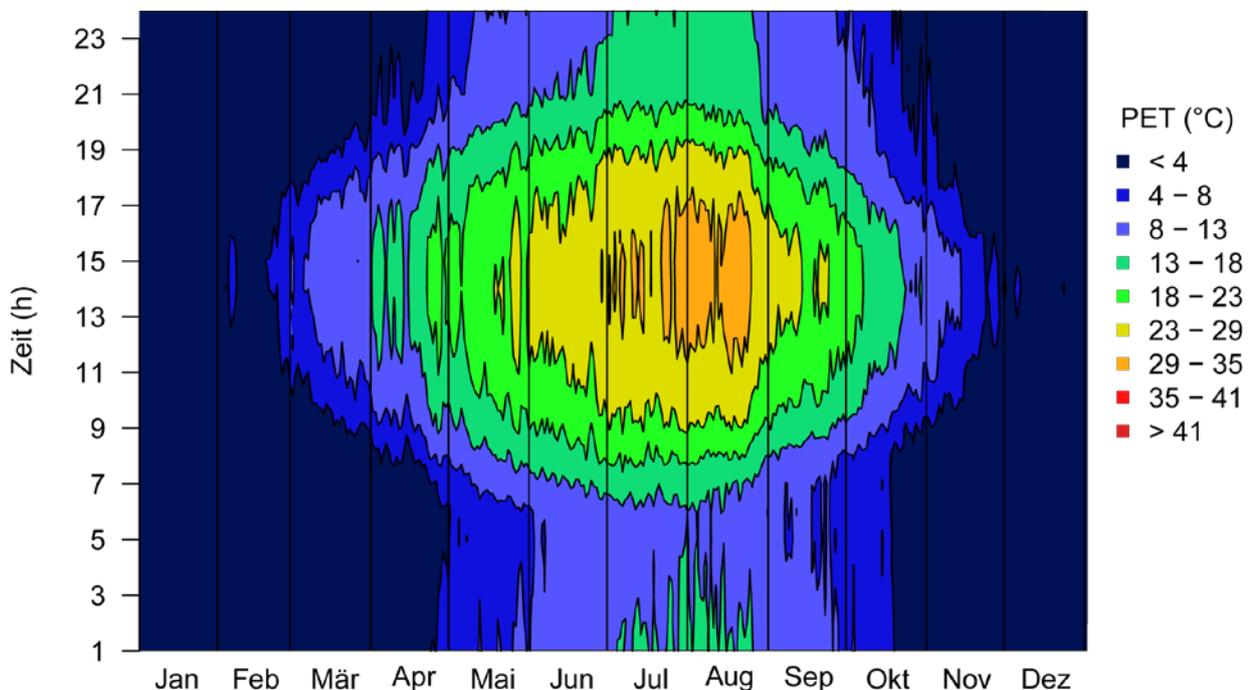


Abb. 1.14: Isoplethendiagramm zur Verteilung des Mittelwerts von PET im Tages- und Jahresverlauf in Freiburg.

Wie auch in Mannheim weisen in Freiburg die Monate Juli und August die höchsten durchschnittlichen Werte für PET auf (Abb. 1.14). Das Diagramm zeigt jedoch, dass sich die wärmeren Bedingungen in Freiburg deutlich weiter in die Nacht hinein fortsetzen als in den anderen beiden Projektstädten im Rheingraben. Das nächtliche thermische Niveau ist dementsprechend höher, die nächtliche Abkühlung und somit die Lüftungsmöglichkeit für Gebäude ist somit sehr gering. Die Stadt Freiburg die höchsten mittleren Nachtwerte unter den Projektstädten auf.

Die größte Häufigkeit für Stunden mit niedriger PET von weniger als 4 °C findet sich in Freiburg, wie auch in Karlsruhe und Mannheim im ersten Februart Drittel. Hier liegen 92.5 % der Stundenwerte unter 4 °C (Abb. 1.15). Stunden mit starkem Hitzestress (Tab. 1.1) sind in Freiburg von Mitte Mai bis Anfang Oktober zu verzeichnen. Am Häufigsten treten sie mit 7.3 % im ersten Augustdrittel auf. Stunden mit extremem Hitze-

stress finden sich vom ersten Junidrittel bis zum dritten Augustdrittel. Am Häufigsten treten Stunden mit extremem Hitzestress dabei mit 1.0 % Mitte August auf.

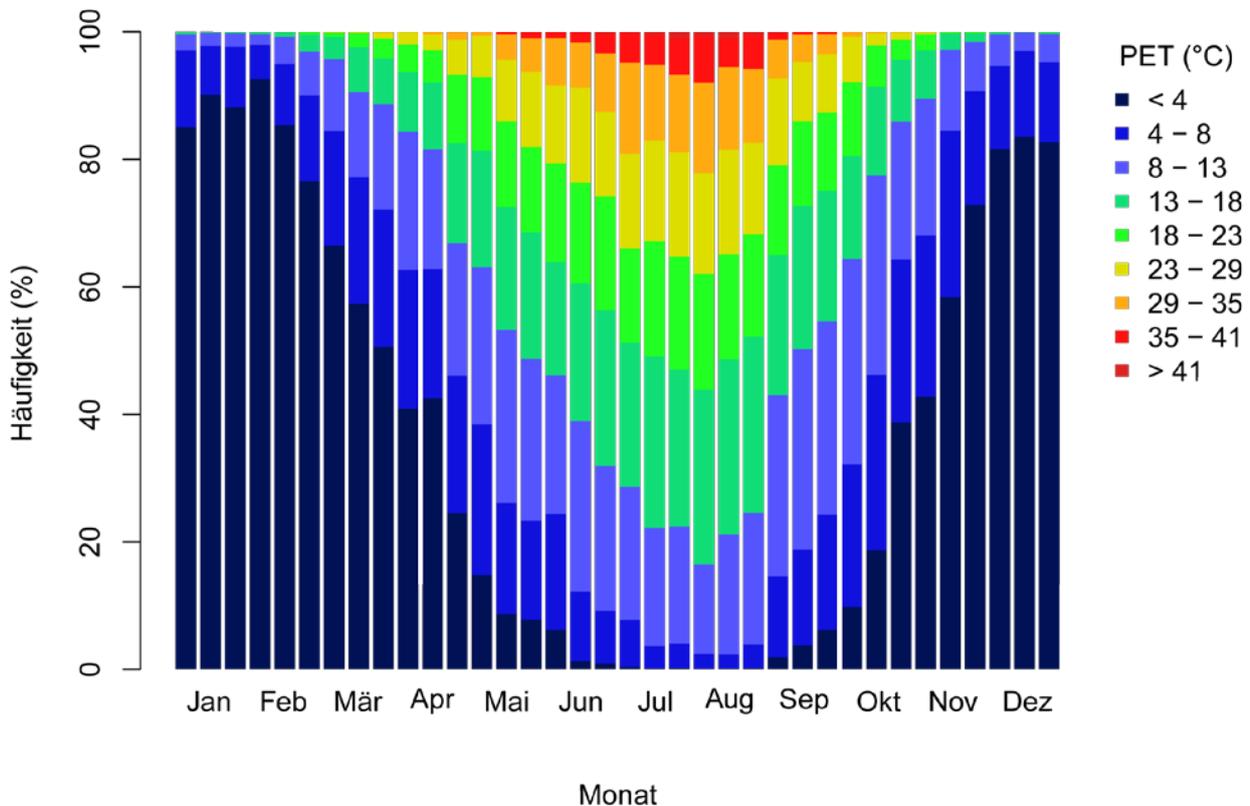


Abb. 1.15: Häufigkeitsverteilung von PET für Freiburg über alle Jahre in Dekaden. Die Einteilung entspricht den thermischen Empfindungsklassen für Mitteleuropa (Tab. 1.1).

1.3.4 ULM

1.3.4.1 KLIMATISCHER HINTERGRUND

Die Stadt Ulm liegt an der östlichen Grenze Baden-Württembergs an der Donau. Mit einem Mittelwert der Lufttemperatur von nur 8.7°C ist es in Ulm deutlich kälter als in den Projektstädten im Rheingraben. Für den Januar liegt das Monatsmittel von T_a sogar unter 0°C. Der Mittlere Jahresniederschlag an der Station Ulm beträgt 751 mm.

Der Anteil der Fehlwerte für den Bedeckungsgrad liegt bei 38.6 %, bei den übrigen verwendeten Parametern unter 1 % (Tab. 1.7).

Tab. 1.7: Überblick über die Meteorologischen Daten der Station Ulm. Die Aufzeichnungen decken den Zeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 in stündlicher Auflösung ab. Die Windgeschwindigkeit ist für eine Höhe von 1.1 m angegeben.

	Einheit	Min	1. Qu.	Median	Mean	3. Qu.	Max	Fehlwerte (%)
T_a	°C	-24.6	2.2	8.7	8.7	14.9	40.3	0.3
RH	%	13.0	68.0	84.0	79.3	94.0	100	0.4
P	hPa	923.3	1012	1017	1017	1023	1062	0.4
cc	/8	0	3	7	5.5	8	8	38.6
WS	m/s	0.0	1.0	1.4	1.6	2.0	34.6	0.3

In Ulm liegt die mittlere relative Luftfeuchte bei 79.3 %. Der Bedeckungsgrad beträgt durchschnittlich 5.5/8 und ist damit geringfügig höher als in Freiburg und Mannheim. Die Windgeschwindigkeit ist mit mittleren 1.6 m/s dagegen niedriger als in den Projektstädten im Rheingraben. Die Windrose für Ulm (Abb. 1.16) unterscheidet sich stark von denen der Projektstädte im Rheingraben. Die häufigsten Windrichtungen sind Südwest bis Süd-Südwest. Weiterhin treten regelmäßig Windrichtungen aus Nordwest bis Nord-Nordwest auf. Diese herrschen jedoch meist nur nachts vor. Die ohnehin seltenen Windrichtungen zwischen Ost und Süd wurden dagegen fast ausschließlich an Tagstunden beobachtet. Beides lässt auf ein lokales Berg-Talwindssystem schließen.

1.3.4.2 HUMAN-BIOKLIMATISCHER HINTERGRUND

Tab. 1.8: Überblick über Tmrt und die Indizes PET und UTCI in Ulm. Der Berechnungszeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 deckt sich mit dem der Messdaten (vergl. Abschnitt 1.2.1 und Tab. 1.8).

	Einheit	Min	1. Qu.	Median	Mean	3. Qu.	Max	Fehlwerte (%)
T_{mrt}	°C	-40.8	-0.2	10.3	14.3	29.7	62	38.6
PET	°C	-30.6	-2.6	5.4	6.6	14.6	49.3	38.6
UTCI	°C	-46.7	-3	6.8	6.7	16.5	43.1	40.6

Entsprechend ihrer Lage unterscheidet sich die Stadt Ulm auch bioklimatisch stark von den Projektstädten im Rheingraben. So liegt PET im Mittel bei 6.6°C und damit weit niedriger (Tab. 1.8). Das absolute Minimum liegt mit -30.6°C deutlich unter denen der Projektstädte im Rheingraben. Das absolute Maximum von 49.3°C ist dagegen ähnlich. Leider gibt es in den Berechnungen von PET für Ulm einen relativ großen Anteil von Fehlwerten von 38.6 %.

Der große Anteil von Fehlwerten zeigt sich auch in der Verteilung der mittleren stündlichen PET im Tages- und Jahresverlauf (siehe Abb. 1.17 z.B. Datenlücke für Anfang März um Mitternacht). Die kühleren Bedingungen spiegeln sich auch im zeitlichen Verlauf der Stundenmittel von PET wieder. So wird ein Mittel von mehr als 29 °C nur stellenweise im Juli und August in den Mittagsstunden erreicht. In beiden Monaten treten jedoch spätestens in der zweiten Nachthälfte kühlere Bedingungen von kleiner als 13 °C ein. Im Juni und September fällt das durchschnittliche Stundenmittel von PET nachts sogar fast immer unter 8°C.

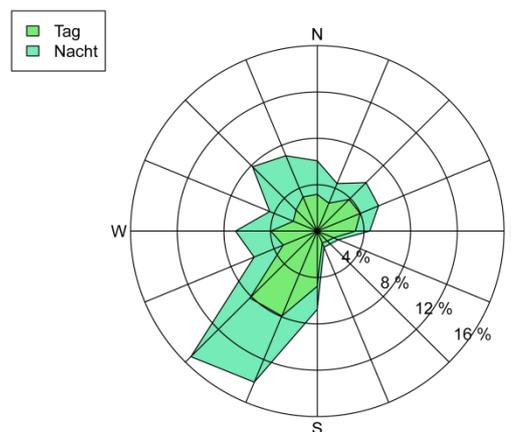


Abb. 1.16: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Ulm. Die Häufigkeiten für Tag und Nachtstunden sind gestapelt dargestellt.

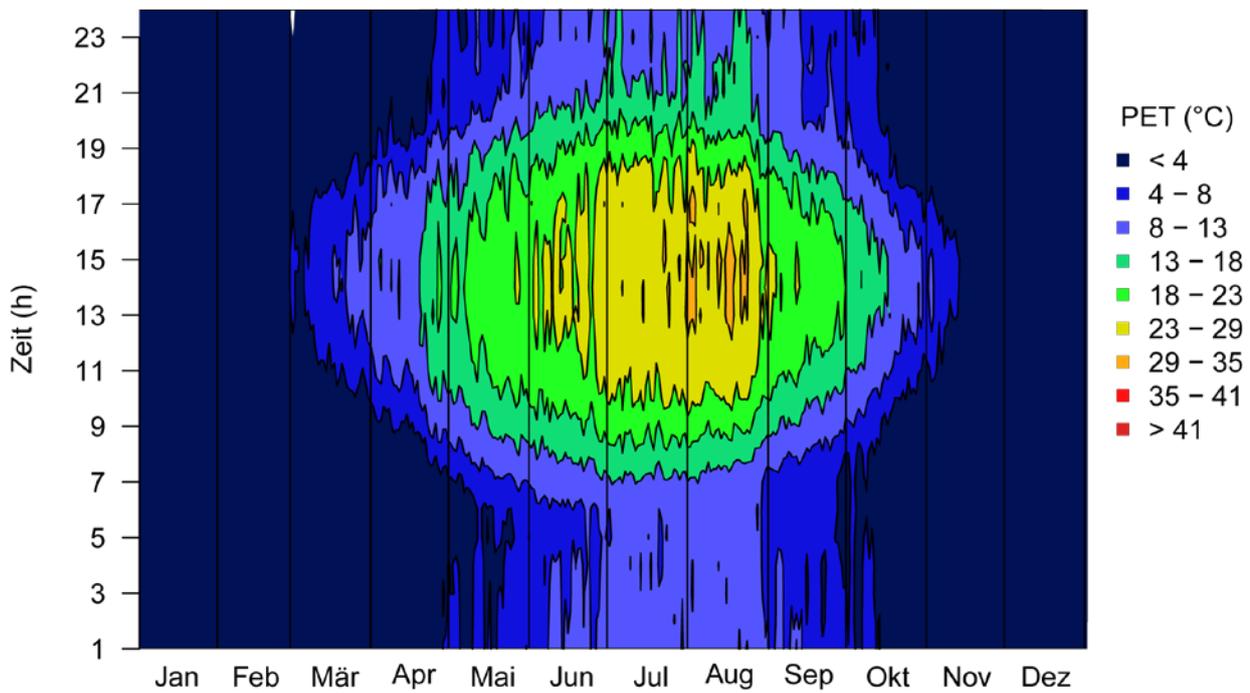


Abb. 1.17: Isoplethendiagramm zur Verteilung des Mittelwerts von PET im Tages- und Jahresverlauf in Ulm.

Auch die Verteilung der absoluten Häufigkeiten der PET Klassen in Ulm (Abb. 1.18) zeigt große Unterschiede zu denen der Projektstädte im Rheingraben. Stunden mit PET kleiner als 4 °C werden in Ulm über das gesamte Jahr berechnet. Ihr Anteil ist mit 97,8 % Mitte Januar am größten und fällt im August auf 0,5 %. Hitzestress findet sich in Ulm von Mitte Mai bis Anfang September. Die größte Häufigkeit für Hitzestress findet sich mit 5,3 % in der ersten Julidekade. Extremer Hitzestress wurde in Ulm für Stunden für die erste Julidekade bis zur letzten Augustdekade errechnet.

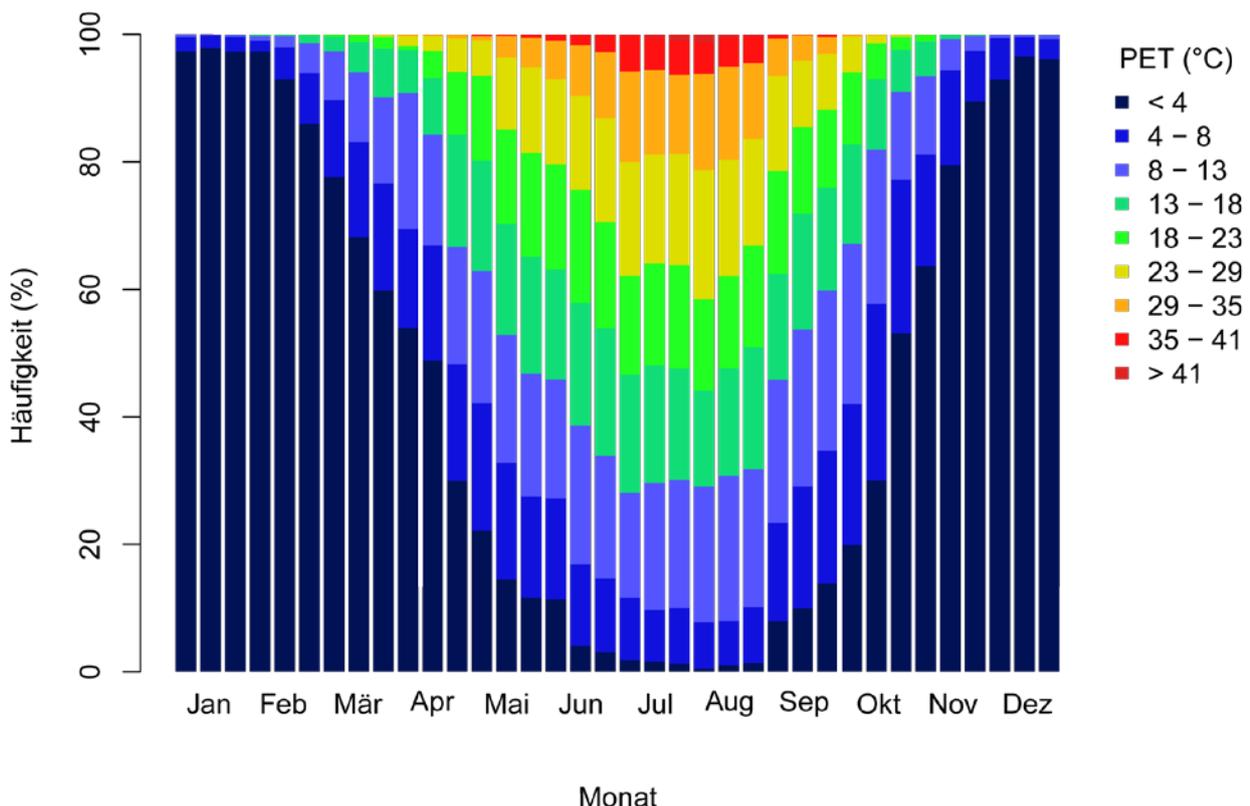


Abb. 1.18: Häufigkeitsverteilung von PET für Ulm über alle Jahre in Dekaden. Die Einteilung entspricht den thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) für Mitteleuropa.

1.3.5 KONSTANZ

1.3.5.1 KLIMATISCHER HINTERGRUND

Die Stadt Konstanz liegt im Süden Baden-Württembergs am Ufer des Bodensees. Die Nähe zum Bodensee spiegelt sich auch in einer, verglichen mit den übrigen Projektstädten, geringeren Tages- und Jahresgang der Lufttemperatur wieder (Tab. 1.9). Auch der Jahresgang von T_a ist leicht geringer ausgeprägt. Das Jahresmittel der Lufttemperatur ist mit 9.9 °C etwas wärmer als in Ulm, jedoch kühler als in den Projektstädten im Rheingraben. Der mittlere Jahresniederschlag an der Station Konstanz ist mit 850 mm der zweit höchste der Projektstädte. Die relative Feuchte ist in Konstanz mit 78.5% ebenfalls recht hoch. Nur Ulm weist unter den Projektstädten einen höheren Wert auf. Der mittlere Bedeckungsgrad entspricht mit $5.3/8$ dem von Mannheim. Die mittlere Windgeschwindigkeit liegt mit 1.3 m/s jedoch noch einmal niedriger als die in Ulm. Sie ist somit die niedrigste der Projektstädte. Die Datenverfügbarkeit der meteorologischen Parameter liegt bei 96.7% .

	Einheit	Min	1. Qu.	Median	Mean	3. Qu.	Max	Fehlwerte (%)
T_a	C	-19.0	3.5	9.8	9.9	15.9	36.3	0.1
RH	%	10.0	67.0	83.0	78.5	93.0	100	0.1
P	hPa	967.7	1013	1018	1018	1023	1046	0.1
cc	/8	0	3	7	5.5	8	8	3.2
WS	m/s	0.0	0.7	1.0	1.3	1.7	10.5	0.1

Tab. 1.9: Überblick über die Meteorologischen Daten der Station Konstanz für den Zeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 in stündlicher Auflösung. Die Windgeschwindigkeit ist für eine Höhe von 1.1 m angegeben.

Die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung für Konstanz (Abb. 1.19) zeigt große Häufigkeiten für die Windrichtungsbereiche West bis West-Südwest sowie Nord bis Nord-Nordost. Die Windrichtungen des erstgenannten Bereichs treten dabei etwas häufiger tagsüber auf, während die Mehrheit der Registrierungen für Windrichtungen im zweiten Bereich häufiger während Nachtstunden erfolgt.

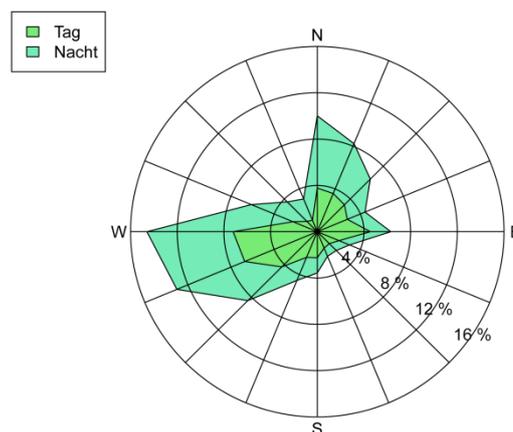


Abb. 1.19: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Konstanz. Die Häufigkeiten für Tag und Nachtstunden sind gestapelt dargestellt.

1.3.5.2 HUMAN-BIOKLIMATISCHER HINTERGRUND

Mit einer durchschnittlichen PET von 7.9 °C weist Konstanz etwas wärmere Bedingungen als Ulm, jedoch kühlere als die Projektstädte im Rheingraben auf (Tab. 1.10). Das absolute Minimum von -27.2 °C liegt zwischen denen von Karlsruhe und Freiburg. Das absolute Maximum von 50.5 °C ist dagegen das höchste aller Projektstädte.

Tab. 1.10: Überblick über T_{mrt} und die Indizes PET und UTCI in Konstanz. Der Berechnungszeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 deckt sich mit dem der Messdaten (vergl. Abschnitt 1.2.1 und Tab. 1.10).

	Einheit	Min	1. Qu.	Median	Mean	3. Qu.	Max	Fehlwerte (%)
T_{mrt}	°C	-33.4	0.5	9.4	13.2	24.1	60	3.4
PET	°C	-27.2	-0.8	6.7	7.9	14.7	50.5	3.4
UTCI	°C	-40.8	-0.2	8.6	8.5	17	41.3	7.8

Die Anzahl der Fehlwerte ist für Konstanz mit 3.4 % sehr gering. Der zeitliche Verlauf der Stundenmittel von PET (Abb. 1.20) zeigt die höchsten Stundenmittel von mehr als 29 °C in den Mittagsstunden von Juli und August. Hier halten sich relativ warme Bedingungen von mehr als 13 °C bis in die Nacht hinein, jedoch, im Unterschied zu Freiburg, meist nicht bis nach 24 Uhr. Anders als im Juni und September fallen die nächtlichen Stundenmittel von PET im Juli und August nie unter 8 °C.

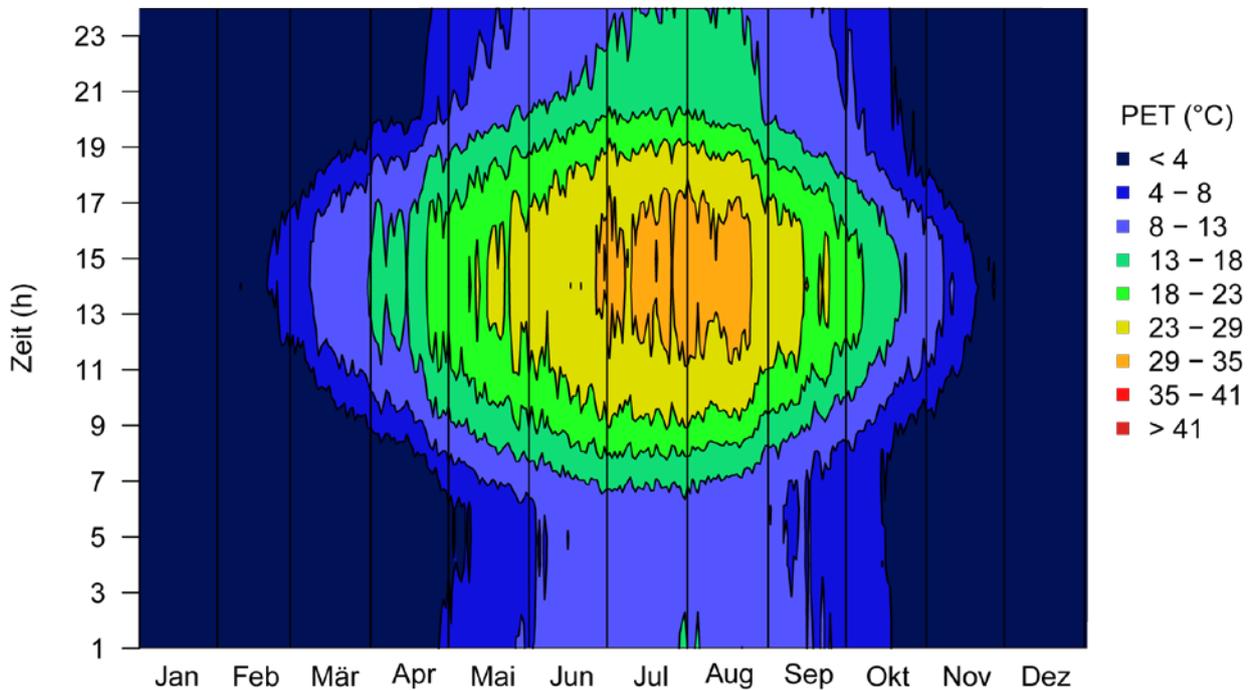


Abb. 1.20: Isoplethendiagramm zur Verteilung des Mittelwerts von PET im Tages- und Jahresverlauf in Konstanz.

Die kälteste Zeit des Jahres ist in Konstanz die letzte Januardekade. Hier zeigt die Häufigkeitsverteilung der Einzelergebnisse von PET (Abb. 1.21) 94.9 % kleiner als 4 °C. Im Gegensatz zu Ulm werden in der Zeit von Mitte Juli bis Ende August keine Werte von weniger als 4 °C mehr errechnet. Starker Hitzestress (Tab. 1.1) kommt in Konstanz von Ende Mai bis Ende September vor. Am häufigsten sind Stunden mit Hitzestress dabei mit einem Anteil von 9.5 % in der ersten Augustdekade. Extremer Hitzestress findet sich von der letzten Junidekade bis zur letzten Augustdekade mit der größten Häufigkeit von 1.9 % Ende Juli.

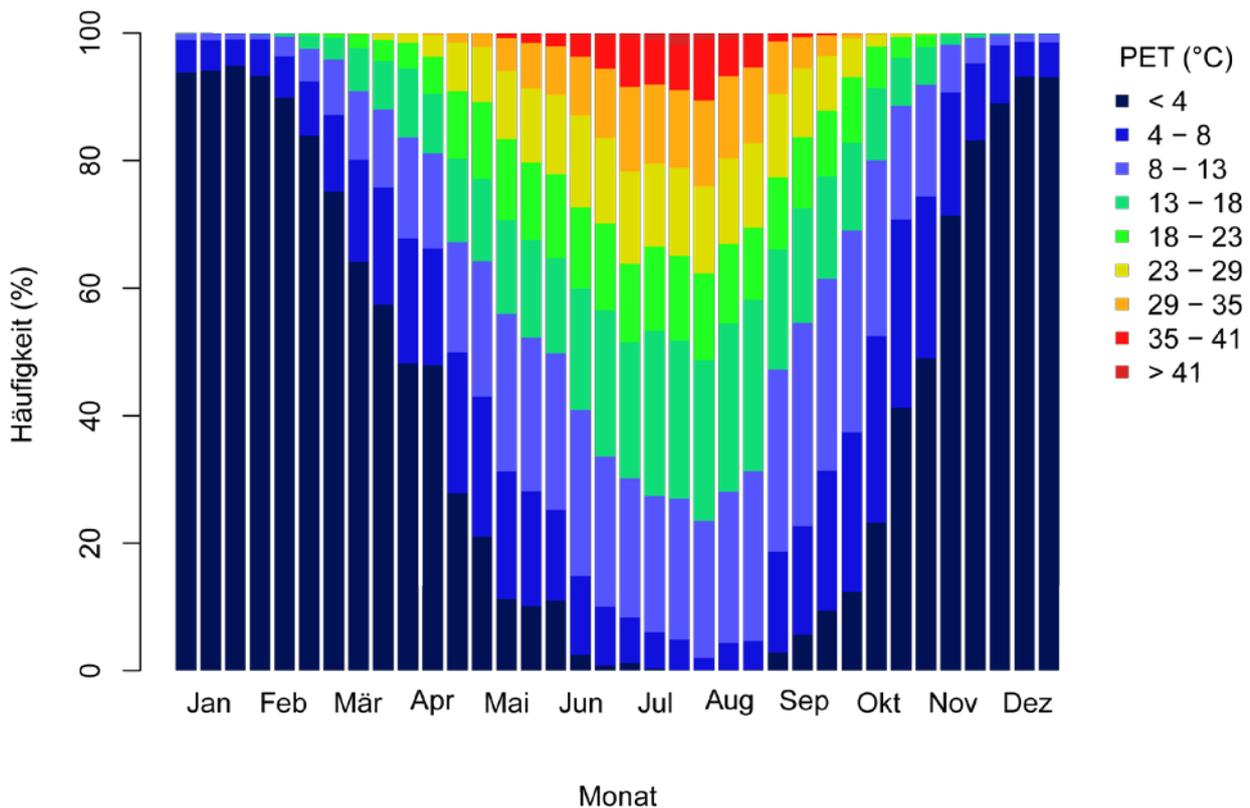


Abb. 1.21: Häufigkeitsverteilung von PET für Konstanz über alle Jahre in Dekaden. Die Einteilung entspricht den thermischen Empfindungsklassen für Mitteleuropa (Tab. 1.1).

1.4 ZUSAMMENFASSUNG

Die Bewertung klimatischer Verhältnisse in Städten sollte anhand ihrer Auswirkung auf Menschen durchgeführt werden. Diese nehmen keine einzelnen meteorologischen Parameter, sondern immer die Summe mehrerer war. So setzt sich das thermische Empfinden von Menschen aus allen Parametern zusammen, die deren Energiebilanz beeinflussen. Neben nicht-meteorologischen Parametern wie dem Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung gehen in diese die meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit und die mittlere Strahlungstemperatur, die Summe aller Strahlungsflüsse, ein. Hieraus lassen sich thermische Indizes wie die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) berechnen, die das thermische Empfinden, sowie thermischen Stress wiedergeben. Zur Vereinfachung der Bewertung der thermischen Bedingungen wurden die Ergebnisse in thermische Belastungsklassen eingeteilt und deren Häufigkeit untersucht.

Hierbei zeigt sich, dass alle untersuchten Städte im Zeitraum von Mitte Juni bis Ende August thermische Hitzebelastung aufweisen. Die PET Mittelwerte bleiben dabei für alle untersuchten Städte unter 35 °C während die Häufigkeitsverteilungen der PET Klassen jedoch bereits deutliche Anteil der Klassen 35 – 41 °C und sogar geringere Anteile der Klasse > 41 °C zeigen, die starke und extreme Hitzebelastung repräsentieren. Eine Übersicht über das thermische Bioklima der Städte findet sich in Tab. 1.11.

Tab. 1.11: Überblick über das thermische Bioklima der Städte repräsentiert durch den thermischen Index PET im jeweiligen Messzeitraum. Alle Zahlen sind durchschnittliche Stunden des Auftretens der jeweiligen Klasse. Die beiden heißesten Klassen haben dabei im Mittel einen Anteil von weniger als 1 Stunde.

	< 4°C	13 – 29°C	> 35°C
Karlsruhe	3380	2308	182
Mannheim	3479	2236	157
Freiburg	3243	2338	112
Ulm	4004	2080	96
Konstanz	3607	2084	155

Zur Erfassung und Ergreifung geeigneter Adaptations- und Mitigationsmaßnahmen ist es zunächst erforderlich, den Einfluss der einzelnen meteorologischen Parameter auf das thermische Empfinden von Menschen zu kennen. Dabei zeigt sich, dass der Einfluss des häufig damit assoziierten Parameters Lufttemperatur von dem der mittleren Strahlungstemperatur und der Windgeschwindigkeit bei weitem übertroffen werden kann. Eine gemäßigte mittlere Strahlungstemperatur wirkt sich bei Hitzestress positiv auf die thermische Empfindung aus und kann durch einfache Verschattungsmaßnahmen erreicht werden.

2 Entwicklung des thermischen Bioklimas

Die Veränderung des bioklimatischen Hintergrundes der Projektstädte durch die Klimaveränderung wurde durch zwei verschiedene Ansätze berücksichtigt. Zum einen wurde die zu erwartende Änderung anhand von Testreferenzjahren (TRY) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) abgeschätzt. Als weitere Quelle stützt sich die Berechnung der Veränderungen auf Ergebnisse des Modell REMO. In beiden Fällen wurde für den IST-Zustand sowie für die Zukunftsszenarien das thermische Bioklima berechnet und anschließend gegenübergestellt.

2.1 ENTWICKLUNG NACH TESTREFERENZJAHREN

Testreferenzjahre sind spezielle, vom DWD bereitgestellte Datensätze, die für eine Region typische meteorologische Bedingungen in Stundenauflösung bereitstellen. Sie decken dabei jeweils ein Jahr ab und enthalten die jeweils für eine bestimmte Zeit typischen Witterungen. Sie stellen somit ein typisches Jahr dar. Die für diese Studie verwendeten TRYs wurden aus Messdaten des Zeitraums 1988 bis 2007 hergestellt. Sie stellen ein fiktives Jahr 2010 dar, das den Ist-Zustand repräsentiert. Die TRYs für die Regionen, die die Modellstädte enthalten, liegen jeweils als Datensatz für das ganze Jahr und für einen heißen Sommer für die Monate Juni, Juli und August vor. Neben denen für den Ist-Zustand kamen auch TRYs für ein fiktives Jahr 2035 zum Einsatz. Diese wurden ebenfalls vom DWD bereitgestellt. Sie sind aus den Ergebnissen für den Zeitraum 2021 - 2050 von fünf regionalen Klimamodellen berechnet. Für jeweils das TRY für den Ist-Zustand und das für den Zukunftszeitraum wurde für alle relevanten Regionen PET berechnet. Die Ergebnisse wurden anschließend gegenübergestellt um einen Ausblick auf die Änderungen zu ermöglichen.

Die fünf Projektstädte verteilen sich auf drei der TRY Regionen (Abb. 2.1). Karlsruhe und Mannheim liegen in der TRY Region 12 (Oberrheingraben und unteres Neckartal). Mannheim bildet dabei sogar die Basis der TRY Region. Die Stadt Freiburg verteilt sich auf die TRY Regionen 06 und 12, da das Stadtgebiet in beide Regionen hineinreicht. Die TRY Region 06 (Nördliche und westliche Mittelgebirge, Randgebiete) ist für die im Dreisamtal und am Schwarzwaldrand gelegenen Stadtteile zu berücksichtigen, während sich der Großteil der Stadt in der Ebene, und damit der TRY Region 12 befindet. Die Stadt Ulm liegt in der TRY Region 13 (Schwäbisch fränkisches Stufenland / Alpenvorland). Die Projektstadt Konstanz ist nach Abb. 2.1 der Region 12 zuzuordnen. Im Folgenden werden die Änderungen vom Ist-Zustand zum Zukunftsszenario (TRYs für 2035) der einzelnen TRY Regionen vorgestellt. Anschließend werden die Änderungen auf die Messdaten der Projektstädte, die als Ist-Zustand angenommen wurden, angewendet um die jeweiligen Auswirkungen auf deren Bioklima aufzuzeigen.

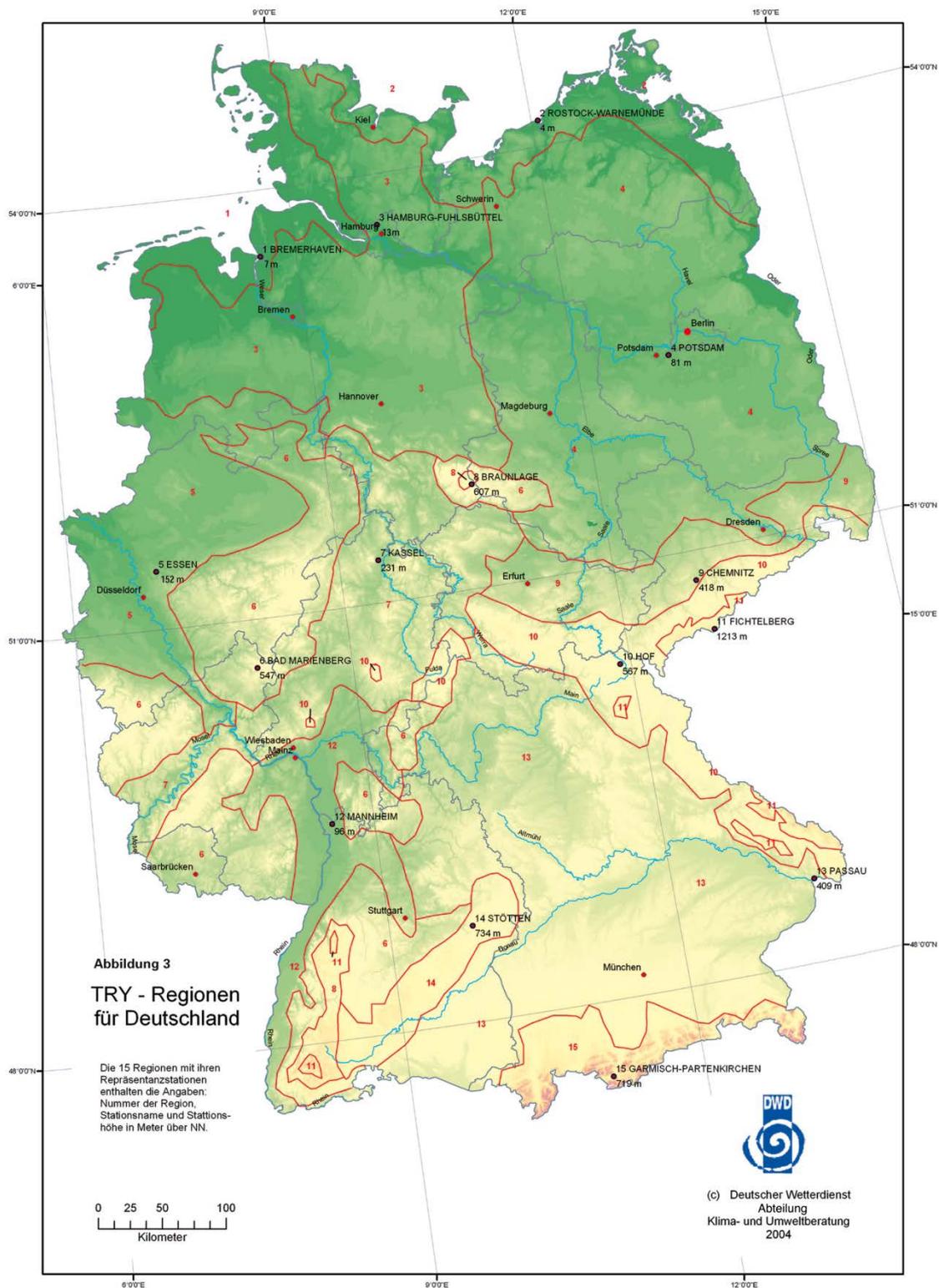


Abb. 2.1: Übersicht über die Lage und Ausdehnung der Regionen für die Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes. Quelle: Deutscher Wetterdienst¹

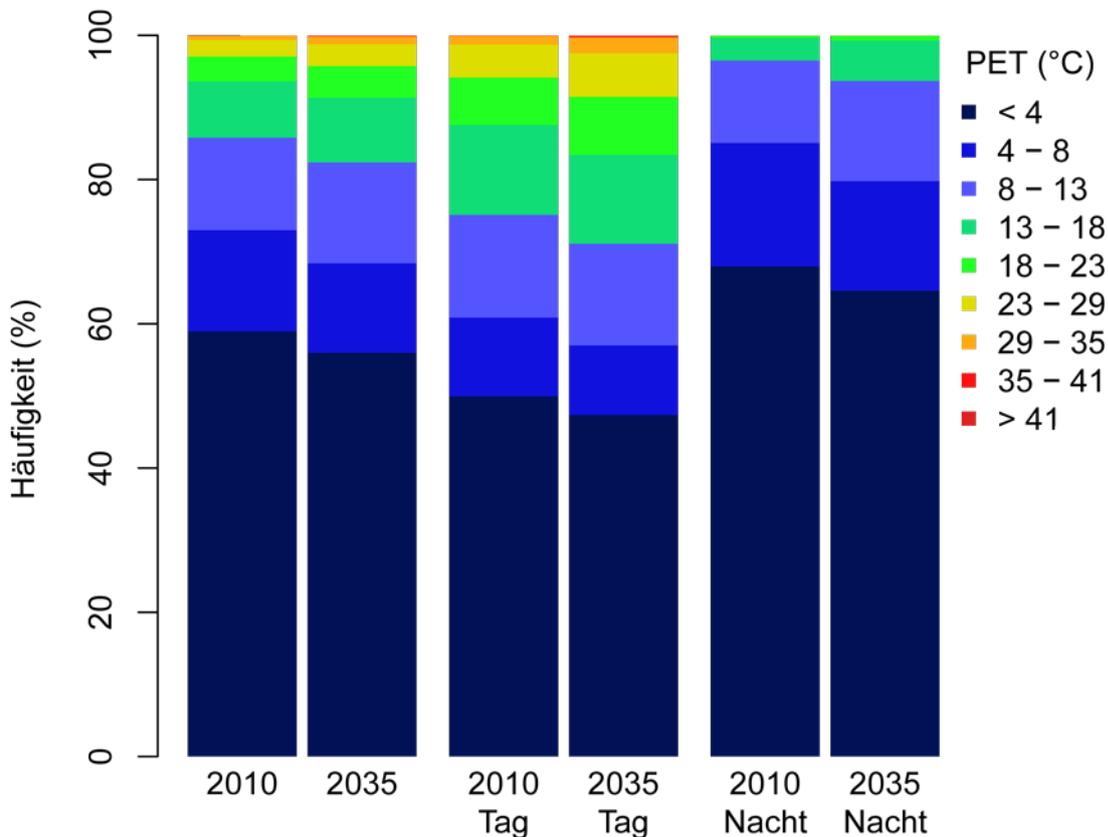
¹ www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU1/KU12/Klimadaten/TRY/TRY__Karte,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/TRY_Karte.pdf, 23.05.2014.

2.1.1 ENTWICKLUNG DES BIOKLIMAS DER EINZELNEN REGIONEN

2.1.1.1 Entwicklung in der Region 6

Die TRY Region 06 (Nördliche und westliche Mittelgebirge, Randgebiete) ist die kühlsste der in diesem Projekt verwendeten TRY Regionen. Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen für das TRY 2010 59.0 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.2 links). Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die zweit häufigste und deckt 14.0 % der Stundenwerte ab. Mit 12.8 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die dritt häufigste. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse von 13 °C bis 18 °C 7.8 %, von 18 °C bis 23 °C 3.5 %, von 23 °C bis 29 °C nur noch 2.3 %, für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 0.6 % und weniger als 0.1 % für die Klasse mit starkem Hitzestress 35 °C bis 41 °C). Die Klasse mit extremem Hitzestress (PET ≥ 41 °C) kommt im TRY 2010 für die Region 6 überhaupt nicht vor.

Betrachtet man das TRY für das Zukunftsszenario für die Region 6, das TRY 2035, so sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen immer noch ähnlich aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, haben jedoch deutliche Anteile auf Kosten der Klassen niedriger PET-Werte hinzugewonnen. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im TRY 2035 nur noch auf 56.0 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 3.0 % bedeutet.



TRY für die Region 06

Abb. 2.2: Vergleich des thermischen Bioklimas von TRY 2010 und TRY 2035 der Region 6, die Teile des Stadtgebietes der Stadt Freiburg beinhaltet.

Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt etwas schwächer um 1.6 % auf nur noch 12.4 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt dagegen eine Zunahme ihrer Häufigkeit um 1.2 % auf insgesamt 14.0 %. Auch die Anteile aller weiteren Klassen nehmen zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C um ebenfalls 1.2 % auf 9.0 %, der der Klasse 18 °C bis 23 °C um 0.9 % auf 4.4 %, der der Klasse von 23 °C bis 29 °C um 0.7 % auf 3.0 %, der der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 0.5 % auf 1.1 % und der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 0.1 % auf 0.1 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt ebenfalls leicht an. Ihre Häufigkeit bleibt jedoch weiterhin unter 0.1 %. Um ein differenzierteres Bild zu erhalten ist es hilfreich zwischen Tag und Nachtstunden zu unterscheiden. Tagstunden sind dabei alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Nachtstunden sind entsprechend 19 bis 24 Uhr, sowie 1 bis 6 Uhr. Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen für das TRY 2010 50.0 % aller Tagesstundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.2 Mitte). Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist nur noch die viert häufigste und deckt 11.0 % der Stundenwerte ab. Mit 14.2 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit-häufigste Klasse der Tagesstundenwerte. Eine ebenfalls relativ hohe Häufigkeit weist die Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die 12.5 % der Tagesstunden entfallen. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse von 18 °C bis 23 °C 6.6 %, von 23 °C bis 29 °C nur noch 4.6 %, für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 1.2 % und weniger als 0.1 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41$ °C) kommt auch für die Tagstunden im TRY 2010 für die Region 6 nicht in nennenswertem Umfang vor. Bei den Tagesstunden des TRY für das Zukunftsszenario der Region 6, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen immer noch ähnlich aus wie für die des TRY 2010. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, haben jedoch erneut deutliche Anteile auf Kosten der Klassen niedriger PET-Werte hinzugewonnen. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei den Tagesstunden des TRY 2035 nur noch auf 47.4 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 2.6 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt etwas schwächer um 1.3 % auf nur noch 9.7 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt ebenfalls eine Abnahme ihrer Häufigkeit um 0.2 % auf 14.1 %. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C verliert ebenfalls an Häufigkeit. Ihr Anteil geht um 0.1 % auf 12.4 % zurück. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte nehmen ausnahmslos zu. So steigt der der Klasse 18 °C bis 23 °C um 1.5 % auf 8.0 %, der der Klasse von 23 °C bis 29 °C um ebenfalls 1.5 % auf 6.1 %, der der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 1.0 % auf 2.2 % und der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 0.1 % auf 0.2 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt ebenfalls um 0.1 % an. Ihre Häufigkeit liegt damit bei rund 0.1 %, was ca. 9 Stunden im Jahr mit extremem Hitzestress bedeutet. Für die Nachtstunden bietet sich ein etwas anderes Bild (Abb. 2.2 rechts). Die Verteilung der Ergebnisse für PET ist stark in Richtung der niedrigen Klassen verschoben. Für die Nachtstunden des TRY 2010 entfallen so 68.0 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist mit großem Abstand die zweit häufigste und deckt 17.1 % der Nachtstundenwerte ab. Mit 11.4 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die dritt häufigste. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur noch sehr geringe Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte abnehmend. So beträgt der Anteil für die Klasse von 13 °C bis 18 °C nur 3.1 %. Alle darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von weniger als 0.1 % für die Nachtstunden des TRY 2010 für die Region 6 bedeutungslos. Beim TRY des Zukunftsszenarios für die Region 6, des TRY 2035, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen ähnlich aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios jedoch etwas häufiger vor als im Ist-Zustand. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im TRY 2035 immer noch auf 64.6 %, was jedoch einen Rückgang ihres Anteils um 3.4 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt etwas schwächer um 1.9 % auf nur noch 15.2 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt dagegen bereits wieder eine starke Zunahme ihrer Häufigkeit

um 2.5 % auf insgesamt 13.9 %. Auch die Anteile aller weiteren Klassen nehmen zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C zwar ebenfalls um 2.5 %.

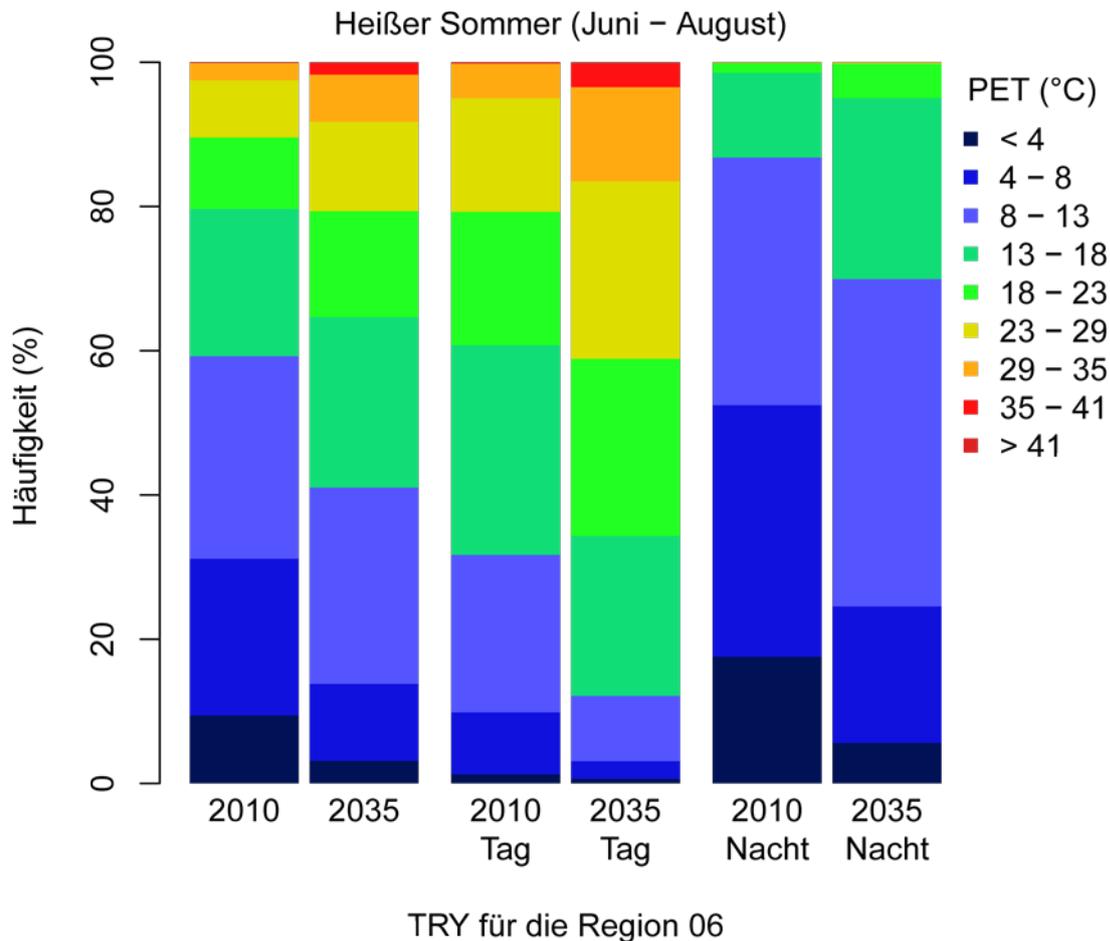


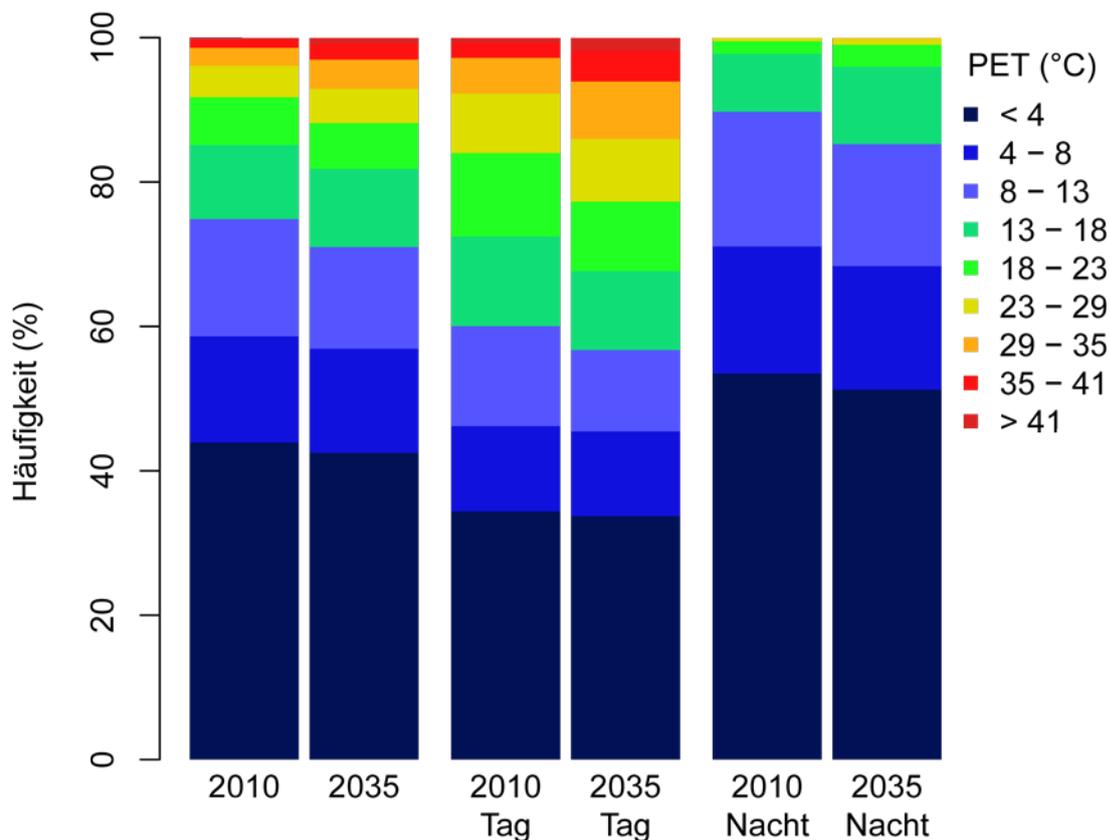
Abb. 2.3: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate (Juni, Juli und August) von „Heißer Sommer“ TRY 2010 und 2035 der Region 6, die Teile des Stadtgebietes der Stadt Freiburg beinhaltet.

Damit repräsentiert die Klasse jedoch gerade einmal 5.6 % der Nachtstunden. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt um 0.4 %, womit diese insgesamt jedoch auf gerade einmal 0.7 % kommt. Alle Anteile wärmerer Klassen steigen ebenfalls leicht an. Ihre Häufigkeit bleibt jedoch deutlich unter 0.1 %. Die Zeit der größten Relevanz der Vermeidung thermischen Stresses sind die Sommermonate. Zu deren Analyse wurden vom DWD spezielle Sommer TRYs zur Verfügung gestellt, die einen heißen Sommer der jeweiligen Region repräsentieren. In den Sommermonaten (Juni, Juli und August) des Sommer TRYs 2010 für die Region 06, entfallen nur 9.4 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (Abb. 2.3 links). Die Klasse von 4 °C bis 8 °C deckt einen etwas größeren Bereich von 21.7 % der Stundenwerte ab. Sie ist damit die zweit häufigste Klasse der Sommermonate des Ist-Zustands. Mit 28.1 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die häufigste. Einen ebenfalls sehr großen Anteil deckt die Klasse von 13 °C bis 18 °C ab, die 20.4 % der Stundenmittel repräsentiert. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse von 18 °C bis 23 °C noch 9.9 %, von 23 °C bis 29 °C immerhin noch 7.9 %, für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 2.4 % und gute 0.1 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). Die Klasse mit extremem Hitzestress (PET 41 °C) kommt in den Sommermonaten des Sommer TRY 2010 für die Region 6 nicht in nennenswertem Umfang vor. Betrachtet man die Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY für das Zukunftsszenario der Region 6, erscheint die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen deutlich in Richtung

der höheren Klassen verschoben. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C in den Sommermonaten des „Heißer Sommer“ TRY 2035 gerade einmal auf 3.1 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 6.3 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt sogar um 11.1 % auf nur noch 10.7 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt ebenfalls eine leichte Abnahme ihrer Häufigkeit um 0.9 % auf immer noch 27.2 %. Die Anteile aller weiteren Klassen nehmen ausnahmslos zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C um 3.2 % auf 23.6 %, der der Klasse 18 °C bis 23 °C um 4.8 % auf 14.7 %, der der Klasse von 23 °C bis 29 °C um 4.5 % auf 12.4 % und der der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 4.1 % auf 6.5 %. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt um 1.5 % auf 1.6 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt ebenfalls leicht an. Ihre Häufigkeit liegt für die Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2035 der Region 06 bei 0.1 %. Um ein möglichst differenziertes Bild zu erhalten ist es hilfreich, auch für die Sommermonate zwischen Tag- und Nachtstunden zu unterscheiden. Tagstunden sind dabei wieder alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Nachtstunden sind entsprechend 19 bis 24 Uhr, sowie 1 bis 6 Uhr. Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen für die Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2010 gerade einmal 1.3 % aller Tagesstundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.3 Mitte). Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist bereits weit bedeutender und deckt 8.6 % der Stundenwerte ab. Mit 21.9 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweithäufigste Klasse der Tagesstundenwerte. Eine noch größere Häufigkeit weist nur die Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die sogar 29.1 % der Tagesstunden entfallen. Ebenfalls sehr hohe Anteile entfallen mit 18.5 % auf die Klasse von 18 °C bis 23 °C und mit 15.8 % auf die Klasse von 23 °C bis 29 °C. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. So betragen die Anteile für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 4.8 % und 0.2 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41$ °C) kommt auch für die Tagstunden im „Heißer Sommer“ TRY 2010 für die Region 6 kaum vor, so dass ihr Anteil unter 0.1 % bleibt. Bei den Tagesstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY für das Zukunftsszenario der Region 6, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen, verglichen mit der für die Sommermonate des Ist-Szenarios, stark verschoben aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, haben erneut deutliche Anteile auf Kosten der Klassen niedriger PET-Werte hinzugewonnen. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei des Tagesstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2035 nur noch auf 0.6 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 0.6 % bedeutet. Ihr Anteil ging damit um über die Hälfte zurück. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt noch deutlicher um 6.2 % auf nur noch 2.4 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt die stärkste Abnahme ihrer Häufigkeit. Sie verliert 12.8 % und kommt damit auf einen Anteil von nur noch 9.1 %. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C geht in geringerem, aber immer noch deutlichem Umfang zurück. Ihr Anteil fällt um 6.9 % auf 22.2 %. Sie ist somit aber immer noch die dritthäufigste Klasse für die Tagstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2035 der Region 06. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte nehmen ausnahmslos zu. So steigt der der Klasse 18 °C bis 23 °C um 6.1 % auf 24.5 %, was dem zweitgrößten Anteil entspricht. Der Anteil der Klasse von 23 °C bis 29 °C steigt sogar um 8.9 % auf 24.6 %, der der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 8.2 % auf 13.0 % und der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um immer noch 3.0 % auf 3.2 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt ebenfalls spürbar um 0.3 % an. Ihre Häufigkeit liegt damit bei rund 0.3 %. Dies entspricht ca. 7 Stunden im Jahr. Für die Nachtstunden bietet sich ein etwas anderes Bild (Abb. 2.3 rechts). Die Verteilung der Ergebnisse für PET ist stark in Richtung der niedrigen Klassen verschoben. Für die Nachtstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2010 entfallen so 17.6 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist mit 34.9 % der Nachtstundenwerte knapp die häufigste. Nur einen geringfügig kleineren Anteil von 34.3 % weist die Klasse von 8 °C bis 13 °C aus, die damit die zweit-häufigste Klasse darstellt. Auch die Klasse von 13 °C bis 18 °C hat jedoch mit 11.8 % noch einen großen Anteil. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur noch sehr geringe Anteile. Diese sind für

steigende PET-Werte abnehmend. So entfällt auf die Klasse von 18 °C bis 23 °C ein Anteil von nur 1.4 %. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C kommt immerhin noch auf 0.1 %. Alle darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von weniger als 0.1 % für die Nachtstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2010 für die Region 6 bedeutungslos. Bei den Nachtstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY des Zukunftsszenarios für die Region 6, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen ebenfalls verschoben aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios jedoch etwas häufiger vor als im Ist-Zustand. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C für die Nachtstunden der Sommermonate im „Heißer Sommer“ TRY 2035 nur noch auf 5.6 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 12.0 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt sogar um 15.9 % auf immerhin noch 18.9 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt dagegen eine starke Zunahme ihrer Häufigkeit um 11.1 % auf insgesamt 45.4 %. Sie ist damit eindeutig die häufigste Klasse für die Nachtstunden. Auch die Anteile aller weiteren Klassen nehmen zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C sogar um 13.3 %. Damit repräsentiert die Klasse jedoch nur 25.1 % der Nachtstunden. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt um 3.4 %, womit diese insgesamt auf 4.8 % kommt. Auch die Häufigkeit der Klasse 23 °C bis 29 °C steigt leicht um 0.1 % auf 0.2 %. Alle Anteile wärmerer Klassen steigen ebenfalls leicht an. Ihre Häufigkeit bleibt jedoch deutlich unter 0.1 %.

2.1.1.2 ENTWICKLUNG IN DER REGION 12



TRY für die Region 12

Abb. 2.4: Vergleich des thermischen Bioklimas von TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12, die die Projektstädte Karlsruhe, Mannheim, Konstanz und Teile des Stadtgebietes der Stadt Freiburg beinhaltet.

Die TRY Region 12 (Oberrheingraben und unteres Neckartal) ist die wärmste der in diesem Projekt verwendeten TRY Regionen. Sie beinhaltet zudem den größten Teil der Projektstädte. Neben Karlsruhe, Mannheim

und Konstanz umfasst sie auch einen Teil der Stadt Freiburg. Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen für das TRY 2010 43.9 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.4 links). Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die dritthäufigste und deckt 14.7 % der Stundenwerte ab. Mit 16.2 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. In den Bereich von 13 °C bis 18 °C fallen 10.2 % der Ergebnisse. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse von 18 °C bis 23 °C 6.6 %, von 23 °C bis 29 °C nur noch 4.3 %, für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 2.5 % und 1.1 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41$ °C) kommt im TRY 2010 für die Region 12 in 0.4 % der Stunden vor. Betrachtet man das TRY für das Zukunftsszenario für die Region 12, das TRY 2035, so sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen immer noch ähnlich aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, haben jedoch Anteile auf Kosten der Klassen niedriger PET-Werte hinzugewonnen. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im TRY 2035 nur noch auf 42.5 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 1.4 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt schwächer um 0.3 % auf dann noch 14.4 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt dagegen wieder eine stärkere Abnahme ihrer Häufigkeit um 2.2 % auf 14.1 %. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C steigt dagegen schwach um 0.6 % auf 10.8 %. Der der Klasse 18 °C bis 23 °C fällt dagegen erneut um 0.3 % auf 6.3 %, während der der Klasse von 23 °C bis 29 °C um 0.4 % auf 4.8 % steigt. Die Anteile der höheren PET Klassen sind ausnahmslos zunehmend. So steigt die Häufigkeit des Temperaturbereichs zwischen 29 °C und 35 °C um 1.6 % auf 4.0 % und die des starken Hitzestresses von 35 °C bis 41 °C um 1.1 % auf 2.1 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt ebenfalls deutlich um 0.5 % an, womit sie 0.9 % aller Stundenwerte der Region 12 im Zukunftsszenario repräsentiert. Um wieder ein differenzierteres Bild zu erhalten wurde auch für die Region 12 zwischen Tag- und Nachtstunden unterschieden. Tagstunden sind dabei alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Nachtstunden sind entsprechend 19 bis 24 Uhr, sowie 1 bis 6 Uhr. Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen für das TRY 2010 34.4 % aller Tagesstundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.4 Mitte), die damit am häufigsten vorkommt. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die viert häufigste und deckt 11.8 % der Stundenwerte ab. Mit 13.8 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit-häufigste Klasse der Tagesstundenwerte. Eine ebenfalls relativ hohe Häufigkeit weist die Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die 12.4 % der Tagesstunden entfallen, was dem dritt-größten Anteil entspricht. Die Klasse von 18 °C bis 23 °C deckt 11.6 % der Tageswerte ab. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse von 23 °C bis 29 °C nur noch 8.2 %, für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 4.9 % und 2.1 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). 0.7 % der Ergebnisse für die Tagstunden im TRY 2010 für die Region 12 fallen in die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41$ °C). Bei den Tagesstunden des TRY für das Zukunftsszenario der Region 12 sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen im unteren Bereich immer noch ähnlich aus wie für die des TRY 2010. Im oberen Bereich ist sie jedoch deutlich in Richtung der wärmeren Klassen verschoben. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei den Tagesstunden des TRY 2035 weiterhin auf 33.7 %, was einen Rückgang ihres Anteils um lediglich 0.7 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt fast gar nicht. Sie geht um 0.1 % auf 11.7 % zurück. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt eine deutlichere Abnahme ihrer Häufigkeit um 2.6 % auf 11.3 %. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C verliert ebenfalls an Häufigkeit. Ihr Anteil geht um 1.5 % auf 10.9 % zurück. Der der Klasse 18 °C bis 23 °C verliert sogar 1.9 %, womit der Klasse ein Anteil von 9.6 % verbleibt. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte nehmen ausnahmslos zu. So steigt der der Klasse von 23 °C bis 29 °C um 0.4 % auf 8.7 %, der der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 3.0 % auf 8.0 % und der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 2.2 % auf 4.3 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt ebenfalls. Ihr

Anteil nimmt um 1.1 % zu. Ihre Häufigkeit liegt damit bei 1.8 %, was ca. 157 Stunden im Jahr mit extremem Hitzestress bedeutet. Für die Nachtstunden bietet sich ein etwas anderes Bild (Abb. 2.4 rechts). Die Verteilung der Ergebnisse für PET ist stark in Richtung der niedrigen Klassen verschoben. Für die Nachtstunden des TRY 2010 der Region 12 entfallen so 53.5 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist nur die dritthäufigste und deckt 17.6 % der Nachtstundenwerte ab. Mit 18.7 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur noch einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So beträgt der Anteil für die Klasse von 13 °C bis 18 °C nur 8.0 %. Die Klasse von 18 °C bis 23 °C deckt 1.7 % der Nachtstunden ab. Einen noch geringeren Anteil weist die Klasse von 23 °C bis 29 °C auf, die nur 0.5 % der Nachtstunden repräsentiert. Alle darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von weniger als 0.1 % für die Nachtstunden des TRY 2010 für die Region 12 bedeutungslos. Beim TRY des Zukunftsszenarios für die Region 12, des TRY 2035, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen für die Nachtstunden ähnlich aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios jedoch etwas häufiger vor als im Ist-Zustand. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im TRY 2035 immer noch auf 51.2 %, was jedoch einen Rückgang ihres Anteils um 2.2 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt nur schwach um 0.5 % auf insgesamt 17.1 %. Einen stärkeren Rückgang verzeichnet die Klasse von 8 °C bis 13 °C, deren Häufigkeit um 1.8 % auf insgesamt 16.9 % zurückgeht. Die Anteile aller Klassen für höhere PET-Werte nehmen zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C um 2.7 %. Damit repräsentiert die Klasse 10.7 % der Nachtstunden. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt um 1.3 %, womit diese insgesamt jedoch auf gerade einmal 3.1 % kommt. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C verzeichnet ebenfalls einen Anstieg ihrer Häufigkeit. Dieser ist jedoch mit 0.4 % relativ gering, wodurch die Klasse schließlich 0.9 % der Nachtstunden repräsentiert. Der Anteil der nächsthöheren Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt um 0.1 %. Da ihr Anteil für das Ist-Szenario deutlich unter 0.1 % lag, entspricht dies auch ihrer Häufigkeit im Zukunftsszenario. Alle Anteile wärmerer Klassen steigen ebenfalls leicht an. Ihre Häufigkeit bleibt jedoch deutlich unter 0.1 %. Die Zeit der größten Relevanz der Vermeidung thermischen Stresses, die Sommermonate, sollen hier wieder getrennt betrachtet werden. In den Sommermonaten (Juni, Juli und August) des Sommer TRYs 2010 für die Region 12, entfallen nur 2.3 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (Abb. 2.5 links). Die Klasse von 4 °C bis 8 °C deckt einen etwas größeren Bereich von 7.9 % der Stundenwerte ab. Mit 22.2 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. Einen noch größeren Anteil deckt die Klasse von 13 °C bis 18 °C ab, die 23.4 % der Stundenmittel repräsentiert. Sie ist damit die häufigste Klasse der Sommermonate des Ist-Zustands. Der Anteil für die Klasse von 18 °C bis 23 °C ist mit 13.9 % deutlich größer als in der Region 06. Der der Klasse von 23 °C bis 29 °C beträgt immer noch 11.8 %, für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 10.4 % und 6.5 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). Die Klasse mit extremem Hitzestress (PET 41 °C) kommt in den Sommermonaten des Sommer TRY 2010 für die Region 12 in 2.0 % der Stunden vor. Betrachtet man die Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY für das Zukunftsszenario der Region 12, erscheint die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen im unteren Bereich deutlich in Richtung der höheren Klassen verschoben. Im oberen Bereich scheint jedoch keine Veränderung stattgefunden zu haben. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C in den Sommermonaten des „Heißer Sommer“ TRY 2035 gerade einmal auf 0.1 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 2.2 % bedeutet. PET fällt damit in diesem Zeitraum durchschnittlich nur noch für zwei Stunden unter 4 °C. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt ebenfalls deutlich um 4.4 % auf nur noch 3.5 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt eine Abnahme ihrer Häufigkeit in ähnlichem Umfang von 4.6 % auf immer noch 17.6 %. Die Anteile aller weiteren Klassen nehmen ausnahmslos zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C um 2.0 % auf 25.4 %, der der Klasse 18 °C bis 23 °C um 0.9 % auf 14.4 %, der der Klasse von 23 °C bis 29 °C um 0.6 % auf 12.4 % und der der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 3.7 % auf 14.0 %. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt sogar um 3.8 %

auf 10.3 %. Auch der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt deutlich an. Ihre Häufigkeit nimmt um 0.2 % zu und liegt für die Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2035 der Region 12 bei 2.2 %.

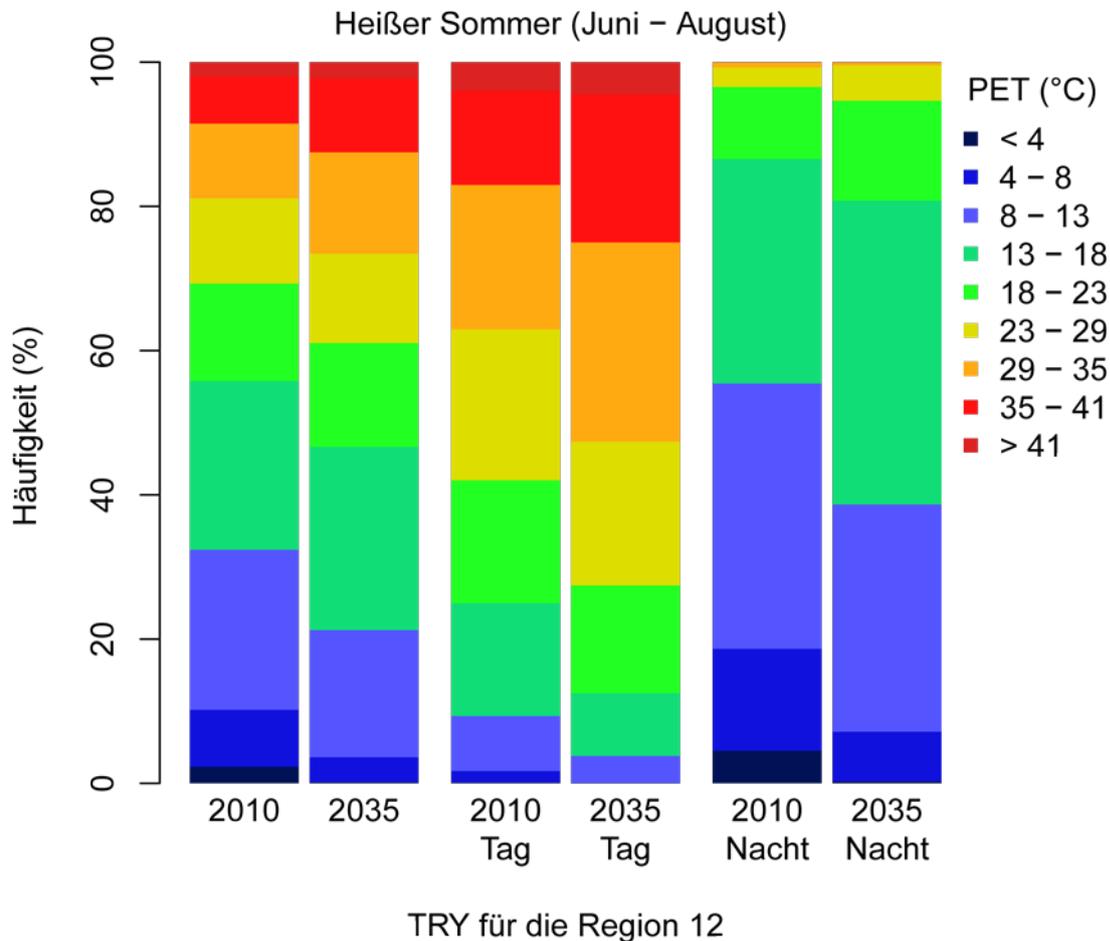


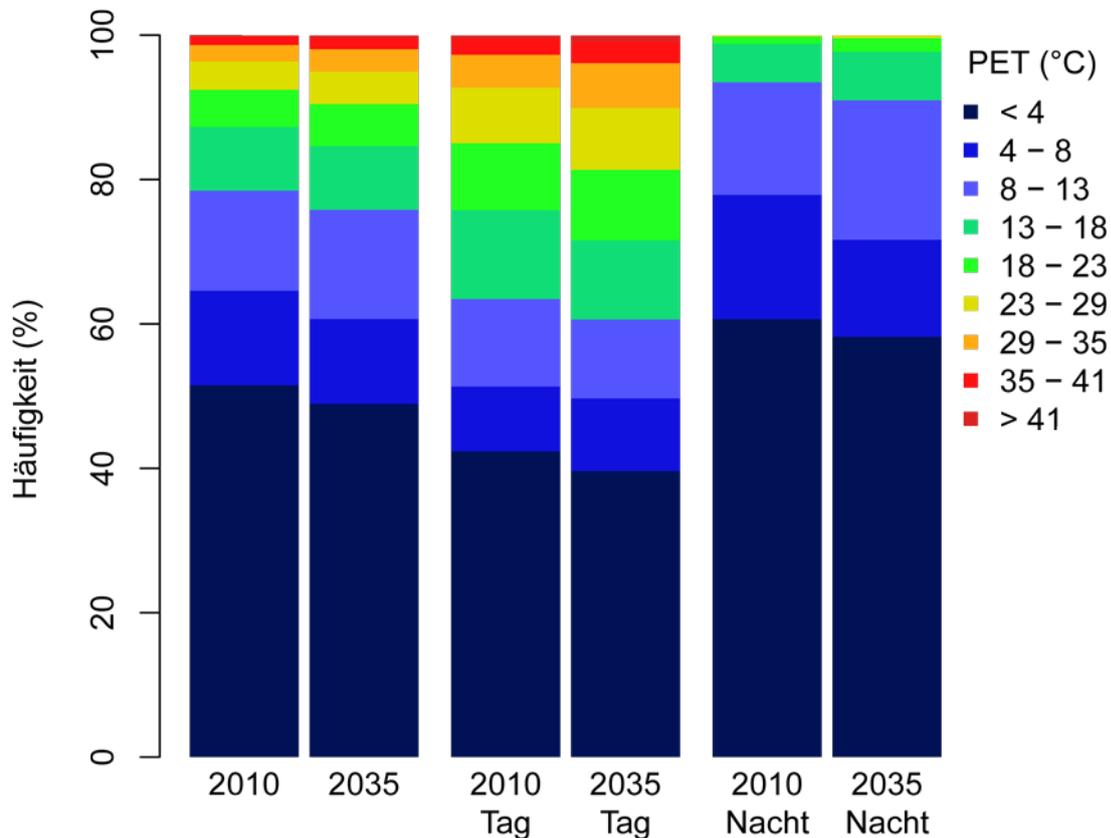
Abb. 2.5: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate (Juni, Juli und August) von „Heißer Sommer“ TRY 2010 und 2035 der Region 12, die die Projektstädte Karlsruhe, Mannheim, Konstanz und Teile des Stadtgebietes der Stadt Freiburg beinhaltet.

Die durchschnittliche Häufigkeit für extremen Hitzestress steigt damit für die Städte Karlsruhe, Mannheim, Freiburg und Konstanz im untersuchten Zeitraum um über vier Stunden im Jahr. Um ein möglichst differenziertes Bild zu erhalten ist es hilfreich, auch für die Sommermonate zwischen Tag- und Nachtstunden zu unterscheiden. Tagstunden sind dabei wieder alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Nachtstunden sind entsprechend 19 bis 24 Uhr, sowie 1 bis 6 Uhr. Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen für die Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2010 gerade einmal 0.1 % aller Tagesstundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.5 Mitte). Sie kommt somit tagsüber fast nicht mehr vor. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist ebenfalls deutlich seltener und deckt gerade noch 1.6 % der Stundenwerte ab. Mit 7.6 % befindet sich auch die Klasse von 8 °C bis 13 °C noch deutlich im einstelligen Bereich. Eine deutlich größere Häufigkeit weist die Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die immerhin 15.7 % der Tagesstunden entfallen. Ein noch größerer Anteil entfällt mit 17.0 % auf die Klasse von 18 °C bis 23 °C. Sie ist damit die viert häufigste Klasse für die Tagstunden. Mit 20.9 % der Stunden ist die Klasse von 23 °C bis 29 °C jedoch noch einmal deutlich häufiger. Sie weist die größte Häufigkeit für die Tagstunden in den Sommermonaten der Ist-Situation in der Region 12 auf. Die Klassen für höhere

PET-Werte weisen wieder sinkende Anteile auf. So betragen die Anteile für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C noch 20.0 % und 13.0 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41$ °C) kommt für die Tagstunden im „Heißer Sommer“ TRY 2010 für die Region 12 auf 4.0 % der Stunden. Bei den Tagesstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY für das Zukunftsszenario der Region 12, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen, verglichen mit der für die Sommermonate des Ist-Szenarios, ebenfalls vor allem im unteren Bereich stark verschoben aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, haben erneut deutliche Anteile auf Kosten der Klassen niedriger PET-Werte hinzugewonnen. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei den Tagesstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2035 nur noch auf weniger als 0.1 %, was einem Rückgang ihres Anteils um 0.1 % entspricht. Sie ist damit für die Tagstunden des Zukunftsszenarios bedeutungslos. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt ebenso deutlich um 1.5 % auf nur noch 0.1 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt die zweit-stärkste Abnahme ihrer Häufigkeit. Sie verliert 3.9 % und kommt damit auf einen Anteil von nur noch 3.7 %. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C verzeichnet den deutlichsten Rückgang. Ihr Anteil fällt um 7.0 % auf nur noch 8.7 %. Auch die beiden nächst höheren Klassen zeigen noch eine Abnahme ihrer Häufigkeit. So fällt der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C um 2.1 % auf 14.9 %, was dem viert-größten Anteil entspricht. Der Anteil der Klasse von 23 °C bis 29 °C fällt ebenfalls noch deutlich um 1.0 % auf 19.6 %. Sie ist somit aber immer noch die dritthäufigste Klasse für die Tagstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2035 der Region 12. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte nehmen ausnahmslos zu. Der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt um 7.6 % auf 27.6 %. Dies entspricht dem größten Anteil für die Tagstunden. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt in ähnlichem Umfang um 7.5 % auf 20.6 %, was dem zweit-höchsten Anteil entspricht. Die Häufigkeit der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt ebenfalls deutlich um 0.5 % an. Ihre Häufigkeit liegt damit bei rund 4.4 %. Dies entspricht ca. 98 Stunden im Jahr. Für die Nachtstunden bietet sich ein etwas anderes Bild (Abb. 2.5 rechts). Für die Nachtstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2010 entfallen so 4.5 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist mit 14.1 % der Nachtstundenwerte schon deutlich häufiger. Den mit deutlichem Abstand größten Anteil von 36.8 % weist die Klasse von 8 °C bis 13 °C aus. Aber auch die Klasse von 13 °C bis 18 °C hat mit 31.2 % noch einen großen Anteil. Einen sehr viel kleineren Anteil von 10.0 % entfällt auf die Klasse von 18 °C bis 23 °C. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur noch sehr geringe Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte abnehmend. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C kommt so immerhin noch auf 2.7 %, während die Klasse von 29 °C bis 35 °C nur noch 0.7 % der Werte repräsentiert. Beide darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von weniger als 0.1 % für die Nachtstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2010 für die Region 12 bedeutungslos. Bei den Nachtstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY des Zukunftsszenarios für die Region 12, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen ebenfalls verschoben aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios jedoch etwas häufiger vor als im Ist-Zustand. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C für die Nachtstunden der Sommermonate im „Heißer Sommer“ TRY 2035 nur noch auf 0.3 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 4.3 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt um 7.2 % auf nur noch 6.9 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt eine etwas geringere Abnahme ihrer Häufigkeit um 5.3 % auf insgesamt 31.5 %. Sie ist damit die zweit häufigste Klasse für die Nachtstunden. Die Anteile aller weiteren Klassen, mit Ausnahme der Klasse von 29 °C bis 35 °C, nehmen zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C sogar um 11.0 %. Damit repräsentiert die Klasse den eindeutig größten Anteil von 42.1 % der Nachtstunden. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt um 3.9 %, womit diese insgesamt auf 13.9 % kommt. Auch die Häufigkeit der Klasse 23 °C bis 29 °C steigt leicht um 2.2 % auf 4.9 %. Die Häufigkeit der Klasse von 29 °C bis 35 °C nimmt dagegen wieder leicht um 0.3 % ab,

wodurch sie nur noch 0.5 % der Nachtstunden repräsentiert. Die Anteile der beiden wärmeren Klassen steigen ebenfalls leicht an. Ihre Häufigkeit bleibt jedoch deutlich unter 0.1 %.

2.1.1.3 ENTWICKLUNG IN DER REGION 13



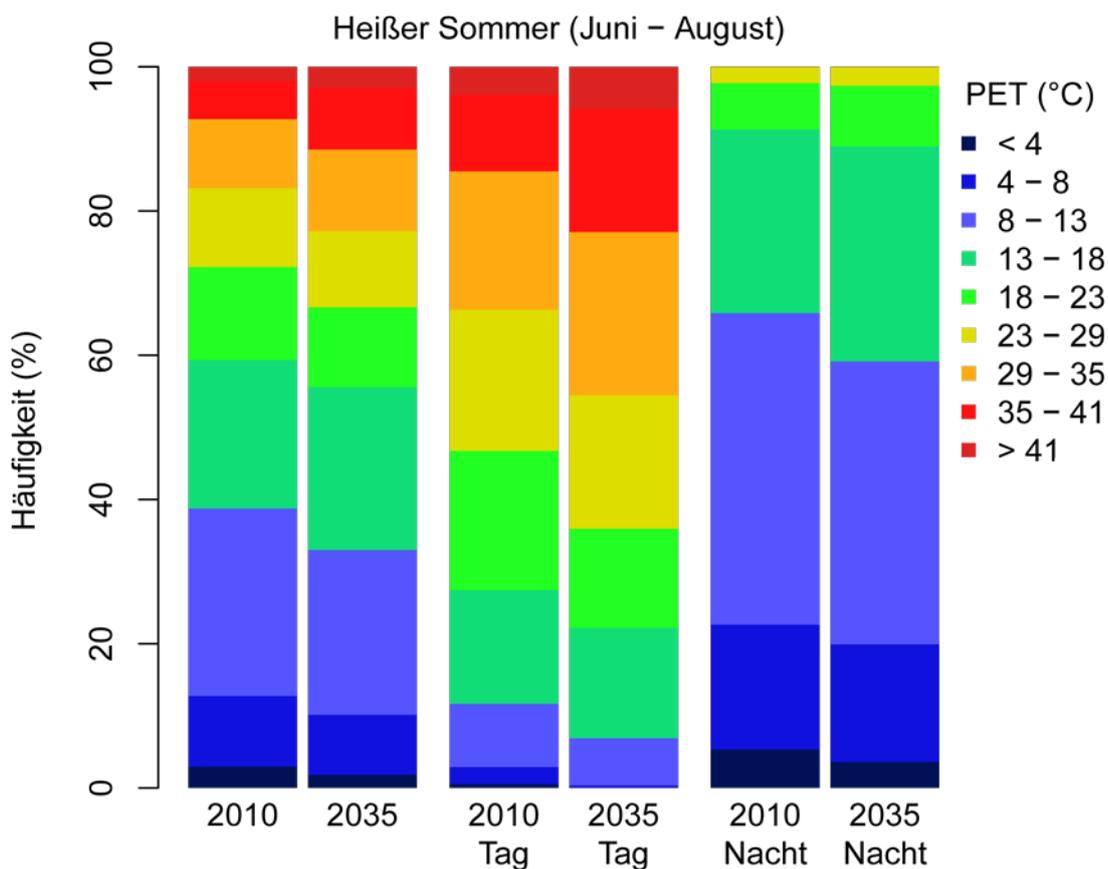
TRY für die Region 13

Abb. 2.6: Vergleich des thermischen Bioklimas von TRY 2010 und TRY 2035 der Region 13, die auch die Projektstadt Ulm umfasst.

Die TRY Region 13 (Schwäbisch fränkisches Stufenland /Alpenvorland) ist insgesamt wieder etwas kühler als die Region 12, jedoch deutlich wärmer als die Region 06. Sie ist für das Projekt von Bedeutung, da sie die Projektstadt Ulm beinhaltet. Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen für das TRY 2010 51.5 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.6 links). Sie kommt damit mit deutlichem Abstand am häufigsten vor. Dies ist wenig verwunderlich, da bei der Betrachtung aller Stunden des ganzen Jahres auch Winter- und Nachtstunden enthalten sind, die eine deutlich niedrigere PET aufweisen. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die dritthäufigste und deckt 13.1 % der Stundenwerte ab. Mit 13.9 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C knapp die zweit häufigste. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte abnehmend. So fallen in den Bereich von 13 °C bis 18 °C 8.8 % der Ergebnisse. Der Anteil für die Klasse von 18 °C bis 23 °C beträgt noch 5.1 %, von 23 °C bis 29 °C nur noch 3.9 %, für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 2.3 % und 1.1 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). Die Klasse mit extremem Hitzestress (PET ≥ 41 °C) kommt im TRY 2010 für die Region 13 in 0.3 % der Stunden vor. Betrachtet man das TRY für das Zukunftsszenario für die Region 13, das TRY 2035, so sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen immer noch ähnlich aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, haben jedoch Anteile auf Kosten der Klassen niedriger PET-Werte hinzugewonnen. So kommt die Klasse für PET

von kleiner als 4 °C im TRY 2035 nur noch auf 48.9 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 2.6 % bedeutet. Sie behält jedoch mit großem Abstand den größten Anteil. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt schwächer um 1.4 % auf dann noch 11.7 %. Die Anteile der höheren PET Klassen zeigen keine Abnahme ihres Anteils mehr. So zeigt die Klasse von 8 °C bis 13 °C eine Zunahme ihrer Häufigkeit um 1.3 % auf 15.1 %, womit sie die zweit-häufigste Klasse bleibt. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C verändert sich dagegen gar nicht und bleibt bei 8.8 %. Der der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt dagegen erneut um 0.7 % auf 5.8 %, der der Klasse von 23 °C bis 29 °C zeigt einen Anstieg in ähnlichem Umfang um 0.6 % auf 4.5 %. Der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C zeigt wieder eine leicht stärkere Zunahme um 0.8 % auf 3.1 % und der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um immer noch 0.4 % auf 1.5 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt ebenfalls leicht um 0.2 % an, womit sie 0.5 % aller Stundenwerte der Region 13 im Zukunftsszenario repräsentiert. Um wieder ein differenzierteres Bild zu erhalten wurde auch für die Region 13 zwischen Tag- und Nachtstunden unterschieden. Tagstunden sind dabei alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Nachtstunden sind entsprechend 19 bis 24 Uhr, sowie 1 bis 6 Uhr. Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen für das TRY 2010 42.4 % aller Tagesstundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.6 Mitte), die damit am häufigsten vorkommt. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C deckt dagegen nur 9.0 % der Stundenwerte ab und ist somit deutlich seltener. Mit 12.1 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die dritthäufigste Klasse der Tagesstundenwerte. Eine noch größere Häufigkeit weist die Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die 12.3 % der Tagesstunden entfallen, was dem zweitgrößten Anteil entspricht. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So deckt die Klasse von 18 °C bis 23 °C nur noch 9.3 % der Tageswerte ab. Der Anteil für die Klasse von 23 °C bis 29 °C beträgt nur noch 7.7 %, der für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C beträgt noch 4.6 % und die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C) kommt auf 2.2 % der Stundenwerte am Tag. 0.5 % der Ergebnisse für die Tagstunden im TRY 2010 für die Region 13 fallen in die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41 \text{ °C}$). Bei den Tagesstunden des TRY für das Zukunftsszenario der Region 13, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen ähnlich aus wie für die des TRY 2010. Sie scheint jedoch leicht in Richtung der wärmeren Klassen verschoben. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei während des Tages des TRY 2035 nur noch auf 39.6 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 2.7 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C steigt dagegen an. Sie nimmt um 1.1 % zu und womit die Klasse auf einen Anteil von 10.0 % kommt. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt wieder eine deutliche Abnahme ihrer Häufigkeit um 1.2 % auf 10.9 %. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C verliert ebenfalls an Häufigkeit. Ihr Anteil geht um 1.3 % auf 11.0 % zurück. Damit bleibt sie jedoch weiterhin die zweit-häufigste Klasse der Tagstunden. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte nehmen ausnahmslos zu. So steigt der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C um 0.5 %, womit der Klasse ein Anteil von 9.7 % erreicht. Der Anteil der Klasse von 23 °C bis 29 °C steigt um 0.9 % auf 8.6 %, der der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 1.6 % auf 6.2 % und der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 0.8 % auf 2.9 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt ebenfalls leicht an (0.4 %). Ihre Häufigkeit liegt damit jedoch nur bei 0.9 %, was für die Region 13 für das Zukunftsszenario ca. 20 Stunden im Jahr mit extremem Hitzestress bedeutet. Für die Nachtstunden bietet sich ein etwas anderes Bild (Abb. 2.6 rechts). Die Verteilung der Ergebnisse für PET ist stark in Richtung der niedrigen Klassen verschoben. Für die Nachtstunden des TRY 2010 der Region 13 entfällt mit 60.6 % die überragende Mehrheit aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die zweit häufigste. Sie deckt jedoch gerade einmal 17.2 % der Nachtstundenwerte ab. Mit 15.6 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die dritt häufigste. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur noch einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So beträgt der Anteil für die Klasse von 13 °C bis 18 °C nur 5.3 %. Die Klasse von 18 °C bis 23 °C deckt bereits nur noch 1.0 % der Nachtstunden ab. Einen noch geringeren Anteil

weist die Klasse von 23 °C bis 29 °C auf, die nur noch 0.2 % der Nachtstunden repräsentiert. Alle darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von weniger als 0.1 % für die Nachtstunden des TRY 2010 für die Region 13 bedeutungslos. Beim TRY des Zukunftsszenarios für die Region 13, des TRY 2035, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen für die Nachtstunden ähnlich aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios jedoch geringfügig häufiger vor als im Ist-Zustand. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im TRY 2035 immer noch auf 58.2 %, was jedoch einen Rückgang ihres Anteils um 2.4 % bedeutet. Auch die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt deutlich um 3.8 % auf insgesamt 13.4 %. Die Anteile aller Klassen für höhere PET-Werte nehmen zu. So steigt der der Klasse von 8 °C bis 13 °C sogar um 3.7 % auf insgesamt 19.3 %, womit die Klasse die zweit häufigste des Zukunftsszenarios ist. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C steigt um 1.4 %. Damit repräsentiert die Klasse jedoch nur 1.9 % der Nachtstunden. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt ebenfalls leicht um 0.3 %, womit diese insgesamt jedoch auf gerade einmal 0.4 % kommt. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C verzeichnet ebenfalls einen Anstieg ihrer Häufigkeit. Dieser ist jedoch so gering, dass die Klasse schließlich weniger als 0.1 % der Nachtstunden repräsentiert. Damit ist sie, wie alle höheren Klassen deren Anteile deutlich unter 0.1 % bleiben, für die Nachtstunden der Region 13 bedeutungslos.



TRY für die Region 13

Abb. 2.7: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate (Juni, Juli und August) von „Heißer Sommer“ TRY 2010 und 2035 der Region 12, der Region 13, die auch die Projektstadt Ulm umfasst.

Die Zeit der größten Relevanz der Vermeidung thermischen Stresses, die Sommermonate, sollen hier wieder getrennt betrachtet werden. In den Sommermonaten (Juni, Juli und August) des Sommer TRYs 2010 für die Region 13, entfallen nur 2.9 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (Abb. 2.7 links). Die Klasse von 4 °C bis 8 °C deckt einen etwas größeren Bereich von 9.8 % der Stundenwerte ab. Mit 26.0 % ist die

Klasse von 8 °C bis 13 °C die häufigste. Einen etwas kleineren Anteil deckt die Klasse von 13 °C bis 18 °C ab, die 20.6 % der Stundenmittel repräsentiert.

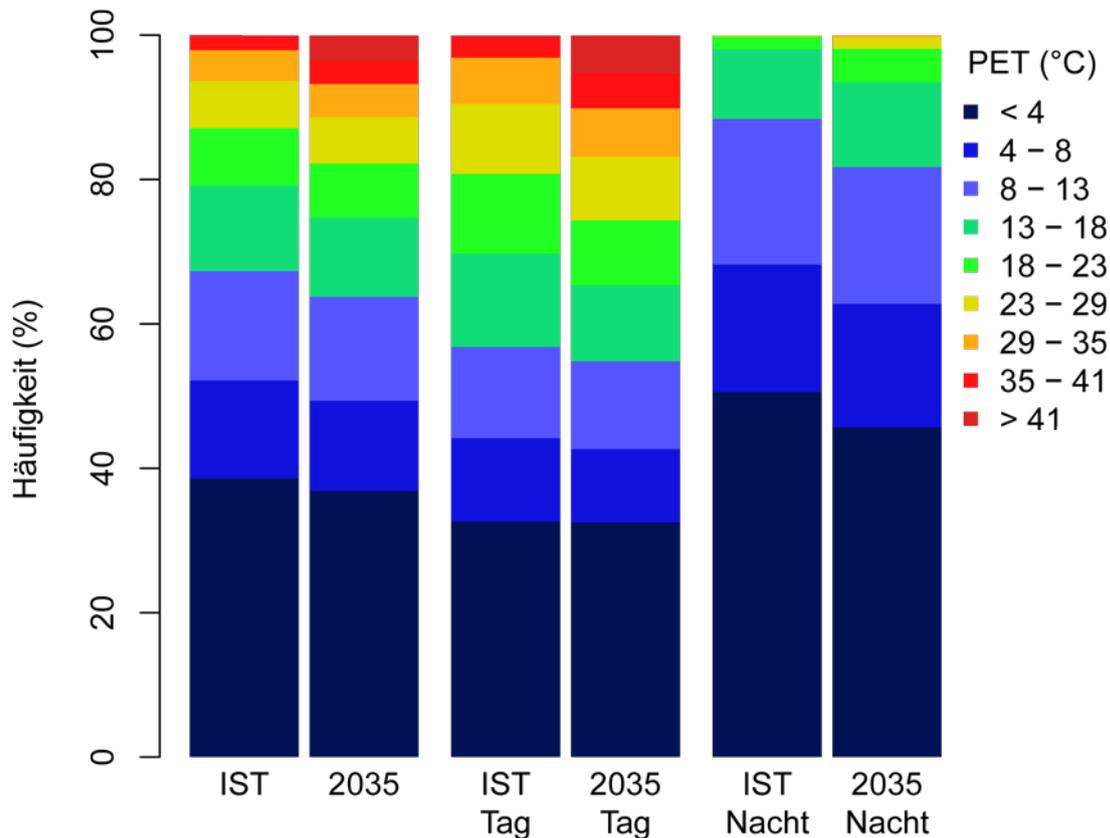
Sie ist damit die zweit häufigste Klasse der Sommermonate des Ist-Zustands. Der Anteil für die Klasse von 18 °C bis 23 °C ist mit 12.9 % deutlich kleiner. Der der Klasse von 23 °C bis 29 °C beträgt immer noch 10.9 %, für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 9.6 % und 5.3 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41$ °C) kommt in den Sommermonaten des Sommer TRY 2010 für die Region 13 in 1.9 % der Stunden vor. Betrachtet man die Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY für das Zukunftsszenario der Region 13, erscheint die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen insgesamt deutlich in Richtung der höheren Klassen verschoben. Die Änderungen scheinen sich dabei gleichmäßig über die gesamte Verteilung zu erstrecken. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C in den Sommermonaten des „Heißer Sommer“ TRY 2035 gerade einmal auf 1.8 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 1.1 % bedeutet. PET fällt damit in diesem Zeitraum durchschnittlich nur noch für 40 Stunden unter 4 °C. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt ebenfalls deutlich um 1.5 % auf immerhin noch 8.3 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt die stärkste Abnahme ihrer Häufigkeit von 3.1 % auf immer noch 22.9 %. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C steigt dagegen um 1.9 % auf 22.6 %. Die Klasse ist damit ganz knapp die zweit häufigste hinter der Klasse von 8 °C bis 13 °C. Die Häufigkeit der Klasse von 18 °C bis 23 °C geht wiederum um 1.8 % auf 11.1 % zurück. Auch der Anteil der Klasse von 23 °C bis 29 °C reduziert sich um 0.4 % auf 10.6 %. Die Klasse von 29 °C bis 35 °C verzeichnet dagegen wieder eine Zunahme um 1.7 % auf 11.3 %. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt sogar um 3.2 % auf 8.5 %. Auch der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt deutlich an. Ihre Häufigkeit nimmt um 1.0 % zu und liegt für die Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2035 der Region 13 bei 2.9 %. Die durchschnittliche Häufigkeit für extremen Hitzestress steigt damit für die Projektstadt Ulm im untersuchten Zeitraum um über 22 Stunden im Jahr. Um ein möglichst differenziertes Bild zu erhalten ist es hilfreich, auch für die Sommermonate zwischen Tag- und Nachtstunden zu unterscheiden. Tagstunden sind dabei wieder alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Nachtstunden sind entsprechend 19 bis 24 Uhr, sowie 1 bis 6 Uhr. Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen für die Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2010 gerade einmal 0.5 % aller Tagesstundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.7 Mitte). Sie kommt somit tagsüber fast nicht mehr vor. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist ebenfalls deutlich seltener als für den gesamten Tag und deckt gerade noch 2.4 % der Stundenwerte ab. Mit 8.8 % befindet sich auch die Klasse von 8 °C bis 13 °C noch deutlich im einstelligen Bereich. Eine deutlich größere Häufigkeit weist die Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die immerhin 15.8 % der Tagesstunden entfallen. Ein noch größerer Anteil entfällt mit 19.3 % auf die Klasse von 18 °C bis 23 °C. Sie ist damit knapp die zweit häufigste Klasse für die Tagstunden. Mit 19.6 % der Stunden ist die Klasse von 23 °C bis 29 °C jedoch noch etwas häufiger. Sie weist somit die größte Häufigkeit für die Tagstunden in den Sommermonaten der Ist-Situation in der Region 13 auf. Die Klassen für höhere PET-Werte weisen wieder sinkende Anteile auf. So betragen die Anteile für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C immerhin noch 19.2 %, womit die Klasse die dritthäufigste der Verteilung für die Tagstunden des Ist-Zustands ist und 10.6 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41$ °C) kommt für die Tagstunden im „Heißer Sommer“ TRY 2010 für die Region 13 auf 3.9 % der Stunden. Bei den Tagesstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY für das Zukunftsszenario der Region 13, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen, verglichen mit der für die Sommermonate des Ist-Szenarios, ebenfalls gleichmäßig nach oben verschoben aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, haben erneut deutliche Anteile auf Kosten der Klassen niedriger PET-Werte hinzugewonnen. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei den Tagesstunden der Sommermonate des „Heißer Som-

mer“ TRY 2035 nur noch auf weniger als 0.1 %, was einem Rückgang ihres Anteils um 0.5 % entspricht. Sie ist damit für die Tagstunden des Zukunftsszenarios bedeutungslos. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt ebenso deutlich um 2.0 % auf nur noch 0.4 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt die zweit-stärkste Abnahme ihrer Häufigkeit. Sie verliert 2.3 % und kommt damit auf einen Anteil von nur noch 6.5 %. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C verzeichnet einen geringeren Rückgang. Ihr Anteil fällt nur um 0.5 % auf nur noch 15.3 %. Auch die beiden nächst höheren Klassen zeigen noch eine Abnahme ihrer Häufigkeit. So fällt der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C um 5.5 % auf 13.8 %, was dem größten Rückgang des Anteils entspricht. Der Anteil der Klasse von 23 °C bis 29 °C fällt ebenfalls noch deutlich um 1.1 % auf 18.5 %. Sie ist somit aber immer noch die zweit häufigste Klasse für die Tagstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2035 der Region 13. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte nehmen ausnahmslos zu. Der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt um 3.4 % auf 22.6 %. Dies entspricht dem größten Anteil für die Tagstunden. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt in doppelt so großem Umfang um 6.4 % auf 17.0 %, was dem dritt-höchsten Anteil entspricht. Die Häufigkeit der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt ebenfalls deutlich um 2.0 % an. Ihre Häufigkeit liegt damit bei rund 5.9 %. Dies entspricht ca. 130 Stunden im Jahr. Für die Nachtstunden bietet sich ein etwas anderes Bild (Abb. 2.7 rechts). Die Verteilung der Ergebnisse für PET ist stark in Richtung der niedrigen Klassen verschoben. Für die Nachtstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2010 entfallen so 5.3 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4°C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist mit 17.3 % der Nachtstundenwerte schon deutlich häufiger. Den mit deutlichem Abstand größten Anteil von 43.2 % weist die Klasse von 8 °C bis 13 °C aus. Aber auch die Klasse von 13 °C bis 18 °C hat mit 25.5 % noch einen großen Anteil. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur noch sehr geringe Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte abnehmend. So entfällt auf die Klasse von 18 °C bis 23 °C nur ein Anteil von 6.4 %. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C kommt sogar nur noch auf 2.3 %. Alle darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von weniger als 0.1 % für die Nachtstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY 2010 für die Region 13 bedeutungslos. Bei den Nachtstunden der Sommermonate des „Heißer Sommer“ TRY des Zukunftsszenarios für die Region 13, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen ebenfalls verschoben aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios jedoch etwas häufiger vor als im Ist-Zustand. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C für die Nachtstunden der Sommermonate im „Heißer Sommer“ TRY 2035 nur noch auf 3.6 %, was einen leichten Rückgang ihres Anteils um 1.7 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt um 1.0 % auf noch 16.3 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt eine sehr viel deutlichere Abnahme ihrer Häufigkeit um 4.0 % auf insgesamt 39.2 %. Sie ist damit jedoch immer noch mit deutlichem Abstand die häufigste Klasse für die Nachtstunden. Die Anteile aller weiteren Klassen nehmen ausnahmslos zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C sogar um 4.3 %. Damit repräsentiert die Klasse den zweitgrößten Anteil von 29.8 % der Nachtstunden. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt zwar ebenfalls um 2.0 %, sie kommt damit jedoch insgesamt nur auf einen einstelligen Anteil von 8.4 %. Auch die Häufigkeit der Klasse 23 °C bis 29 °C steigt leicht um 0.4 % auf 2.6 %. Die Anteile aller wärmeren Klassen steigen ebenfalls leicht an. Ihre Häufigkeit bleibt jedoch deutlich unter 0.1 %.

2.1.2 ENTWICKLUNG DES THERMISCHEN BIOKLIMAS IN KARLSRUHE

Die Stadt Karlsruhe ist entsprechend ihrer Lage der TRY Region 12 (Oberrheingraben und unteres Neckartal) zuzuordnen. Entsprechend wurden die Änderungen der Region 12 in die Messdaten der Station Karlsruhe eingerechnet und die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) errechnet, die der ursprünglichen Verteilung (IST) gegenübergestellt wurde. In der ursprünglichen Verteilung entfallen dabei 38.6 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.8 links). Sie ist somit die häufigste der Verteilung. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die dritthäufigste und deckt 13.6 % der Stundenwerte ab.

Mit 15.1 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. In den Bereich von 13 °C bis 18 °C fallen immerhin noch 11.9 % der Ergebnisse.



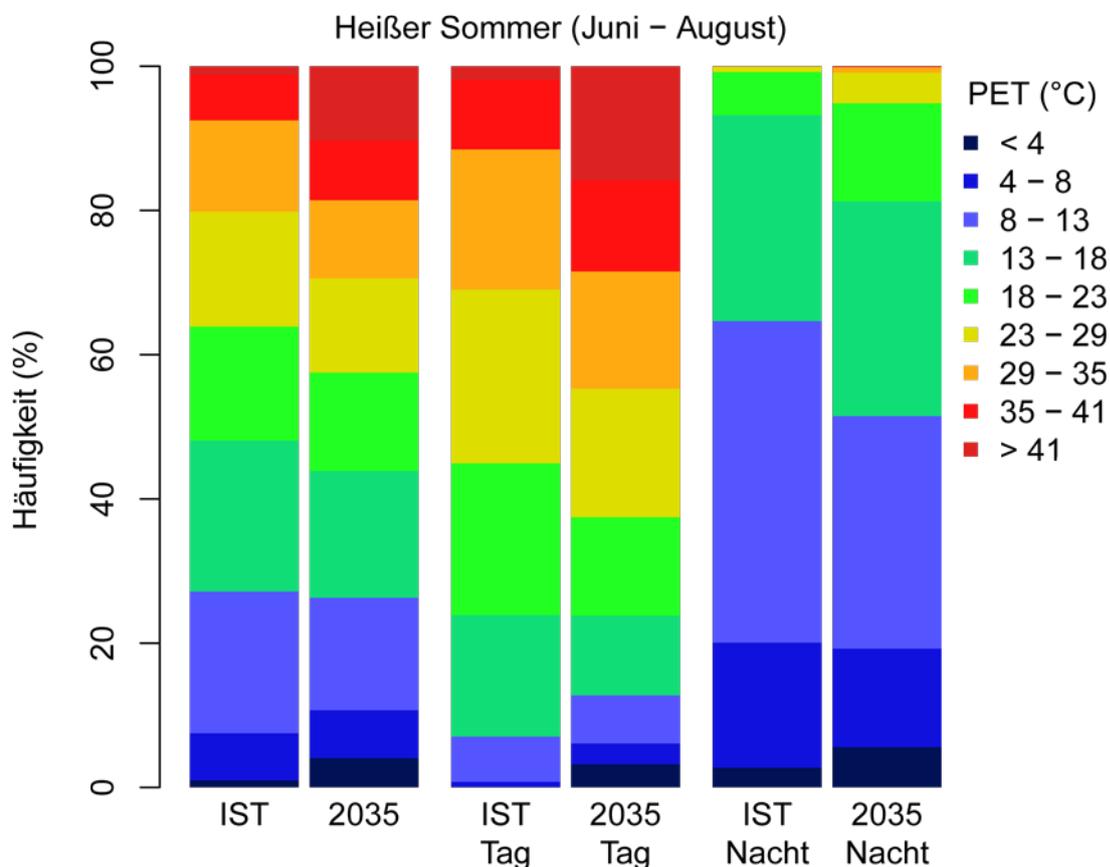
Entwicklung in Karlsruhe auf Grundlage von TRY12

Abb. 2.8: Vergleich des thermischen Bioklimas des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035.

Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse von 18 °C bis 23 °C 7.9 %, von 23 °C bis 29 °C nur noch 6.5 %, für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 4.3 % und 1.8 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). Die Klasse mit extremem Hitzestress (PET ≥ 41 °C) kommt im Ist-Zustand für Karlsruhe in 0.3 % der Stunden vor. Dies sind ca. 26 Stunden im Jahr. Betrachtet man das Zukunftsszenario für Karlsruhe, das eine mittlere Situation für 2035 zeigt, so sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen immer noch ähnlich aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, haben jedoch Anteile auf Kosten der Klassen niedriger PET-Werte hinzugewonnen. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im Zukunftsszenario nur noch auf 36.9 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 1.7 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt schwächer um 1.1 % auf dann noch 12.5 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt eine noch leichtere Abnahme ihrer Häufigkeit um nur 0.7 % auf 14.4 %. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C nimmt wieder etwas stärker um 0.9 % ab und verbleibt schließlich bei 11.0 %. Der der Klasse 18 °C bis 23 °C fällt dagegen wieder schwächer um 0.4 % auf 7.5 %, während der der Klasse von 23 °C bis 29 °C um 0.1 % auf 6.4 % zurück geht. Die Anteile der höheren PET Klassen

sind ausnahmslos zunehmend. So steigt die Häufigkeit der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 0.3 % auf 4.6 % und die der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 1.5 % auf 3.3 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt sogar deutlich stärker um 3.2 % an, womit sie 3.5 % aller Stundenwerte des Zukunftsszenarios für Karlsruhe repräsentiert. Dies bedeutet für ein Jahr der Periode 2021 bis 2050 in Karlsruhe durchschnittlich 306 Stunden mit extremem Hitzestress. Um wieder ein differenzierteres Bild zu erhalten wurde auch für einzelne Städte zwischen Tag- und Nachtstunden unterschieden. Tagstunden sind dabei wieder alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Nachtstunden sind entsprechend 19 bis 24 Uhr, sowie 1 bis 6 Uhr. Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen im Ist-Zustand, der aus den Messdaten besteht, 32.6 % aller Tagesstundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.8 Mitte), die damit weiterhin am häufigsten vorkommt. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die viert häufigste und deckt 11.5 % der Stundenwerte ab. Mit 12.6 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die dritthäufigste Klasse der Tagesstundenwerte. Eine noch größere Häufigkeit weist die Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die 13.0 % der Tagesstunden entfallen, was dem zweitgrößten Anteil entspricht. Die Klasse von 18 °C bis 23 °C deckt 11.0 % der Tageswerte ab. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse von 23 °C bis 29 °C noch 9.7 %, für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 6.4 % und nur noch 2.4 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). 0.5 % der Ergebnisse für die Tagstunden im Ist-Zustand für Karlsruhe fallen in die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41$ °C). Bei den Tagesstunden des Zukunftsszenarios für Karlsruhe sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen im unteren Bereich immer noch ähnlich aus wie für die des Ist-Zustands. Im oberen Bereich ist sie jedoch deutlich in Richtung der wärmeren Klassen verschoben. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C tagsüber weiterhin auf 32.5 %, was einen Rückgang ihres Anteils um lediglich 0.1 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt deutlich stärker. Sie geht um 1.4 % auf 10.2 % zurück. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt wieder eine schwächere Abnahme ihrer Häufigkeit um 0.5 % auf 12.2 %. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C verliert ebenfalls an Häufigkeit. Ihr Anteil geht sogar um 2.4 % auf 10.6 % zurück. Der der Klasse 18 °C bis 23 °C geht fast genauso stark um 2.1 % auf 8.9 % zurück. Der Anteil der Klasse von 23 °C bis 29 °C fällt ebenfalls etwas leichter um 0.9 % auf 8.8 %. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte nehmen ausnahmslos zu. So steigt die der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 0.3 % auf 6.7 % und der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 2.2 % auf 4.9 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt ebenfalls. Ihr Anteil nimmt sogar um 4.8 % zu. Ihre Häufigkeit liegt damit bei 5.3 %, was ca. 232 Stunden im Jahr mit extremem Hitzestress bedeutet. Für die Nachtstunden bietet sich ein etwas anderes Bild (Abb. 2.8 rechts). Die Verteilung der Ergebnisse für PET ist stark in Richtung der niedrigen Klassen verschoben. Für die Nachtstunden des Ist-Zustands für Karlsruhe entfallen so 50.6 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist nur die dritthäufigste und deckt 17.7 % der Nachtstundenwerte ab. Mit 20.2 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur noch einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So beträgt der Anteil für die Klasse von 13 °C bis 18 °C nur 9.6 %. Die Klasse von 18 °C bis 23 °C deckt 1.7 % der Nachtstunden ab. Einen noch geringeren Anteil weist die Klasse von 23 °C bis 29 °C auf, die nur 0.2 % der Nachtstunden repräsentiert. Alle darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von weniger als 0.1 % für die Nachtstunden des Ist-Zustands für Karlsruhe bedeutungslos. Beim Zukunftsszenario für Karlsruhe sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen für die Nachtstunden ähnlich aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios jedoch etwas häufiger vor als im Ist-Zustand. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im Zeitraum von 2021 bis 2050 immer noch auf 45.7 %, was jedoch einen deutlichen Rückgang ihres Anteils um 4.9 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt nur schwach um 0.6 % auf insgesamt 17.1 %. Einen stärkeren Rückgang verzeich-

net die Klasse von 8 °C bis 13°C, deren Häufigkeit um 1.2 % auf insgesamt 18.9 % zurückgeht. Die Anteile aller Klassen für höhere PET-Werte nehmen zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C um 2.1 %. Damit repräsentiert die Klasse 11.8 % der Nachtstunden. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt sogar um 2.9 %, womit diese insgesamt jedoch auf gerade einmal 4.6 % kommt. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C verzeichnet ebenfalls einen Anstieg ihrer Häufigkeit. Dieser ist jedoch mit 0.2 % relativ gering, wodurch die Klasse schließlich gerade einmal 1.6 % der Nachtstunden repräsentiert. Der Anteil der nächsthöheren Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt um 0.2 %. Da ihr Anteil für das Ist-Szenario deutlich unter 0.1 % lag, kommt sie im Zukunftsszenario trotzdem nur auf 0.3 % der Nachtstunden. Alle Anteile wärmerer Klassen steigen ebenfalls leicht an. Ihre Häufigkeit bleibt jedoch deutlich unter 0.1 %.



Entwicklung in Karlsruhe auf Grundlage von TRY12

Abb. 2.9: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate Juni, Juli und August des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus „Heißer Sommer“ TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035.

Die Zeit der größten Relevanz der Vermeidung thermischen Stresses, die Sommermonate, sollen hier wieder getrennt betrachtet werden. Hierfür wurde ein durch die Differenz der „Heißer Sommer“ TRYs für 2035 und 2010 modifizierter Ausgangsdatsatz dem unveränderten gegenübergestellt (Abb. 2.9 links). In den Sommermonaten (Juni, Juli und August) des unveränderten Datensatzes entfallen nur 1.0 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C deckt einen etwas größeren Bereich von 6.5 % der Stundenwerte ab. Mit 19.6 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. Einen noch größeren Anteil deckt die Klasse von 13 °C bis 18 °C ab, die 20.9 % der Stundenmittel repräsentiert. Sie ist damit die

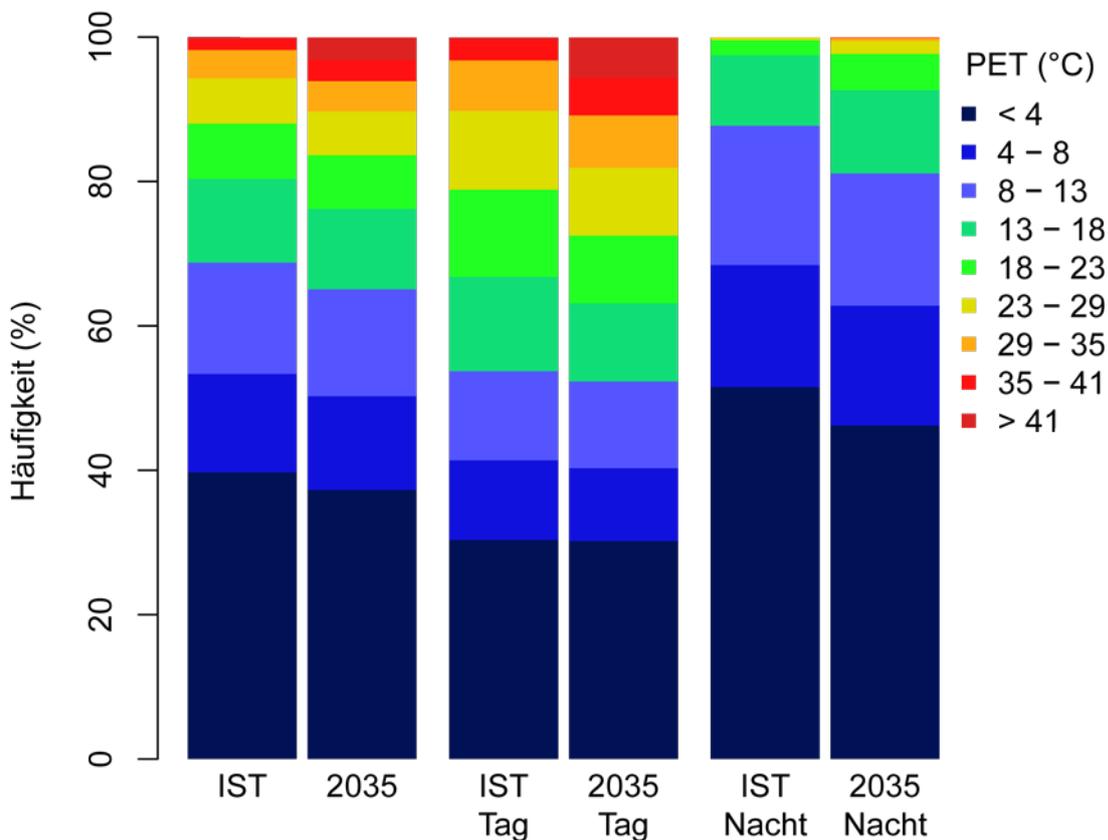
häufigste Klasse der Sommermonate des Ist-Zustands. Der Anteil für die Klasse von 18 °C bis 23 °C ist mit 15.8 % nur sehr wenig kleiner als der für die Klasse von 23 °C bis 29 °C, der 15.9 % beträgt. Der Anteil der Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C ist mit 12.7 % immer noch relativ groß, während der der Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C) mit 6.3 % schon deutlich einstellig ist. Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41$ °C) kommt in den Sommermonaten des unveränderten Datensatzes für Karlsruhe in nur 1.2 % der Stunden vor. Betrachtet man die Sommermonate des durch die „Heißer Sommer“ TRYs modifizierten Datensatzes für Karlsruhe, erscheint die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen stark in Richtung der extremeren Klassen verschoben. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C in den Sommermonaten des Zukunftsszenarios deutlich öfter vor. Sie erreicht einen Anteil von 4.1 %, was einen starken Anstieg ihres Anteils um 3.1 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C liegt konstant bei 6.6 % und verändert ihre Häufigkeit dagegen kaum. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt dagegen eine starke Abnahme ihrer Häufigkeit von 4.0 % auf nur noch 15.6 %. Auch die Anteile der anderen Klassen in der Mitte der Verteilung nehmen ausnahmslos ab. So fällt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C um 3.3 % auf 17.6 %, der der Klasse 18 °C bis 23 °C um 2.2 % auf 13.6 %, der der Klasse von 23 °C bis 29 °C um 2.9 % auf 13.1 % und der der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 1.8 % auf 10.8 %. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt dagegen um 2.0 % auf 8.3 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt sehr stark an. Ihre Häufigkeit nimmt am stärksten unter allen Klassen um 9.1 % zu und liegt für die Sommermonate des um die Differenz der „Heißer Sommer“ TRYs modifizierten Datensatzes für Karlsruhe bei 10.3 %. Ihr Anteil ist damit zweistellig. Um ein möglichst differenziertes Bild zu erhalten ist es hilfreich, auch für die Betrachtung der Sommermonate zwischen Tag- und Nachtstunden zu unterscheiden. Analog zur Aufstellung der Änderungen der TRYs sind Tagstunden alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Nachtstunden sind entsprechend 19 bis 24 Uhr, sowie 1 bis 6 Uhr. Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen für die Sommermonate des ursprünglichen Datensatzes für Karlsruhe gerade einmal 0.1 % aller Tagesstundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.9 Mitte). Sie kommt somit tagsüber fast nicht mehr vor. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist ebenfalls deutlich seltener als in der Betrachtung für alle Stunden und deckt gerade noch 0.7 % der Tagstundenwerte ab. Mit 6.3 % befindet sich auch die Klasse von 8 °C bis 13 °C noch deutlich im einstelligen Bereich. Eine deutlich größere Häufigkeit weist die Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die immerhin 16.8 % der Tagesstunden entfallen. Ein noch größerer Anteil entfällt mit 21.1 % auf die Klasse von 18 °C bis 23 °C. Sie ist damit die zweit häufigste Klasse für die Tagstunden. Mit 24.1 % der Stunden ist die Klasse von 23 °C bis 29 °C jedoch noch einmal deutlich häufiger. Sie weist die größte Häufigkeit für die Tagstunden in den Sommermonaten der Ist-Situation in Karlsruhe auf. Die Klassen für höhere PET-Werte weisen niedrigere Anteile auf. So betragen die Anteile für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C noch 16.3 %. 9.6 % der Tagstunden weisen starken Hitzestress (35 °C bis 41 °C) auf. Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41$ °C) kommt für die Tagstunden in den Sommermonaten des Karlsruher Ist-Zustands auf 1.9 % der Stunden. Bei den Tagesstunden der Sommermonate des entsprechend der „Heißer Sommer“ TRY für die Region 12 modifizierten Datensatzes für Karlsruhe, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen, verglichen mit der für die Sommermonate des Ist-Szenarios, ebenfalls vor allem im oberen und unteren Bereich stark verändert aus. Extremere Klassen, die sehr hohe, oder sehr niedrige PET-Werte repräsentieren, haben erneut deutliche Anteile auf Kosten der Klassen gemäßigerer PET-Werte hinzugewonnen. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C während der Sommermonate tagsüber im modifizierten Datensatz auf über 3.2 %, was einer starken Zunahme ihres Anteils um 3.2 % entspricht. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C steigt ebenso deutlich um 2.1 % auf 2.9 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt dagegen nur noch eine schwache Zunahme ihrer Häufigkeit. Diese steigt um 0.4 % womit die Klasse auf einen Anteil von 6.7 % kommt. Alle Klassen in der Mitte der Verteilung zeigen dagegen rückläufige Häufigkeiten. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C verzeichnet dabei einen deutlichen Rückgang um

5.8 % auf nur noch 11.0 %. Noch deutlicher fällt der Anteil der nächsthöheren Klasse. So fällt der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C sogar um 7.4 % auf 13.6 %, was nur noch dem viert-größten Anteil entspricht. Der Anteil der Klasse von 23 °C bis 29 °C fällt ebenfalls noch deutlich um 6.3 % auf 17.8 %. Sie ist somit aber trotzdem die häufigste Klasse für die Tagstunden der Sommermonate des entsprechend der „Heißer Sommer“ TRYs der Region 12 modifizierten Datensatzes für Karlsruhe. Der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C sinkt ebenfalls, jedoch deutlich schwächer um 3.2 % auf 16.3 %. Dies entspricht dem zweitgrößten Anteil für die Tagstunden. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte nehmen ausnahmslos zu. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt um 3.0 % auf 12.6 %. Die Häufigkeit der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt jedoch extrem um 14.0 % an. Ihre Häufigkeit liegt damit bei rund 15.8 %. Dies entspricht dem drittgrößten Anteil der Verteilung. Für die Nachtstunden bietet sich ein etwas anderes Bild (Abb. 2.9 rechts). Die Verteilung der Ergebnisse für PET ist stark in Richtung der niedrigen Klassen verschoben. Trotzdem haben auch heiße Klassen Anteile hinzugewonnen. Für die Nachtstunden der Sommermonate des unveränderten Datensatzes für Karlsruhe (Ist-Zustand) entfallen so nur 2.1 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4°C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist mit 17.3 % der Nachtstundenwerte schon deutlich häufiger. Den mit deutlichem Abstand größten Anteil von 44.6 % weist die Klasse von 8 °C bis 13 °C aus. Aber auch die Klasse von 13 °C bis 18 °C hat mit 28.5 % noch einen großen Anteil. Einen sehr viel kleineren Anteil von 6.0 % entfällt auf die Klasse von 18 °C bis 23°C. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur noch sehr geringe Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte abnehmend. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C kommt so immerhin noch auf 0.7 %, während die Klasse von 29 °C bis 35 °C nur noch 0.1 % der Werte repräsentiert. Beide darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von weniger als 0.1 % für die Nachtstunden der Sommermonate des Ist-Zustandes für Karlsruhe bedeutungslos. Bei den Nachtstunden der Sommermonate des entsprechend der „Heißer Sommer“ TRYs modifizierten Datensatzes (des Zukunftsszenarios) für Karlsruhe, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen ebenfalls deutlich extremer aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios deutlich häufiger vor als im Ist-Zustand. Aber auch die Klassen mit sehr niedrigen PET-Werten konnten ihren Anteil vergrößern. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C für die Nachtstunden der Sommermonate des modifizierten Datensatzes für Karlsruhe auf 5.6 %, was einen deutlichen Anstieg ihrer Häufigkeit um 2.9 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt, wie die für alle Klassen des unteren mittleren Bereichs der Verteilung, deutlich um 3.7 % auf nur noch 13.7 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt jedoch eine weit größere Abnahme ihrer Häufigkeit. Sie verliert sogar 12.4 % und kommt so insgesamt nur noch auf 32.2 %. Sie ist damit jedoch immer noch die häufigste Klasse für die Nachtstunden. Die Anteile aller höheren Klassen nehmen wieder zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C um 1.3 %. Damit repräsentiert die Klasse 29.8 % der Nachtstunden, was dem zweitgrößten Anteil entspricht. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt sehr viel stärker um 7.6 %, womit diese insgesamt auf 13.6 % kommt. Auch die Häufigkeit der Klasse 23 °C bis 29 °C steigt noch deutlich um 3.5 % auf 4.3 %. Die Häufigkeit der Klasse von 29 °C bis 35 °C nimmt ebenfalls leicht um 0.7 % zu, wodurch sie insgesamt 0.7 % der Nachtstunden repräsentiert. Die Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt ebenfalls leicht um 0.1 % an. Da sie im Ist-Zustand weit unter 0.1 % der Nachtstunden repräsentiert, entspricht dies auch ihrem Anteil im Zukunftsszenario. Der Anteil der Klasse mit extremem Hitzestress steigt ebenfalls leicht an. Ihre Häufigkeit bleibt jedoch deutlich unter 0.1 %.

2.1.3 ENTWICKLUNG DES THERMISCHEN BIOKLIMAS IN MANNHEIM

Die Stadt Mannheim ist entsprechend ihrer Lage der TRY Region 12 (Oberrheingraben und unteres Neckartal) zuzuordnen. Entsprechend wurden die Änderungen der Region 12 in die Messdaten der Station Mannheim eingerechnet und die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) errechnet, die der ursprünglichen Verteilung (IST) gegenübergestellt wurde. In der ursprünglichen Verteilung entfallen dabei

39.7 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.10 links). Sie ist somit die häufigste der Verteilung. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die dritthäufigste und deckt 13.6 % der Stundenwerte ab. Mit 15.4 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. In den Bereich von 13 °C bis 18 °C fallen immerhin noch 11.6 % der Ergebnisse. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse von 18 °C bis 23 °C 7.6 %, von 23 °C bis 29 °C nur noch 6.3 %, für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 3.9 % und 1.5 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). Die Klasse mit extremem Hitzestress (PET ≥ 41 °C) kommt im Ist-Zustand für Mannheim in 0.2 % der Stunden vor. Dies sind ca. 17 Stunden im Jahr. Betrachtet man das Zukunftsszenario für Mannheim, das eine mittlere Situation für 2035 zeigt, so sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen etwas verändert aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, haben Anteile auf Kosten der Klassen niedriger PET-Werte hinzugewonnen. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im Zukunftsszenario nur noch auf 37.3 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 2.4 % bedeutet.



Entwicklung in Mannheim auf Grundlage von TRY12

Abb. 2.10: Vergleich des thermischen Bioklimas des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035.

Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt schwächer deutlich um 0.7 % auf dann noch 13.0 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt eine noch leichtere Abnahme ihrer Häufigkeit um nur 0.6 % auf 14.8 %. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C nimmt noch etwas schwächer um 0.5 % ab und verbleibt schließlich bei 11.1 %. Der der Klasse 18 °C bis 23 °C fällt wieder schwächer um 0.2 % auf 7.4 %, während der der Klasse von 23 °C bis 29 °C im selben Umfang auf 6.0 % zurückgeht. Der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt um 0.3 % auf 4.2 % und der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 1.4 % auf

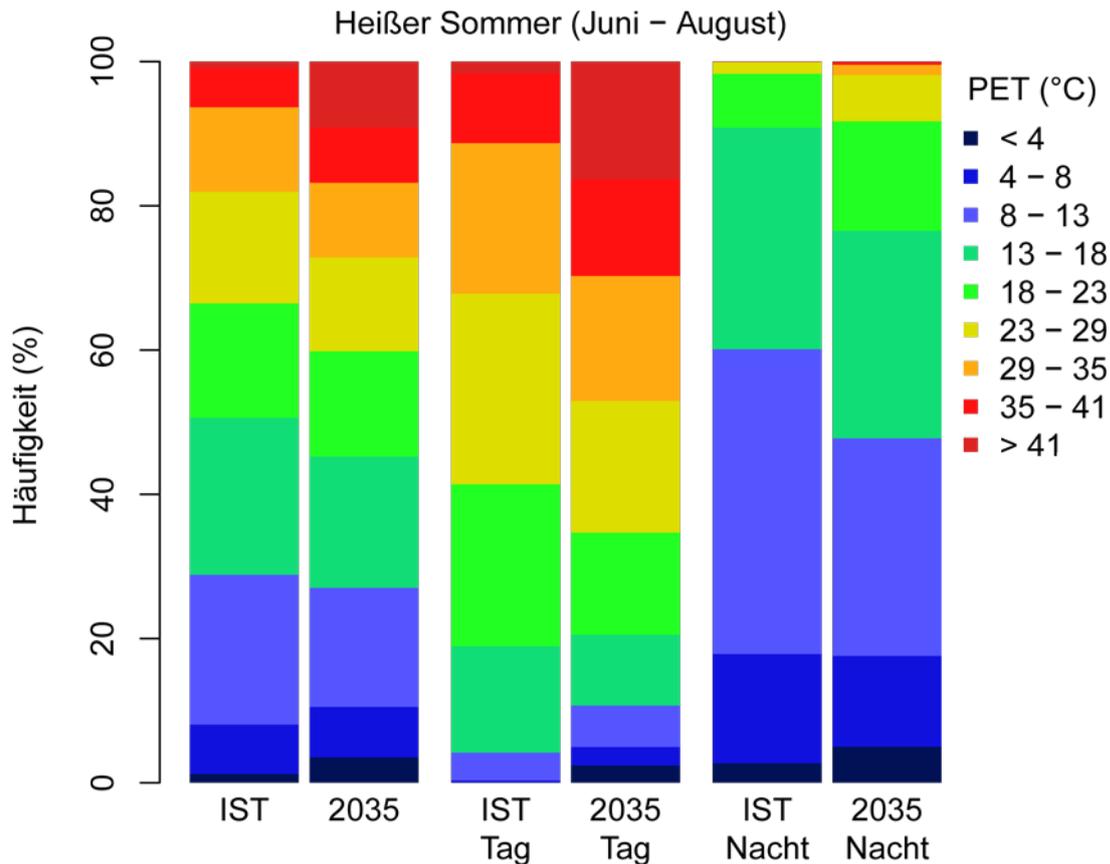
2.9 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt deutlich stärker um 2.9 % an, womit sie 3.2 % aller Stundenwerte des Zukunftsszenarios für Mannheim repräsentiert. Dies bedeutet für ein Jahr der Periode 2021 bis 2050 in Mannheim durchschnittlich 280 Stunden mit extremem Hitzestress und somit etwas weniger als in Karlsruhe.

Um wieder ein differenzierteres Bild zu erhalten wurde auch für einzelne Städte zwischen Tag- und Nachtstunden unterschieden. Tagstunden sind dabei wieder alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Nachtstunden sind entsprechend 19 bis 24 Uhr, sowie 1 bis 6 Uhr.

Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen im Ist-Zustand, der aus den Messdaten besteht, 30.3 % aller Tagesstundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.10 Mitte), die damit weiterhin am häufigsten vorkommt. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die fünft häufigste und deckt 11.0 % der Stundenwerte ab. Mit 12.3 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die dritthäufigste Klasse der Tagesstundenwerte. Eine noch größere Häufigkeit weist die Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die 13.1 % der Tagesstunden entfallen, was dem zweitgrößten Anteil entspricht. Die Klasse von 18 °C bis 23 °C deckt 12.1 % der Tageswerte ab. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C kommt im Ist-Zustand auf 10.9 %. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 7.0 % und nur noch 2.8 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). 0.4 % der Ergebnisse für die Tagstunden im Ist-Zustand für Mannheim fallen in die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41^\circ\text{C}$).

Bei den Tagesstunden des Zukunftsszenarios für Mannheim sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen im unteren Bereich immer noch ähnlich aus wie für die des Ist-Zustands. Im oberen Bereich ist sie jedoch deutlich in Richtung der wärmeren Klassen verschoben. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei den Tagesstunden des Zukunftsszenarios weiterhin auf 30.2 %, was einen Rückgang ihres Anteils um lediglich 0.1 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt etwas stärker. Sie geht um 0.9 % auf 10.1 % zurück. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt wieder eine schwächere Abnahme ihrer Häufigkeit um 0.3 % auf 12.0 %. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C verliert ebenfalls an Häufigkeit. Ihr Anteil geht sogar um 2.2 % auf 10.8 % zurück. Der der Klasse 18 °C bis 23 °C geht sogar noch stärker um 2.7 % zurück, womit der Klasse ein Anteil von 9.4 % verbleibt. Auf denselben Anteil kommt die Klasse von 23 °C bis 29 °C, deren Häufigkeit etwas leichter um 1.5 % fällt. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte nehmen ausnahmslos zu. So steigt der der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 0.2 % auf 7.2 % und der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 2.4 % auf 5.2 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt ebenfalls. Ihr Anteil nimmt sogar um 5.2 % zu. Ihre Häufigkeit liegt damit bei 5.7 %, was ca. 222 Stunden im Jahr mit extremem Hitzestress bedeutet.

Für die Nachtstunden bietet sich ein etwas anderes Bild (Abb. 2.10 rechts). Die Verteilung der Ergebnisse für PET ist stark in Richtung der niedrigen Klassen verschoben. Für die Nachtstunden des Ist-Zustands für Mannheim entfallen so 51.5 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist nur die dritthäufigste und deckt 16.9 % der Nachtstundenwerte ab. Mit 19.3 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur noch einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So beträgt der Anteil für die Klasse von 13 °C bis 18 °C nur 9.8 %. Die Klasse von 18 °C bis 23 °C deckt 2.1 % der Nachtstunden ab.



Entwicklung in Mannheim auf Grundlage von TRY12

Abb. 2.11: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate Juni, Juli und August des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus „Heißer Sommer“ TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035.

Einen noch geringeren Anteil weist die Klasse von 23 °C bis 29 °C auf, die nur 0.4 % der Nachtstunden repräsentiert. Alle darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von weniger als 0.1 % für die Nachtstunden des Ist-Zustands für Mannheim bedeutungslos. Beim Zukunftsszenario für Mannheim sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen für die Nachtstunden ähnlich aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios jedoch etwas häufiger vor als im Ist-Zustand. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im Zeitraum von 2021 bis 2050 immer noch auf 46.2 %, was jedoch einen deutlichen Rückgang ihres Anteils um 5.3 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt nur schwach um 0.3 % auf insgesamt 16.6 %. Einen stärkeren Rückgang verzeichnet die Klasse von 8 °C bis 13°C, deren Häufigkeit um 1.0 % auf insgesamt 18.3 % zurückgeht. Die Anteile aller Klassen für höhere PET-Werte nehmen zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C um 1.8 %. Damit repräsentiert die Klasse 11.5 % der Nachtstunden. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt sogar um 2.9 %, womit diese insgesamt jedoch auf gerade einmal 5.0 % kommt. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C verzeichnet ebenfalls einen Anstieg ihrer Häufigkeit. Dieser ist jedoch mit 1.4 % geringer, wodurch die Klasse schließlich 1.8 % der Nachtstunden repräsentiert. Der Anteil der nächsthöheren Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt um 0.4 %. Da ihr Anteil für das Ist-Szenario deutlich unter 0.1 % lag, kommt sie im Zukunftsszenario insgesamt ebenfalls auf 0.4 % der Nachtstunden. Die Klasse von 35 °C bis 41°C, die starken Hitzestress repräsentiert, kommt im Zukunftsszenario ebenfalls mit einem Anteil von 0.1 % der Nachtstunden vor. Auch der Anteil der Klasse mit extremem Hitzestress steigt leicht an. Ihre Häufigkeit bleibt jedoch deutlich unter 0.1 %.

Die Zeit der größten Relevanz der Vermeidung thermischen Stresses, die Sommermonate, sollen hier wieder getrennt betrachtet werden. Hierfür wurde ein durch die Differenz der „Heißer Sommer“ TRYs für 2035 und 2010 modifizierter Ausgangsdatensatz dem unveränderten gegenübergestellt (Abb. 2.11 links). In den Sommermonaten (Juni, Juli und August) des unveränderten Datensatzes entfallen dabei nur 1.2 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C deckt einen etwas größeren Bereich von 6.9 % der Stundenwerte ab. Mit 20.8 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. Einen noch größeren Anteil deckt die Klasse von 13 °C bis 18 °C ab, die 21.8 % der Stundenmittel repräsentiert. Sie ist damit die häufigste Klasse der Sommermonate des Ist-Zustands. Der Anteil für die Klasse von 18 °C bis 23 °C ist mit 15.9 % nur sehr wenig größer als der für die Klasse von 23 °C bis 29 °C, der 15.5 % beträgt. Der Anteil der Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C ist mit 11.7 % immer noch relativ groß, während der der Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C) mit 5.4 % schon deutlich einstellig ist. Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41^\circ\text{C}$) kommt in den Sommermonaten des unveränderten Datensatzes für Mannheim in nur 0.9 % der Stunden vor.

Betrachtet man die Sommermonate des durch die „Heißer Sommer“ TRYs modifizierten Datensatzes für Mannheim, erscheint die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen stark in Richtung der extremeren Klassen verschoben. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C in den Sommermonaten des Zukunftsszenarios deutlich öfter vor als im Ist-Zustand. Sie erreicht einen Anteil von 3.5 %, was einen starken Anstieg ihres Anteils um 2.3 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C verändert ihre Häufigkeit dagegen kaum. Ihr Anteil steigt schwach um 0.1 % auf 7.0 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt dagegen eine starke Abnahme ihrer Häufigkeit von 4.3 % auf nur noch 16.5 %. Auch die Anteile der anderen Klassen in der Mitte der Verteilung nehmen ausnahmslos ab. So fällt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C um 3.6 % auf 18.2 %, der der Klasse 18 °C bis 23 °C um 1.3 % auf 14.6 %, der der Klasse von 23 °C bis 29 °C um 2.5 % auf 13.0 % und der der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 1.4 % auf 10.3 %. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt dagegen um 2.3 % auf 7.6 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt sehr stark an. Ihre Häufigkeit nimmt am stärksten unter alle Klassen um 8.2 % zu und liegt für die Sommermonate des um die Differenz der „Heißer Sommer“ TRYs modifizierten Datensatzes für Mannheim bei 9.2 %. Ihr Anteil ist damit etwas geringer als in Karlsruhe.

Um ein möglichst differenziertes Bild zu erhalten ist es hilfreich, auch für die Betrachtung der Sommermonate zwischen Tag- und Nachtstunden zu unterscheiden. Wie oben erläutert sind Tagstunden alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Die Nachtstunden erstrecken sich entsprechend von 19 bis 6 Uhr.

Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen für die Sommermonate des ursprünglichen Datensatzes für Mannheim weniger als 0.1 % aller Tagesstundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.11 Mitte). Sie kommt somit tagsüber nicht mehr vor. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist ebenfalls deutlich seltener als in der Betrachtung für alle Stunden und deckt gerade noch 0.3 % der Tagstundenwerte ab. Mit 3.9 % ist auch der Anteil der Klasse von 8 °C bis 13 °C noch sehr klein. Eine deutlich größere Häufigkeit weist die Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die immerhin 14.7 % der Tagesstunden entfallen. Ein noch größerer Anteil entfällt mit 22.4 % auf die Klasse von 18 °C bis 23 °C. Sie ist damit die zweit häufigste Klasse für die Tagstunden. Mit 26.4 % der Stunden ist die Klasse von 23 °C bis 29 °C jedoch noch einmal deutlich häufiger. Sie weist die größte Häufigkeit für die Tagstunden in den Sommermonaten der Ist-Situation in Mannheim auf. Die Klassen für höhere PET-Werte weisen niedrigere Anteile auf. So betragen die Anteile für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C noch 20.9 %. 9.6 % der Tagstunden weisen starken Hitzestress (35 °C bis 41 °C) auf. Die Klasse mit extremem Hitzestress

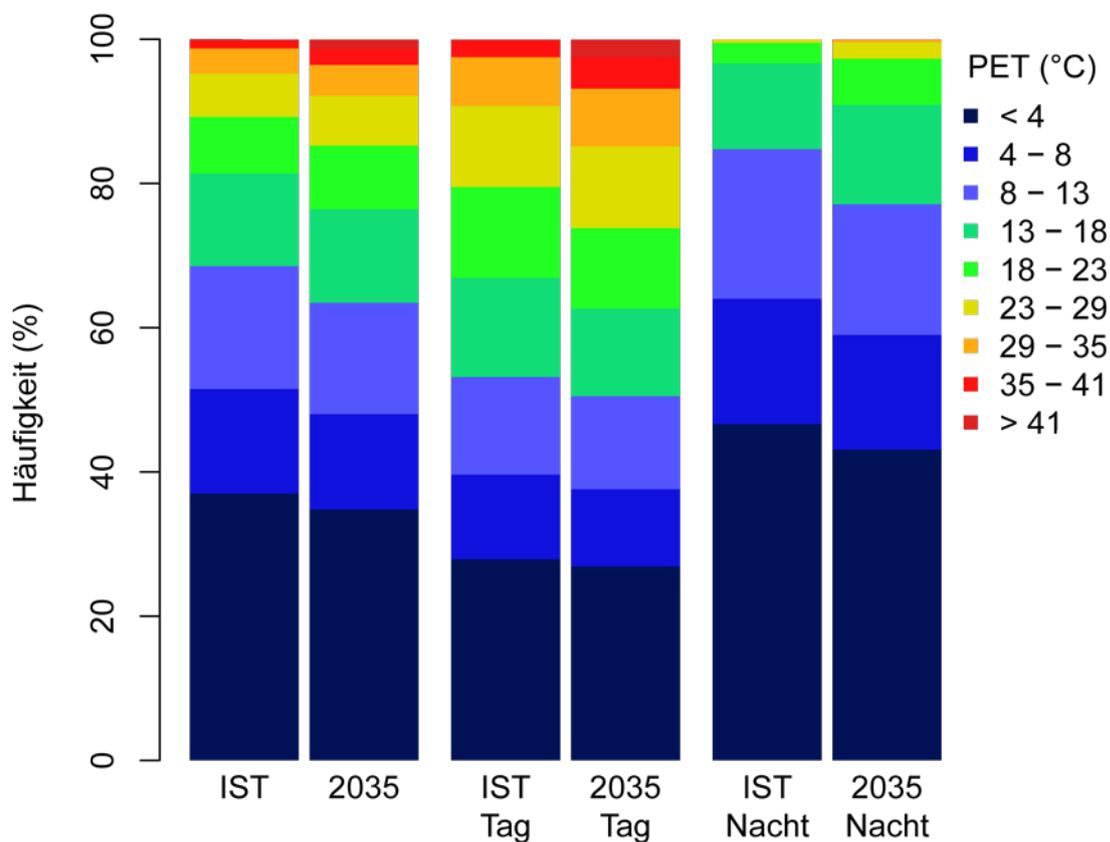
($PET \geq 41 \text{ }^\circ\text{C}$) kommt für die Tagstunden in den Sommermonaten des Mannheimer Ist-Zustands auf 1.7 % der Stunden.

Bei den Tagesstunden der Sommermonate des entsprechend der „Heißer Sommer“ TRY für die Region 12 modifizierten Datensatzes für Mannheim, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen, verglichen mit der für die Sommermonate des Ist-Zustands, ebenfalls vor allem im oberen und unteren Bereich stark verändert aus. Extremere Klassen, die sehr hohe, oder sehr niedrige PET-Werte repräsentieren, haben erneut deutliche Anteile auf Kosten der Klassen gemäßigerer PET-Werte hinzugewonnen. So kommt die Klasse für PET von kleiner als $4 \text{ }^\circ\text{C}$ bei den Tagesstunden der Sommermonate des modifizierten Datensatzes auf 2.4 %, was eine starke Zunahme ihres Anteils um 2.4 % entspricht. Die Häufigkeit der Klasse $4 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $8 \text{ }^\circ\text{C}$ steigt ebenso deutlich um 2.2 % auf 2.6 %. Die Klasse von $8 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $13 \text{ }^\circ\text{C}$ zeigt eine etwas schwächere Zunahme ihrer Häufigkeit. Diese steigt um 1.9 % womit die Klasse auf einen Anteil von 5.7 % kommt. Alle Klassen in der Mitte der Verteilung zeigen dagegen stark rückläufige Häufigkeiten. Die Klasse von $13 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $18 \text{ }^\circ\text{C}$ verzeichnet dabei einen deutlichen Rückgang um 4.9 % auf nur noch 9.8 %. Noch deutlicher fällt der Anteil der nächsthöheren Klasse. Der Anteil der Klasse $18 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $23 \text{ }^\circ\text{C}$ fällt sogar um 8.3 % auf 14.1 %, was nur noch dem viert-größten Anteil entspricht. Der Anteil der Klasse von $23 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $29 \text{ }^\circ\text{C}$ fällt ebenso deutlich um 8.2 % auf 17.8 %. Sie ist somit aber trotzdem die häufigste Klasse für die Tagstunden der Sommermonate des entsprechend der „Heißer Sommer“ TRYs der Region 12 modifizierten Datensatzes für Mannheim. Der Anteil der Klasse von $29 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $35 \text{ }^\circ\text{C}$ sinkt ebenfalls, jedoch deutlich schwächer um 3.5 % auf 17.3 %. Dies entspricht dem zweitgrößten Anteil für die Tagstunden. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte nehmen ausnahmslos zu. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von $35 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $41 \text{ }^\circ\text{C}$ steigt um 3.8 % auf 13.4 %. Die Häufigkeit der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt jedoch extrem um 14.6 % an. Ihre Häufigkeit liegt damit bei 16.3 %. Dies entspricht dem drittgrößten Anteil der Verteilung.

Für die Nachtstunden bietet sich ein etwas anderes Bild (Abb. 2.11 rechts). Die Verteilung der Ergebnisse für PET ist stark in Richtung der niedrigen Klassen verschoben. Trotzdem haben auch heiße Klassen Anteile hinzugewonnen. Für die Nachtstunden der Sommermonate des unveränderten Datensatzes für Mannheim (Ist-Zustand) entfallen so nur 2.7 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als $4 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Klasse von $4 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $8 \text{ }^\circ\text{C}$ ist mit 15.2 % der Nachtstundenwerte schon deutlich häufiger. Den mit deutlichem Abstand größten Anteil von 42.3 % weist die Klasse von $8 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $13 \text{ }^\circ\text{C}$ aus. Aber auch die Klasse von $13 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $18 \text{ }^\circ\text{C}$ hat mit 30.7 % noch einen sehr großen Anteil. Einen viel kleineren Anteil von nur 7.5 % entfällt auf die Klasse von $18 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $23 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur noch sehr geringe Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte abnehmend. Die Klasse von $23 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $29 \text{ }^\circ\text{C}$ kommt so immerhin noch auf 1.6 %, während die Klasse von $29 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $35 \text{ }^\circ\text{C}$ nur noch 0.1 % der Werte repräsentiert. Beide darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von weniger als 0.1 % für die Nachtstunden der Sommermonate des Ist-Zustandes für Mannheim nicht mehr von Bedeutung.

Bei den Nachtstunden der Sommermonate des entsprechend der „Heißer Sommer“ TRYs modifizierten Datensatzes (des Zukunftsszenarios) für Mannheim, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen ebenfalls deutlich extremer aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios deutlich häufiger vor als im Ist-Zustand. Aber auch die Klassen mit sehr niedrigen PET-Werten konnten ihren Anteil vergrößern. So kommt die Klasse für PET von kleiner als $4 \text{ }^\circ\text{C}$ für die Nachtstunden der Sommermonate des modifizierten Datensatzes für Mannheim auf 5.0 %, was einen deutlichen Anstieg ihrer Häufigkeit um 2.3 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse $4 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $8 \text{ }^\circ\text{C}$ fällt, wie die für alle Klassen des unteren mittleren Bereichs der Verteilung, deutlich um 2.5 % auf nur noch 12.6 %. Die

Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt jedoch eine weit größere Abnahme ihrer Häufigkeit. Sie verliert sogar 12.1 % und kommt so insgesamt nur noch auf 30.2 %. Sie ist damit jedoch immer noch die häufigste Klasse für die Nachtstunden. Auch der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C geht um 1.9 % zurück. Damit repräsentiert die Klasse noch 28.8 % der Nachtstunden, was dem zweitgrößten Anteil entspricht. Die Anteile aller höheren Klassen nehmen wieder zu. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt sehr stark um 7.7 %, womit diese insgesamt auf 15.2 % kommt. Auch die Häufigkeit der Klasse 23 °C bis 29 °C steigt noch deutlich um 4.8 % auf 6.4 %. Die Häufigkeit der Klasse von 29 °C bis 35 °C nimmt ebenfalls noch deutlich um 1.4 % zu, wodurch sie insgesamt 1.4 % der Nachtstunden repräsentiert. Die Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt ebenfalls leicht um 0.3 % an. Da sie im Ist-Zustand weit unter 0.1 % der Nachtstunden repräsentiert, entspricht dies auch ihrem Anteil im Zukunftsszenario. Dasselbe gilt für die Klasse mit extremem Hitzestress, deren Häufigkeit um 0.1 % steigt.



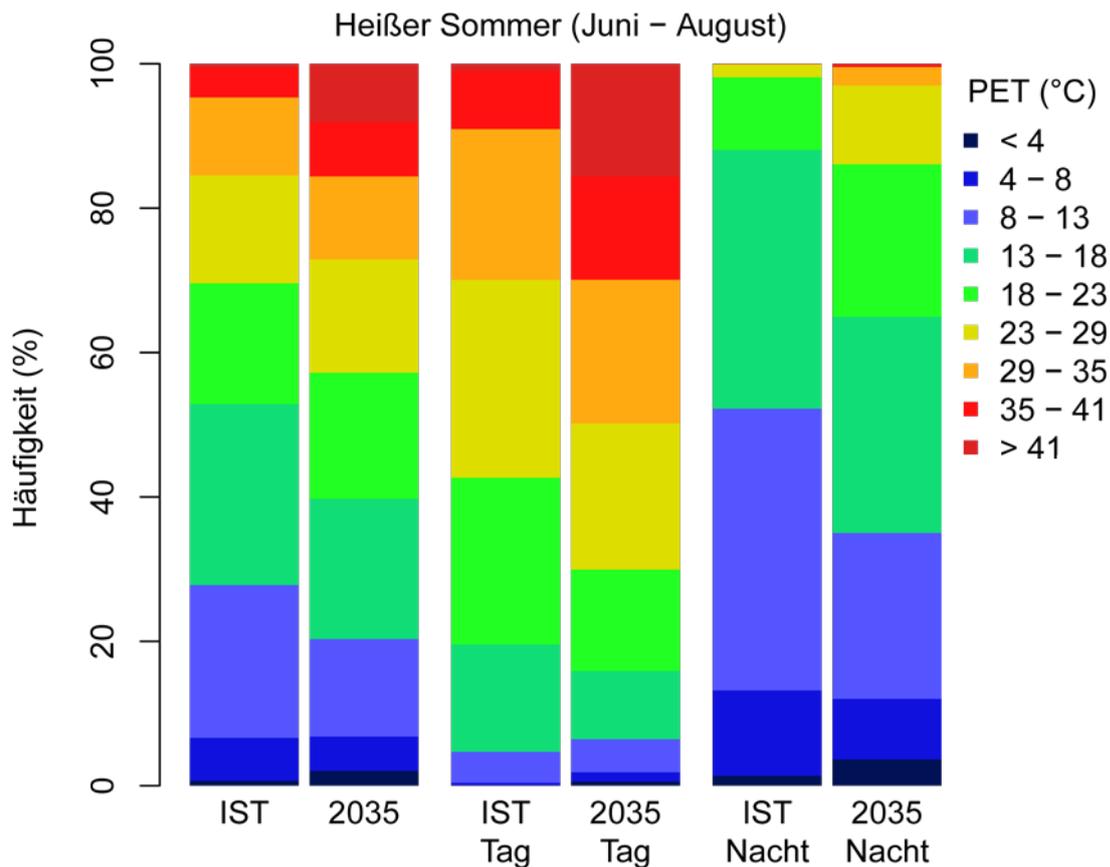
Entwicklung in Freiburg auf Grundlage von TRY6

Abb. 2.12: Vergleich des thermischen Bioklimas des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus TRY 2010 und TRY 2035 der Region 06 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035.

2.1.4 ENTWICKLUNG DES THERMISCHEN BIOKLIMAS IN FREIBURG

Die Stadt Freiburg ist entsprechend ihrer Lage teilweise der TRY Region 6 (Nördliche und westliche Mittelgebirge, Randgebiete) und teilweise der Region 12 (Oberrheingraben und unteres Neckartal) zuzuordnen. Entsprechend wurden die Änderungen der Regionen 6 und 12 in die Messdaten der Station Freiburg eingerechnet und die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) errechnet, die jeweils der ursprünglichen Verteilung (IST) gegenübergestellt wurde (vergl. Abbildungen 2.12 und 2.13 links). In der ursprünglichen Verteilung entfallen dabei 37.0 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4°C. Sie ist somit die häufigste der Verteilung. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die dritthäufigste und deckt 14.5 % der

Stundenwerte ab. Mit 17.0 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. In den Bereich von 13 °C bis 18 °C fallen immerhin noch 12.9 % der Ergebnisse. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse von 18 °C bis 23 °C 7.8 %, von 23 °C bis 29 °C nur noch 6.0 %, für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 3.5 % und 1.1 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41^\circ\text{C}$) kommt im Ist-Zustand für Freiburg in 0.1 % der Stunden vor. Dies entspricht ca. 9 Stunden im Jahr.



Entwicklung in Freiburg auf Grundlage von TRY6

Abb. 2.13: Vergleich des thermischen Bioklimas des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035.

Aufgrund seiner Lage wurde für Freiburg mit zwei Zukunftsszenarien, die beide eine mittlere Situation für 2035 zeigen, gerechnet. Die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen der PET-Werte der beiden Zukunftsszenarien ähnelt sich auf den ersten Blick, weist im Detail aber Unterschiede auf (vergl. Abbildungen 2.12 und 2.13 links). In beiden Fällen haben die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, Anteile auf Kosten der Klassen niedrigerer PET-Werte hinzugewonnen. Betrachtet man zunächst das Zukunftsszenario entsprechend der Region 6 (vergl. Abb. 2.12 links), so kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C nur noch auf 37.0 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 2.2 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt deutlich schwächer um 1.3 % auf dann noch 13.2 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt wieder eine etwas stärkere Abnahme ihrer Häufigkeit um 1.6 % auf 15.4 %. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C ist dagegen im Zukunftsszenario für Freiburg entsprechend der TRY Region 6 schon wieder zunehmend. Ihre Häufigkeit steigt schwach um 0.1 %, verbleibt jedoch bei 12.9 %. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt stärker um 1.0 % auf 8.8 %, während der der Klasse von 23 °C bis 29 °C in wenig geringerem

Umfang von 0.9 % auf 6.9 % steigt. Noch etwas schwächer nimmt der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C zu, der um 0.8 % auf 4.3 % steigt. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt wieder etwas stärker um 1.1 % auf 2.2 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt noch etwas stärker um 1.2 % an, womit sie 1.3 % aller Stundenwerte des Zukunftsszenarios entsprechend der TRY Region 6 für Freiburg repräsentiert. Dies entspricht ca. 114 Stunden pro Jahr, was deutlich weniger ist, als für Karlsruhe und Mannheim.

Betrachtet man dagegen das Zukunftsszenario für Freiburg entsprechend der TRY Region 12, so kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C nur noch auf 35.0 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 2.0 % bedeutet. Der Rückgang ist jedoch schwächer als für das Zukunftsszenario entsprechend der TRY Region 6. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt deutlich schwächer um 1.1 % auf dann noch 13.4 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt wieder eine etwas stärkere Abnahme ihrer Häufigkeit um 1.2 % auf 15.9 %. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C nimmt nur noch schwach um 0.4 % ab und verbleibt schließlich bei 12.4 %. Die Anteile der höheren PET Klassen weisen keine Abnahme mehr auf. So steigt der der Klasse 18 °C bis 23 °C schwach um 0.1 % auf 7.9 %, während der der Klasse von 23 °C bis 29 °C sich im Zukunftsszenario entsprechend der TRY Region 12 nicht vom Ist-Zustand für Freiburg unterscheidet und bei 6.0 % verbleibt. Der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt wieder um 0.4 % auf 3.9 %. Der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C nimmt sogar um 1.6 % auf 2.7 % zu. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt noch deutlich stärker um 2.6 % an, womit sie ebenfalls 2.7 % aller Stundenwerte des Zukunftsszenarios entsprechend der TRY Region 12 für Freiburg repräsentiert. Dies bedeutet für ein Jahr der Periode 2021 bis 2050 in Freiburg durchschnittlich 236 Stunden mit extremem Hitzestress und somit etwas weniger als in Karlsruhe und Mannheim, jedoch deutlich mehr als im Zukunftsszenario für Freiburg entsprechend der Entwicklung der TRY Region 6.

Um ein differenzierteres Bild zu erhalten wurde wieder zwischen Tag- und Nachtstunden unterschieden. Tagstunden sind dabei alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Nachtstunden sind entsprechend 19 bis 24 Uhr, sowie 1 bis 6 Uhr.

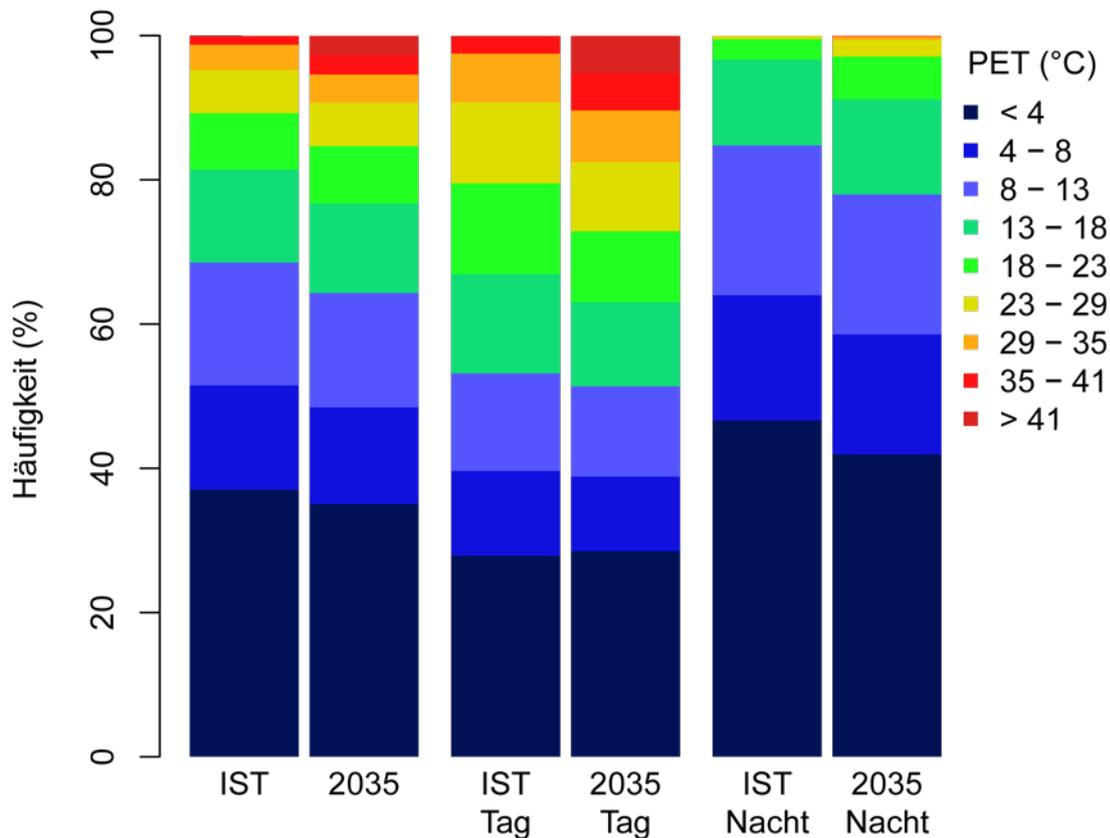
Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen im Ist-Zustand, der aus den Messdaten für Freiburg besteht, 27.9 % aller Tagesstundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.12 und Abb. 2.13 Mitte), die damit am häufigsten vorkommt. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die fünft häufigste und deckt 11.7 % der Stundenwerte ab. Mit 13.5 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die dritthäufigste Klasse der Tagesstundenwerte des Ist-Zustands in Freiburg. Eine noch etwas größere Häufigkeit weist die Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die 13.8 % der Tagesstunden entfallen, was dem zweitgrößten Anteil entspricht. Die Klasse von 18 °C bis 23 °C deckt 12.6 % der Tageswerte ab. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C kommt im Ist-Zustand auf 11.2 %. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 6.8 % und nur noch 2.2 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41°C). 0.3 % der Ergebnisse für die Tagstunden im Ist-Zustand für Freiburg fallen in die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41^\circ\text{C}$).

Bei den Tagesstunden des Zukunftsszenarios für Freiburg entsprechend der TRY Region 6 sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen im unteren Bereich immer noch ähnlich aus wie im Ist-Zustand. Im oberen Bereich ist sie jedoch deutlich in Richtung der wärmeren Klassen verschoben. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei den Tagesstunden des Zukunftsszenarios der Region 6 immer noch auf 26.9 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 1.0 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C

fällt im selben Umfang. Sie geht ebenfalls um 1.0 % auf 10.7 % zurück. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt wieder eine schwächere Abnahme ihrer Häufigkeit um 0.6 % auf 12.9 %. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C verliert wieder sehr viel deutlicher an Häufigkeit. Ihr Anteil geht um 1.6 % auf 12.2 % zurück. Der der Klasse 18 °C bis 23 °C geht nur wenig schwächer um 1.5 % zurück, womit der Klasse ein Anteil von 11.1 % verbleibt. Auf einen wenig größeren Anteil kommt die Klasse von 23 °C bis 29°C, deren Häufigkeit leicht um 0.1 % auf 11.3 % zunimmt. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte nehmen ebenfalls zu. So steigt der der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 1.2 % auf 8.0 % und der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 2.1 % auf 4.3 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt ebenfalls. Ihr Anteil nimmt noch stärker um 2.3 % zu. Ihre Häufigkeit liegt damit bei 2.6 %, was im Zukunftsszenario für Freiburg entsprechend der TRY Region 6 ca. 114 Stunden im Jahr mit extremem Hitzestress bedeutet.

Bei den Tagesstunden des Zukunftsszenarios für Freiburg entsprechend der TRY Region 12 sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen, verglichen mit dem Ist-Zustand, etwas stärker in Richtung der heißeren Klassen gestreckt aus als für das Zukunftsszenario entsprechend der TRY Region 06. Aber auch die kälteste Klasse scheint, im Gegensatz zum Region 6 Zukunftsszenario Anteile hinzugewonnen zu haben. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei den Tagesstunden des Region 12 Zukunftsszenarios auf 28.5 %, was eine Zunahme ihres Anteils um 0.6 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt dagegen. Sie geht um 1.4 % auf 10.4 % zurück. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt wieder eine schwächere Abnahme ihrer Häufigkeit um 1.0 % auf 12.5 %. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C verliert ebenfalls an Häufigkeit. Ihr Anteil geht sogar um 2.1 % auf 11.7 % zurück. Der der Klasse 18 °C bis 23 °C geht sogar noch stärker um 2.8 % zurück, womit der Klasse ein Anteil von 9.8 % verbleibt. Auf einen geringfügig kleineren Anteil von 9.6 % kommt die Klasse von 23 °C bis 29°C, deren Häufigkeit etwas leichter um 1.6 % fällt. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte sind zunehmend. So steigt der der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 0.4 % auf 7.2 % und der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C sogar um 2.9 % auf 5.1 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt jedoch noch stärker. Ihr Anteil nimmt um 5.0 % zu. Ihre Häufigkeit liegt damit bei 5.2 %, was für das Zukunftsszenario für Freiburg entsprechend der TRY Region 12 ca. 228 Stunden im Jahr mit extremem Hitzestress und somit doppelt so viele wie für das Region 6 Zukunftsszenario bedeutet.

Für die Nachtstunden bietet sich ein etwas anderes Bild (vergl. Abb. 2.12 und Abb. 2.13 rechts). Die Verteilung der Ergebnisse für PET ist stark in Richtung der niedrigen Klassen verschoben. Für die Nachtstunden des Ist-Zustands für Freiburg entfallen so 46.6 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4°C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die dritthäufigste und deckt 17.4 % der Nachtstundenwerte ab. Mit 20.8 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. Auch die Klasse von 13 °C bis 18 °C hat mit 11.9 % noch einen deutlich zweistelligen Anteil. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur noch einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So deckt die Klasse von 18 °C bis 23 °C 2.8 % der Nachtstunden ab. Einen noch geringeren Anteil weist die Klasse von 23 °C bis 29 °C auf, die nur 0.5 % der Nachtstunden repräsentiert. Alle darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von weniger als 0.1 % für die Nachtstunden des Ist-Zustands für Freiburg bedeutungslos.



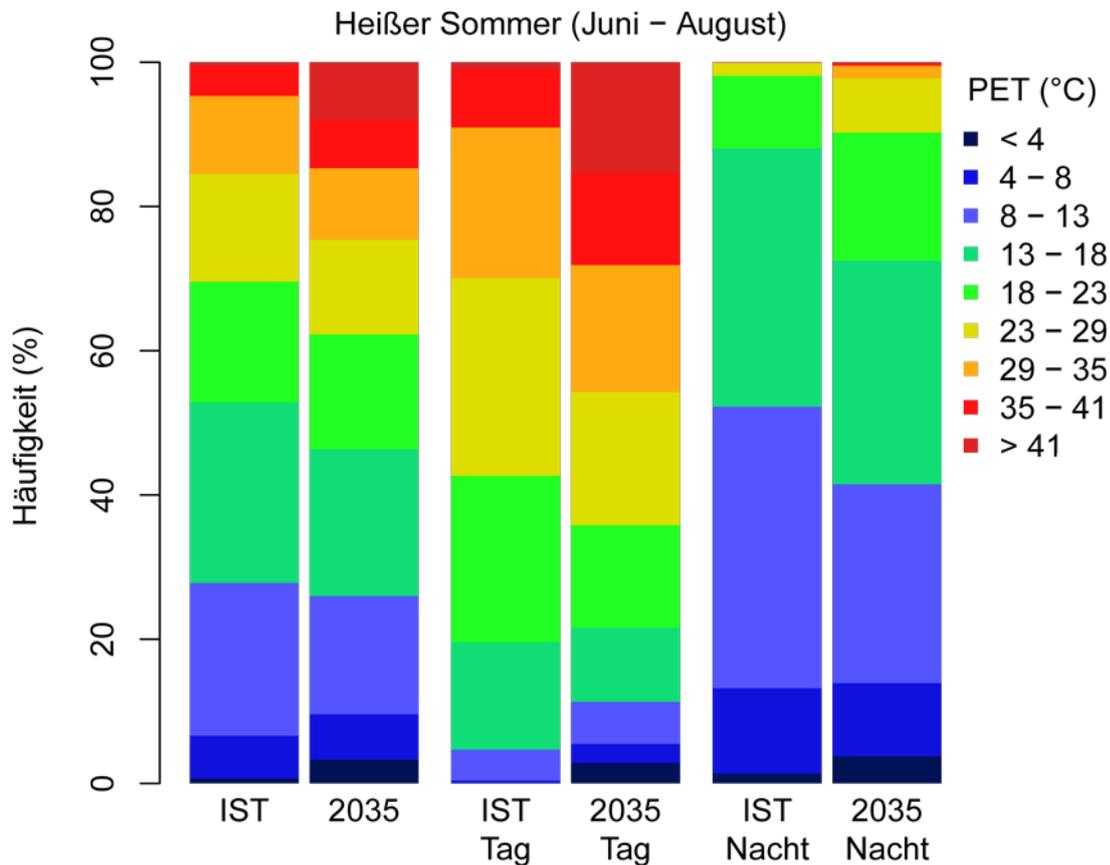
Entwicklung in Freiburg auf Grundlage von TRY12

Abb. 2.14: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate Juni, Juli und August des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus „Heißer Sommer“ TRY 2010 und TRY 2035 der Region 6 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035.

Beim Zukunftsszenario für Freiburg entsprechend der TRY Region 6 sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen für die Nachtstunden ähnlich aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios jedoch etwas häufiger vor als im Ist-Zustand. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im Region 6 Zukunftsszenario immer noch auf 43.1 %, was jedoch einen deutlichen Rückgang ihres Anteils um 3.5 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt schwächer, aber immer noch deutlich um 1.5 % auf insgesamt 15.9 %. Einen wieder stärkeren Rückgang verzeichnet die Klasse von 8 °C bis 13°C, deren Häufigkeit um 2.6 % auf insgesamt 18.1 % zurückgeht. Die Anteile aller Klassen für höhere PET-Werte nehmen zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C um 1.9 %. Damit repräsentiert die Klasse 13.8 % der Nachtstunden. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt sogar um 3.6 %, womit diese insgesamt jedoch auf gerade einmal 6.4 % kommt. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C verzeichnet ebenfalls einen Anstieg ihrer Häufigkeit. Dieser ist jedoch mit 1.8 % geringer, wodurch die Klasse schließlich 2.3 % der Nachtstunden repräsentiert. Der Anteil der nächsthöheren Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt noch leicht um 0.3 %. Da ihr Anteil für das Ist-Szenario deutlich unter 0.1 % lag, kommt sie im Zukunftsszenario insgesamt auf knapp 0.4 % der Nachtstunden. Auch der Anteil der beiden wärmeren Klassen steigt leicht an. Ihre Häufigkeit bleibt jedoch im Zukunftsszenario für Freiburg entsprechend der TRY Region 6 deutlich unter 0.1 %.

Beim Zukunftsszenario für Freiburg entsprechend der TRY Region 12 unterscheidet sich die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen für die Nachtstunden kaum von der für das Region 6 Zukunftsszenario. So

kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im Region 12 Zukunftsszenario auf 41.9 %, was jedoch einen deutlicheren Rückgang ihres Anteils als für das Zukunftsszenario der Region 6 um 4.7 % bedeutet.



Entwicklung in Freiburg auf Grundlage von TRY12

Abb. 2.15: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate Juni, Juli und August des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus „Heißer Sommer“ TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035.

Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt dafür schwächer um 0.8 % auf insgesamt 16.6 %. Einen stärkeren Rückgang verzeichnet die Klasse von 8 °C bis 13°C, deren Häufigkeit um 1.4 % auf insgesamt 19.4 % zurückgeht. Die Anteile aller Klassen für höhere PET-Werte nehmen zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C um 1.3 %. Damit repräsentiert die Klasse 13.2 % der Nachtstunden. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt sogar um 3.1 %, womit diese insgesamt jedoch nur auf 6.0 % kommt. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C verzeichnet ebenfalls einen Anstieg ihrer Häufigkeit. Dieser ist jedoch mit 1.8 % deutlich geringer, wodurch die Klasse schließlich 2.3 % der Nachtstunden repräsentiert. Der Anteil der nächsthöheren Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt um etwas mehr als 0.4 %. Da ihr Anteil für das Ist-Szenario unter 0.1 % lag, kommt sie im Zukunftsszenario damit insgesamt auf 0.5 % der Nachtstunden. Die Klasse von 35 °C bis 41°C, die starken Hitzestress repräsentiert, kommt im Zukunftsszenario ebenfalls mit einem Anteil von 0.1 % der Nachtstunden vor. Auch der Anteil der Klasse mit extremem Hitzestress steigt leicht an. Ihre Häufigkeit bleibt im Zukunftsszenario für Freiburg entsprechend der TRY Region 12 jedoch wie im Region 6 Zukunftsszenario deutlich unter 0.1 %.

Entsprechend ihrer Lage muss für die Stadt Freiburg auch für die Sommermonate sowohl die Entwicklung der TRY Region 6 (Nördliche und westliche Mittelgebirge, Randgebiete) als auch die der der Region 12

(Oberrheingraben und unteres Neckartal) berücksichtigt werden. Entsprechend wurden die Änderungen der Regionen 6 und 12 in die Messdaten der Station Freiburg für die Sommermonate eingerechnet. Die Ergebnisse wurden jeweils in thermische Empfindungsklassen (Tab. 1.1) eingeteilt. Deren Verteilung wurde schließlich der ursprünglichen Verteilung (IST) gegenübergestellt (Abbildungen 2.14 und 2.15 links). In der ursprünglichen Verteilung entfallen dabei 0.7 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4°C. Sie ist somit im IST-Zustand der Sommermonate in Freiburg sehr selten. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C deckt 6.0 % der Stundenwerte ab und ist damit schon deutlich häufiger. Mit 21.2 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. In den Bereich von 13 °C bis 18 °C fallen sogar 25.1 % der Ergebnisse, was dem größten Anteil für die Sommermonate in Freiburg entspricht. Die Klassen für höhere PET-Werte weisen wieder sinkende Anteile auf. So betragen die Anteile für die Klasse von 18 °C bis 23 °C 16.4 %, von 23 °C bis 29 °C nur noch 14.9 %, für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 10.8 % und 4.1 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41°C). Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41^\circ\text{C}$) kommt im Ist-Zustand für Freiburg in 0.5 % der Stunden vor. Dies entspricht ca. 11 Stunden im Jahr.

Aufgrund seiner Lage wurden auch für die Sommermonate für Freiburg zwei Zukunftsszenarien entsprechend der TRY Regionen 6 und 12 berechnet, die beide eine mittlere Situation für 2035 zeigen. Die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen der PET-Werte der beiden Zukunftsszenarien sind, wie schon für das ganze Jahr, ähnlich, weist im Detail aber deutliche Unterschiede auf (vergl. Abbildungen 2.14 und 2.15 links). In beiden Fällen haben die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, Anteile auf Kosten der Klassen niedrigerer PET-Werte hinzugewonnen. Aber auch die Häufigkeit der Klassen sehr niedriger PET-Werte hat zugenommen. Betrachtet man zunächst das Zukunftsszenario entsprechend der Region 6 (vergl. Abb. 2.14 links), so kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C auf 2.1 %, was einen Anstieg ihres Anteils um 1.4 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt dagegen um 1.2 % auf dann noch 4.7 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt eine noch stärkere Abnahme ihrer Häufigkeit um 7.7 % auf 13.5 %. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C nimmt wieder etwas schwächer, aber immer noch sehr deutlich um 5.6 % ab und verbleibt schließlich bei 19.4 %. Die Anteile der höheren PET Klassen weisen keine Abnahme mehr auf. So steigt der der Klasse 18 °C bis 23 °C schwach um 0.7 % auf 17.5 %, während der der Klasse von 23 °C bis 29 °C sich im Zukunftsszenario entsprechend der TRY Region 6 im fast selben Umfang von 0.8 % ansteigt und so 15.7 % der Sommerstunden repräsentiert. Der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt ebenfalls in ähnlichem Umfang um 0.7 % auf 11.5 %. Der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C nimmt sogar um 3.4 % auf 7.5 % zu. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt jedoch noch deutlich stärker um 7.5 % an, womit sie 8.1 % aller Sommerstundenwerte des Zukunftsszenarios entsprechend der TRY Region 6 für Freiburg repräsentiert. Dies bedeutet für einen Sommer der Periode 2021 bis 2050 in Freiburg durchschnittlich 166 Stunden mit extremem Hitzestress.

Betrachtet man dagegen die Sommermonate des Zukunftsszenarios für Freiburg entsprechend der TRY Region 12, so kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im auf 3.3 % der Sommerstunden, was einen deutlichen Anstieg ihres Anteils um 2.6 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C steigt ebenfalls leicht um 0.4 % auf dann 6.3 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt dagegen, wie alle Klassen des gemäßigten Bereichs, eine Abnahme ihrer Häufigkeit um 4.8 % auf 16.4 %. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C fällt ebenso deutlich um 4.7 %. Er verbleibt damit bei 20.4 %, was weiterhin dem größten Anteil der Sommerstunden entspricht. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C fällt dagegen nur schwach um 0.8 % auf 15.9 %, während der der Klasse von 23 °C bis 29 °C wieder in größerem Umfang von 1.8 % auf 13.1 % zurück geht. Wieder etwas schwächer nimmt der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C zu, der um 0.9 % auf 9.9 % zurückgeht. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt, wie der aller

heißen Klassen stark an. Er nimmt um 2.6 % auf 6.7 % zu. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt noch stärker um 7.4 % an, womit sie 8.0 % aller Sommerstundenwerte des Zukunftsszenarios entsprechend der TRY Region 12 für Freiburg repräsentiert. Dies bedeutet durchschnittlich ca. 177 Sommerstunden mit extremem Hitzestress pro Jahr und somit etwas mehr als im Zukunftsszenario für Freiburg entsprechend der Entwicklung der TRY Region 6.

Um ein differenzierteres Bild zu erhalten wurde wieder zwischen Tag- und Nachtstunden unterschieden. Tagstunden sind dabei alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Nachtstunden sind entsprechend 19 bis 24 Uhr, sowie 1 bis 6 Uhr.

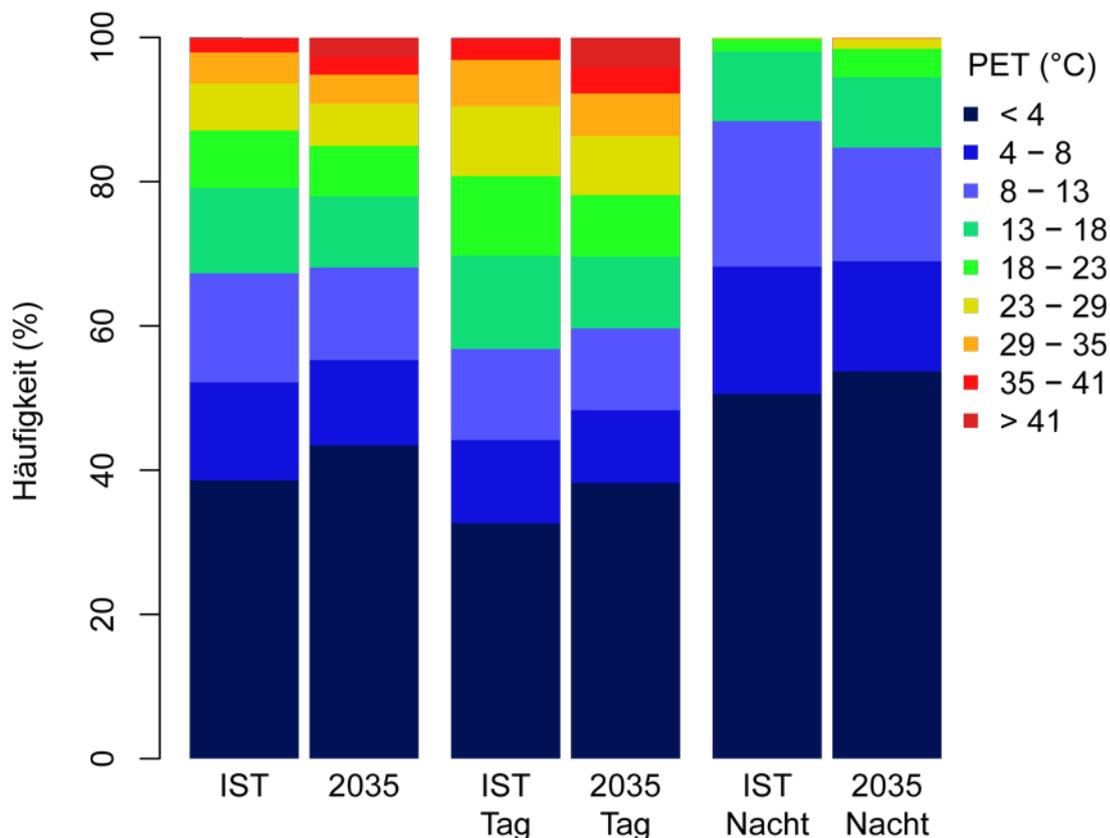
Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen im Ist-Zustand, der aus den Messdaten für Freiburg besteht, weniger als 0.1 % der Tagesstundenwerte des Sommers auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.14 und Abb. 2.15 Mitte), die damit am für den Ist-Zustand bedeutungslos ist. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C deckt mit 0.4 % der Sommerstundenwerte ebenfalls nur einen sehr kleinen Anteil ab. Mit 4.3 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die schon bedeutend häufiger. Eine deutlich größere Häufigkeit weist die Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die 14.9 % der Tagesstunden der Sommermonate entfallen. Die Klasse von 18 °C bis 23 °C deckt 23.1 % der Tageswerte ab, womit sie die zweit häufigste der Verteilung ist. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C kommt im Ist-Zustand sogar auf 27.4 %, was dem größten Anteil entspricht. Eine deutlich geringere Häufigkeit weist die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C auf, die auf 20.9 % der Sommerstunden kommt. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. So entfallen nur noch 8.0 % der Sommerstunden auf die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). 1.0 % der Ergebnisse für die Tagstunden im Ist-Zustand für Freiburg fallen in die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41$ °C). Bei den Tagesstunden der Sommermonate des Zukunftsszenarios für Freiburg entsprechend der TRY Region 6 sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen vor allem im oberen Bereich, vergleichen mit der des Ist-Zustands stark gestreckt aus. Jedoch scheinen auch niedrigere Klassen häufiger geworden zu sein. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei den Tagesstunden in den Sommermonaten des Zukunftsszenarios der Region 6 trotz einer deutlichen Zunahme um 0.6 % nur auf 0.6 %. Damit ist die Klasse jedoch, im Gegensatz zu der des Ist-Zustands, in der Verteilung des Zukunftsszenarios der Region 6 vertreten. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C steigt etwas stärker an. Sie nimmt um 0.9 % auf 1.3 % zu. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt wieder eine schwächere Zunahme ihrer Häufigkeit um 0.3 % auf 4.6 %. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C verliert dagegen, wie alle gemäßigten Klassen, an Häufigkeit. Ihr Anteil geht um 5.4 % auf 9.5 % zurück. Der der Klasse 18 °C bis 23 °C geht noch stärker um 9.1 % zurück, womit der Klasse ein Anteil von 14.0 % verbleibt. Auf einen deutlich größeren Anteil kommt die Klasse von 23 °C bis 29 °C, deren Häufigkeit jedoch ebenfalls sehr deutlich, um 7.1 %, auf 20.3 % zurückgeht. Der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C sinkt wieder schwächer, um 1.0 %, auf 19.9 %, was dem zweitgrößten Anteil entspricht. Die Anteile der beiden Klassen höherer PET-Werte nehmen dagegen wieder deutlich zu. So steigt der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 6.2 % auf 14.3 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt noch stärker. Ihr Anteil nimmt sogar um 14.6 % zu. Ihre Häufigkeit liegt damit bei 15.6 %, was im Zukunftsszenario für die Sommermonate in Freiburg entsprechend der TRY Region 6 ca. 344 Stunden im Jahr mit extremem Hitzestress bedeutet.

Bei den Tagesstunden des Zukunftsszenarios für die Sommermonate in Freiburg entsprechend der TRY Region 12 sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen, verglichen mit dem Ist-Zustand, etwas stärker in Richtung der extremeren Klassen gestreckt aus als für das Zukunftsszenario entsprechend der TRY Region 06. vor allem die kälteste Klasse scheint, im Gegensatz zum Region 6 Zukunftsszenario viele Anteile

hinzugewonnen zu haben. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei den Tagesstunden des Region 12 Zukunftsszenarios für die Sommermonate in Freiburg auf 2.8 %, was eine Zunahme ihres Anteils um 2.8 % bedeutet, da sie in der Verteilung des Ist-Zustands nicht vertreten war. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C steigt ebenso deutlich. Sie nimmt um 2.3 % auf 11.8 % zu. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt eine schwächere Zunahme ihrer Häufigkeit um 1.5 % auf 5.8 %. Die Anteile der gemäßigten Klassen nehmen dagegen ab. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C verliert 4.6 %, worauf ihr nur noch ein Anteil von 10.3 % der Stunden verbleibt. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C geht sogar noch stärker um 8.9 % zurück, womit die Häufigkeit der Klasse auf nur noch 14.2 % sinkt. Auf einen etwas größeren Anteil von 18.5 % kommt die Klasse von 23 °C bis 29°C, deren Häufigkeit sehr viel stärker um 9.0 % fällt. Trotz des starken Rückgangs ihrer Häufigkeit bleibt sie die Klasse mit dem stärksten Anteil. Der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C sinkt ebenfalls, jedoch etwas schwächer, um 3.3 % auf 17.6 %, was dem zweitgrößten Anteil entspricht. Die Anteile der beiden Klassen höherer PET-Werte sind dagegen zunehmend. So steigt der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 4.7 % auf 12.8 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt noch stärker. Ihr Anteil nimmt um 14.4 % zu. Ihre Häufigkeit liegt damit bei 15.4 %, was für einen Sommer im Zukunftsszenario für Freiburg entsprechend der TRY Region 12 ca. 340 Stunden im Jahr mit extremem Hitzestress und somit etwas weniger als in einem Sommer des Region 6 Zukunftsszenarios für Freiburg bedeutet.

Für die Nachtstunden der Sommermonate bietet sich ein etwas anderes Bild (vergl. Abb. 2.14 und Abb. 2.15 rechts). Die Verteilung der Ergebnisse für PET ist stark in Richtung der niedrigen Klassen verschoben. Für die Nachtstunden im Sommer des Ist-Zustands für Freiburg entfallen so nur 1.8 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4°C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C deckt 11.8 % der Nachtstundenwerte ab. Mit 39.0 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die häufigste. Auch die Klasse von 13 °C bis 18 °C hat mit 35.8 % noch einen sehr hohen Anteil. Die Klasse von 18 °C bis 23 °C deckt jedoch schon nur noch 10.1 % der Nachtstunden ab. Einen noch geringeren Anteil weist die Klasse von 23 °C bis 29 °C auf, die nur 1.7 % der Nachtstunden repräsentiert. Die Klasse von 29 °C bis 35 °C kommt lediglich auf 0.2 %. Alle darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von weniger als 0.1 % für die Nachtstunden im Sommer des Ist-Zustands für Freiburg bedeutungslos. Beim Zukunftsszenario für Freiburg entsprechend der TRY Region 6 sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen der sommerlichen Nachtstunden, ähnlich wie auch für die Tagstunden, in Richtung der extreme gestreckt aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios deutlich häufiger vor als im Ist-Zustand. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im Region 6 Zukunftsszenario auf 3.6 % der sommerlichen Nachtstunden, was einen deutlichen Anstieg ihres Anteils um 2.3 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt dagegen stark um 3.4 % auf insgesamt 8.4 %. Den mit Abstand stärksten Rückgang zeigt jedoch der Anteil der Klasse von 8 °C bis 13°C, deren Häufigkeit um 16.1 % auf nur noch 23.0 % zurückgeht. Sie ist damit jedoch immer noch die zweit häufigste Klasse der Nachtstunden des Sommers. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C fällt wieder deutlich schwächer um 5.9 %. Damit repräsentiert die Klasse 29.9 % der Nachtstunden, was dem größten Anteil der Verteilung entspricht. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt dagegen um 11.1 %, womit diese insgesamt jedoch nur auf 21.1 % kommt. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C verzeichnet ebenfalls einen sehr starken Anstieg ihrer Häufigkeit. Dieser ist jedoch mit 9.2 % geringer, wodurch die Klasse schließlich 10.9 % der Nachtstunden repräsentiert. Der Anteil der nächsthöheren Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt noch leichter um 2.4 %. Sie repräsentiert damit 2.5 % der Nachtstunden. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C nimmt ebenfalls leicht, um 0.4 %, zu, was auch ihrem Anteil an den Nachtstunden des Sommers im Region 6 Zukunftsszenario für Freiburg entspricht. Auch der Anteil der Klasse mit extremem Hitzestress steigt leicht an. Ihre Häufigkeit bleibt jedoch im Zukunftsszenario für Freiburg entsprechend der TRY Region 6 deutlich unter 0.1 %.

Beim Zukunftsszenario für die Sommermonate in Freiburg entsprechend der TRY Region 12 unterscheidet sich die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen für die Nachtstunden kaum von der für das Region 6 Zukunftsszenario. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im Region 12 Zukunftsszenario auf 3.7 % der Nachtstunden, was einem ähnlichen Anstieg ihres Anteils als für das Zukunftsszenario um 2.4 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt dafür schwach um 1.7 % auf insgesamt 10.2 %. Einen sehr viel stärkeren Rückgang verzeichnet die Klasse von 8 °C bis 13°C, deren Häufigkeit um 11.4 % auf insgesamt 27.6 % zurückgeht. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C fällt dagegen wieder schwächer um nur 4.8 %. Damit repräsentiert die Klasse immer noch 31.0 % der Nachtstunden, was dem mit Abstand größten Anteil entspricht. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt dagegen deutlich um 7.7 %, womit diese insgesamt auf 17.8 % kommt. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C verzeichnet ebenfalls einen Anstieg ihrer Häufigkeit. Dieser ist mit 5.8 % ebenfalls deutlich, wodurch die Klasse schließlich 7.5 % der Nachtstunden repräsentiert. Der Anteil der nächsthöheren Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt deutlich schwächer um 1.6 %, womit sie auf 0.5 % der Nachtstunden des Sommers kommt. Die Klasse von 35 °C bis 41°C, die starken Hitzestress repräsentiert, kommt im Zukunftsszenario ebenfalls mit einem Anteil von 0.4 % der Nachtstunden vor. Da ihr Anteil für das Ist-Szenario unter 0.1 % lag, entspricht dies ebenfalls dem Anstieg ihres Anteils. Gleiches gilt für die Klasse mit extremem Hitzestress, deren Häufigkeit im Zukunftsszenario für die Sommermonate in Freiburg entsprechend der TRY Region 12, wie im Region 6 Zukunftsszenario, rund 0.1 % erreicht.



Entwicklung in Ulm auf Grundlage von TRY13

Abb. 2.16: Vergleich des thermischen Bioklimas des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus TRY 2010 und TRY 2035 der Region 13 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035.

Die Stadt Ulm ist Teil der TRY Region 13 (Schwäbisch fränkisches Stufenland /Alpenvorland). Entsprechend wurden die Änderungen der Region 13 in die Messdaten der Station Ulm eingerechnet und die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) errechnet, die der ursprünglichen Verteilung (IST) gegenübergestellt wurde. In der ursprünglichen Verteilung entfallen dabei 38.6 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.16 links). Sie ist somit die häufigste der Verteilung. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die dritthäufigste und deckt 13.6 % der Stundenwerte ab. Mit 15.1 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. In den Bereich von 13 °C bis 18 °C fallen immerhin noch 11.9 % der Ergebnisse. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse von 18 °C bis 23 °C 7.9 %, von 23 °C bis 29 °C nur noch 6.5 %, für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 4.3 % und 1.8 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41°C). Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41^\circ\text{C}$) kommt im Ist-Zustand für Ulm in 0.3 % der Stunden vor. Dies sind ca. 26 Stunden im Jahr. Betrachtet man das Zukunftsszenario für Ulm, das eine mittlere Situation für 2035 zeigt, so sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen etwas verändert aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, haben Anteile auf Kosten der Klassen niedriger PET-Werte hinzugewonnen. Jedoch konnte auch die kälteste Klasse an Häufigkeit zunehmen. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im Zukunftsszenario auf 43.4 %, was eine starke Zunahme ihres Anteils um 4.8 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt dagegen deutlich um 1.7 % auf dann noch 11.8 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt eine deutlichere Abnahme ihrer Häufigkeit um 2.3 % auf 12.8 %. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C nimmt etwas schwächer um 2.0 % ab und verbleibt schließlich bei 9.9 %. Der der Klasse 18 °C bis 23 °C fällt abermals schwächer um 1.0 % auf 7.0 %, während der der Klasse von 23 °C bis 29 °C im Umfang von nur 0.7 % auf 5.9 % zurückgeht. Der der Klasse von 29 °C bis 35 °C zeigt nur noch eine schwache Abnahme um 0.3 % auf 4.0 %. Die Anteile der beiden höheren PET Klassen sind dagegen zunehmend. So steigt der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 0.7 % auf 2.4 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt deutlich stärker um 2.4 % an, womit sie 2.7 % aller Stundenwerte des Zukunftsszenarios für Ulm repräsentiert. Dies bedeutet für ein Jahr der Periode 2021 bis 2050 in Ulm durchschnittlich 236 Stunden mit extremem Hitzestress und somit deutlich weniger als in Karlsruhe und Mannheim, jedoch etwas mehr als in Freiburg.

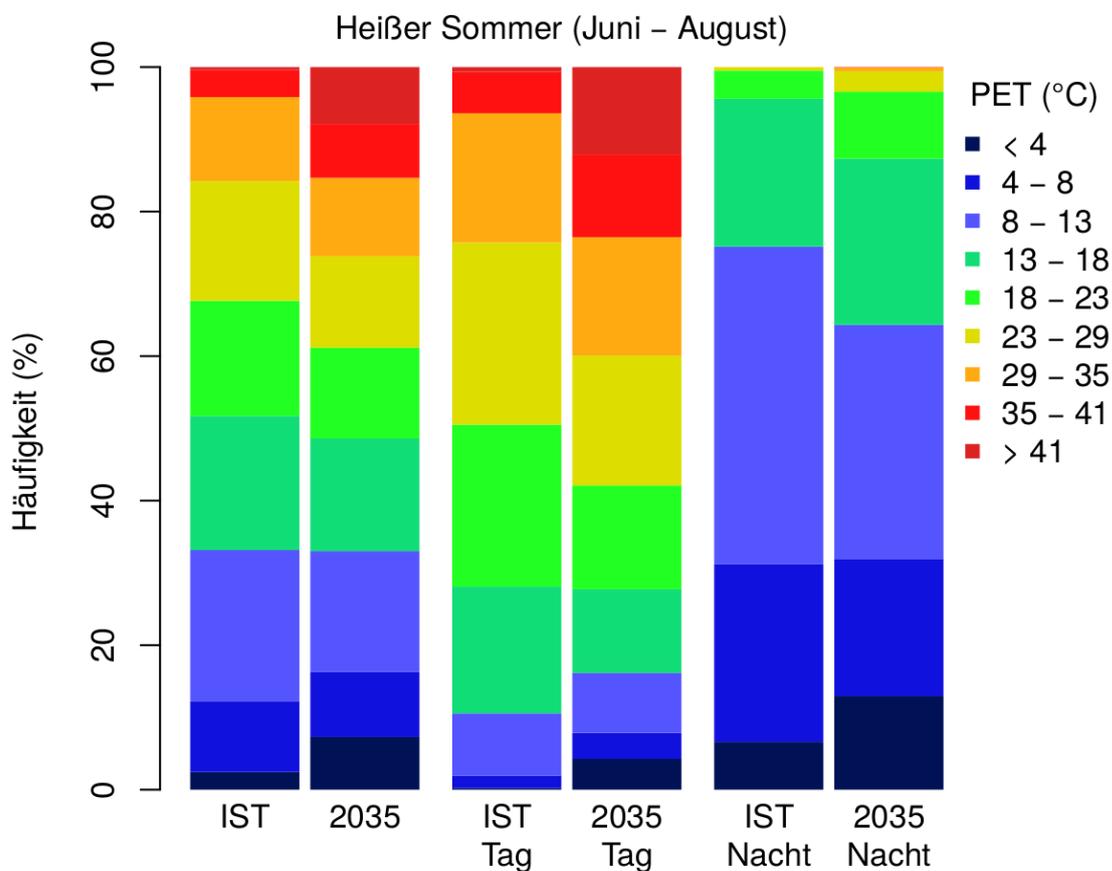
Um wieder ein differenzierteres Bild zu erhalten wurde auch für Ulm zwischen Tag- und Nachtstunden unterschieden. Tagstunden sind dabei wieder alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Nachtstunden sind entsprechend 19 bis 24 Uhr, sowie 1 bis 6 Uhr. Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen im Ist-Zustand, der aus den Messdaten besteht, 32.6 % aller Tagesstundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.16 Mitte), die damit weiterhin am häufigsten vorkommt. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die viert häufigste und deckt 11.5 % der Stundenwerte ab. Mit 12.6 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die dritthäufigste Klasse der Tagesstundenwerte. Eine noch größere Häufigkeit weist die Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die 13.0 % der Tagesstunden entfallen, was dem zweitgrößten Anteil entspricht. Die Klasse von 18 °C bis 23 °C deckt 11.0 % der Tageswerte ab. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C kommt im Ist-Zustand auf 9.7 %. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen ebenfalls nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 6.4 % und nur noch 2.6 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41°C). 0.5 % der Ergebnisse für die Tagstunden im Ist-Zustand für Ulm fallen in die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41^\circ\text{C}$).

Bei den Tagesstunden des Zukunftsszenarios für Ulm sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen, verglichen mit der des Ist-Zustands, stark in Richtung der extremeren Klassen verschoben aus. Dabei scheinen im Zukunftsszenario sowohl sehr heiße als auch sehr kalte Klassen häufiger aufzutreten. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei den Tagesstunden des Zukunftsszenarios auf 38.2 %, was einen deutlichen Anstieg ihres Anteils um 5.6 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt dagegen. Sie geht um 1.4 % auf 10.1 % zurück. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt eine leicht schwächere Abnahme ihrer Häufigkeit um 1.3 % auf 11.3 %. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C verliert ebenfalls an Häufigkeit. Ihr Anteil geht sogar um 3.0 % auf 10.0 % zurück. Der der Klasse 18 °C bis 23 °C geht wieder etwas schwächer um 2.5 % zurück, womit der Klasse ein Anteil von 8.6 % verbleibt. Auf einen ähnlichen Anteil von 8.2 % kommt die Klasse von 23 °C bis 29 °C, deren Häufigkeit etwas leichter um 1.5 % fällt. Auch der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C fällt noch schwach um 0.5 % auf 5.9 %. Die Anteile der beiden Klassen höherer PET-Werte nehmen dagegen zu. So steigt der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 1.0 % auf 3.7 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt ebenfalls. Ihr Anteil nimmt sogar um 3.6 % zu. Ihre Häufigkeit liegt damit bei 4.1 %, was ca. 179 Stunden im Jahr mit extremem Hitzestress bedeutet.

Für die Nachtstunden bietet sich ein etwas anderes Bild (Abb. 2.16 rechts). Die Verteilung der Ergebnisse für PET ist stark in Richtung der niedrigen Klassen verschoben. Für die Nachtstunden des Ist-Zustands für Ulm entfallen so 50.6 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist nur die dritthäufigste und deckt 17.7 % der Nachtstundenwerte ab. Mit 20.2 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur noch einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So beträgt der Anteil für die Klasse von 13 °C bis 18 °C nur 9.6 %. Die Klasse von 18 °C bis 23 °C deckt 1.7 % der Nachtstunden ab. Einen noch geringeren Anteil weist die Klasse von 23 °C bis 29 °C auf, die nur 0.2 % der Nachtstunden repräsentiert. Alle darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von weniger als 0.1 % für die Nachtstunden des Ist-Zustands für Ulm bedeutungslos.

Beim Zukunftsszenario für Ulm sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen für die Nachtstunden ähnlich aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios jedoch etwas häufiger vor als im Ist-Zustand. Aber auch die kälteste Klasse kann Anteile hinzugewinnen. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im Zeitraum von 2021 bis 2050 auf 53.7 %, was jedoch einen deutlichen Anstieg ihres Anteils um 3.1 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt dagegen um 2.4 % auf insgesamt 15.3 %. Einen stärkeren Rückgang verzeichnet die Klasse von 8 °C bis 13 °C, deren Häufigkeit um 4.4 % auf insgesamt 15.8 % zurückgeht. Die Anteile aller Klassen für höhere PET-Werte nehmen zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C gerade so um 0.1 %. Damit repräsentiert die Klasse 9.8 % der Nachtstunden. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt sogar um 2.2 %, womit diese insgesamt jedoch auf gerade einmal 3.9 % kommt. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C verzeichnet ebenfalls einen Anstieg ihrer Häufigkeit. Dieser ist jedoch mit 1.1 % geringer, wodurch die Klasse schließlich 1.3 % der Nachtstunden repräsentiert. Der Anteil der nächsthöheren Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt um 0.2 %. Da ihr Anteil für das Ist-Szenario deutlich unter 0.1 % lag, kommt sie im Zukunftsszenario insgesamt ebenfalls auf 0.2 % der Nachtstunden. Die Klasse von 35 °C bis 41 °C, die starken Hitzestress repräsentiert, kommt im Zukunftsszenario mit einem Anteil von weniger als 0.1 % der Nachtstunden nicht mehr vor. Auch der Anteil der Klasse mit extremem Hitzestress steigt leicht an. Ihre Häufigkeit bleibt jedoch ebenfalls deutlich unter 0.1 %.

Die Zeit der größten Relevanz der Vermeidung thermischen Stresses, die Sommermonate, sollen hier wieder getrennt betrachtet werden. Hierfür wurde ein durch die Differenz der „Heißer Sommer“ TRYs für 2035 und 2010 modifizierter Ausgangsdatensatz dem unveränderten gegenübergestellt (Abb. 2.17 links). In den Sommermonaten (Juni, Juli und August) des unveränderten Datensatzes entfallen dabei 2.5 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4°C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C deckt einen etwas größeren Bereich von 9.7 % der Stundenwerte ab. Mit 21.0 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die häufigste. Einen etwas kleineren Anteil deckt die Klasse von 13 °C bis 18 °C ab, die 18.6 % der Stundenmittel repräsentiert. Sie ist damit die zweit häufigste Klasse der Sommermonate des Ist-Zustands. Der Anteil für die Klasse von 18 °C bis 23 °C ist mit 15.9 % etwas geringer als der für die Klasse von 23 °C bis 29°C, der 16.6 % beträgt. Der Anteil der Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C ist mit 11.6 % immer noch relativ groß, während der der Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41°C) mit 3.7 % schon deutlich einstellig ist.



Entwicklung in Ulm auf Grundlage von TRY13

Abb. 2.17: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate Juni, Juli und August des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus „Heißer Sommer“ TRY 2010 und TRY 2035 der Region 13 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035.

Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41^\circ\text{C}$) kommt in den Sommermonaten des unveränderten Datensatzes für Ulm in nur 0.4 % der Stunden vor. Betrachtet man die Sommermonate des durch die „Heißer Sommer“ TRYs modifizierten Datensatzes für Ulm, erscheint die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen stark in Richtung der extremeren Klassen verschoben. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C in den Sommermonaten des Zukunftsszenarios deutlich öfter vor als im Ist-Zustand. Sie erreicht einen Anteil von 7.3 %, was einen starken Anstieg ihres Anteils um 4.9 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C sinkt dagegen leicht, wenn auch in geringem Umfang. Ihr Anteil sinkt um 0.7 % auf 9.0 %. Die

Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt eine deutlichere Abnahme ihrer Häufigkeit von 4.3 % auf nur noch 16.7 %. Auch die Anteile der anderen Klassen in der Mitte der Verteilung nehmen ausnahmslos ab. So fällt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C um 3.0 % auf 15.6 %, der der Klasse 18 °C bis 23 °C um 3.4 % auf 12.6 %, der der Klasse von 23 °C bis 29 °C um 3.9 % auf 12.7 % und der der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 0.8 % auf 10.8 %. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt dagegen um 3.7 % auf 7.5 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt sehr stark an. Ihre Häufigkeit nimmt am stärksten unter alle Klassen um 7.4 % zu und liegt für die Sommermonate des um die Differenz der „Heißer Sommer“ TRYs modifizierten Datensatzes für Ulm bei 7.9 %. Ihr Anteil ist damit geringer als in Karlsruhe und Mannheim.

Um ein möglichst differenziertes Bild zu erhalten ist es hilfreich, auch für die Betrachtung der Sommermonate zwischen Tag- und Nachtstunden zu unterscheiden. Wie oben erläutert sind Tagstunden alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Die Nachtstunden erstrecken sich entsprechend von 19 bis 6 Uhr.

Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen für die Sommermonate des ursprünglichen Datensatzes für Ulm gerade einmal 0.2 % aller Tagesstundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.17 Mitte). Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist ebenfalls deutlich seltener als in der Betrachtung für alle Stunden und deckt gerade noch 1.7 % der Tagstundenwerte ab. Mit 8.6 % ist auch der Anteil der Klasse von 8 °C bis 13 °C noch sehr klein. Eine deutlich größere Häufigkeit weist die Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die immerhin 17.6 % der Tagesstunden entfallen. Ein noch größerer Anteil entfällt mit 22.4 % auf die Klasse von 18 °C bis 23 °C. Sie ist damit die zweit häufigste Klasse für die Tagstunden. Mit 25.2 % der Stunden ist die Klasse von 23 °C bis 29 °C jedoch noch einmal deutlich häufiger. Sie weist die größte Häufigkeit für die Tagstunden in den Sommermonaten der Ist-Situation in Ulm auf. Die Klassen für höhere PET-Werte weisen wieder niedrigere Anteile auf. So beträgt der Anteil für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C noch 17.9 %. 5.7 % der Tagstunden weisen starken Hitzestress (35 °C bis 41 °C) auf. Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41^\circ\text{C}$) kommt für die Tagstunden in den Sommermonaten des Ulmer Ist-Zustands auf 0.6 % der Stunden.

Bei den Tagesstunden der Sommermonate des entsprechend der „Heißer Sommer“ TRY für die Region 13 modifizierten Datensatzes für Ulm, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen, verglichen mit der für die Sommermonate des Ist-Zustands, eben falls vor allem im oberen und unteren Bereich stark verändert aus. Extremere Klassen, die sehr hohe, oder sehr niedrige PET-Werte repräsentieren, haben erneut deutliche Anteile auf Kosten der Klassen gemäßigerer PET-Werte hinzugewonnen. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei den Tagesstunden der Sommermonate des modifizierten Datensatzes auf 4.3 %, was eine starke Zunahme ihres Anteils um 4.0 % entspricht. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C steigt ebenso noch deutlich um 1.9 % auf 3.6 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt bereits eine schwache Abnahme ihrer Häufigkeit. Diese sinkt um 0.3 % womit die Klasse auf einen Anteil von 8.3 % kommt. Alle Klassen in der Mitte der Verteilung zeigen dagegen stark rückläufige Häufigkeiten. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C verzeichnet dabei einen deutlichen Rückgang um 6.0 % auf nur noch 11.6 %. Noch deutlicher fällt der Anteil der nächsthöheren Klasse. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C fällt sogar um 8.1 % auf 14.3 %, was nur noch dem dritt-größten Anteil entspricht. Der Anteil der Klasse von 23 °C bis 29 °C fällt ebenso deutlich um 7.2 % auf 18.0 %. Sie ist somit aber trotzdem die häufigste Klasse für die Tagstunden der Sommermonate des entsprechend der „Heißer Sommer“ TRYs der Region 13 modifizierten Datensatzes für Ulm. Der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C sinkt ebenfalls, jedoch deutlich schwächer um 1.5 % auf 16.4 %. Dies entspricht dem zweitgrößten Anteil für die Tagstunden. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte nehmen ausnahmslos zu. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt um 5.7 % auf

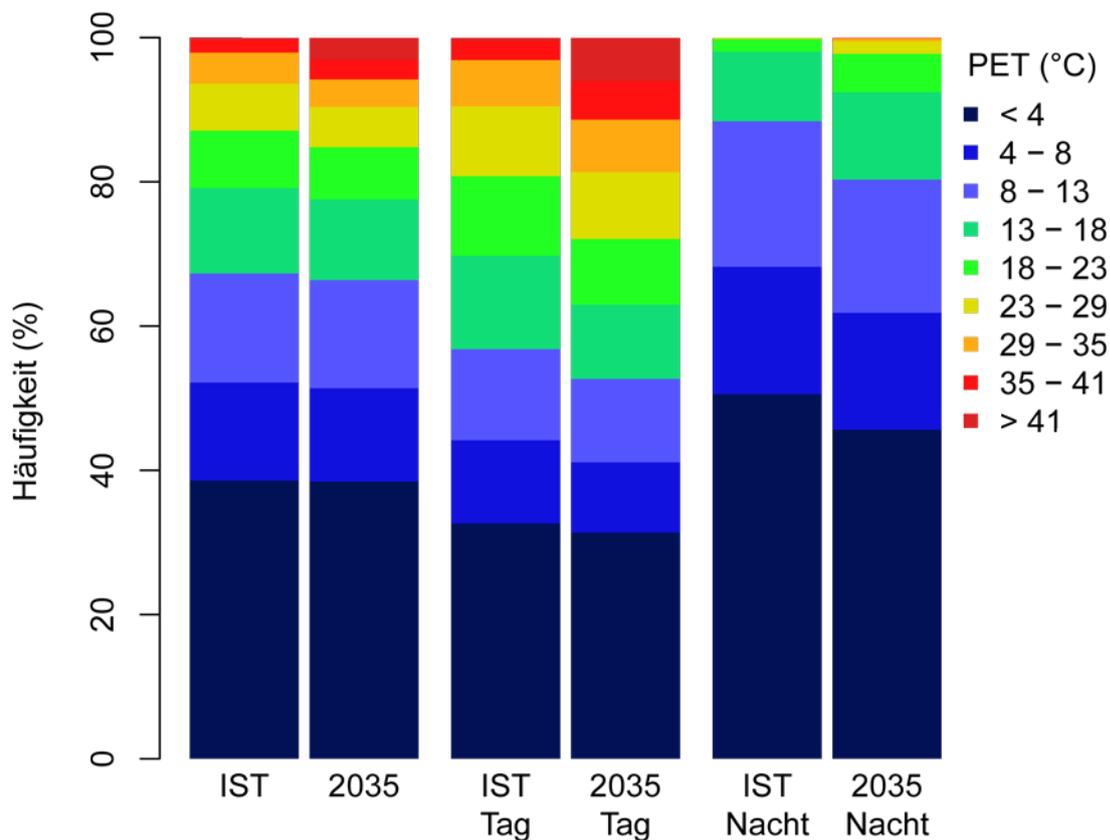
11.5 %. Die Häufigkeit der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt jedoch extrem um 11.4 % an. Ihre Häufigkeit liegt damit bei 12.1 %. Dies entspricht dem viert-größten Anteil der Verteilung.

Für die Nachtstunden bietet sich ein etwas anderes Bild (Abb. 2.17 rechts). Die Verteilung der Ergebnisse für PET ist stark in Richtung der niedrigen Klassen verschoben. Trotzdem haben auch heiße Klassen Anteile hinzugewonnen. Für die Nachtstunden der Sommermonate des unveränderten Datensatzes für Ulm (Ist-Zustand) entfallen so nur 6.6 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4°C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist mit 24.6 % der Nachtstundenwerte schon deutlich häufiger. Den mit deutlichem Abstand größten Anteil von 43.9 % weist die Klasse von 8 °C bis 13 °C aus. Aber auch die Klasse von 13 °C bis 18 °C hat mit 20.5 % noch einen sehr großen Anteil. Einen viel kleineren Anteil von nur 3.9 % entfällt auf die Klasse von 18 °C bis 23°C. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C kommt immerhin noch auf 0.5 %, während die Klasse von 29 °C bis 35 °C mit weniger als 0.1 % der Werte nicht mehr vertreten ist. Beide darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von deutlich weniger als 0.1 % für die Nachtstunden der Sommermonate des Ist-Zustandes für Ulm nicht mehr von Bedeutung.

Bei den Nachtstunden der Sommermonate des entsprechend der „Heißer Sommer“ TRYs modifizierten Datensatzes (des Zukunftsszenarios) für Ulm, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen ebenfalls deutlich extremer aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios deutlich häufiger vor als im Ist-Zustand. Aber auch die Klassen mit sehr niedrigen PET-Werten konnten ihren Anteil vergrößern. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C für die Nachtstunden der Sommermonate des modifizierten Datensatzes für Ulm auf 13.0 %, was einen deutlichen Anstieg ihrer Häufigkeit um 6.3 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C sinkt dagegen ebenso deutlich um 5.6 % auf 19.0 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt eine noch deutlichere Abnahme ihrer Häufigkeit. Sie verliert sogar 11.5 % und kommt so insgesamt nur noch auf 32.4 %. Sie ist damit jedoch immer noch die häufigste Klasse für die Nachtstunden. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C steigt dagegen schwach um 2.5 % an. Damit repräsentiert die Klasse 23.0 % der Nachtstunden, was dem zweit-größten Anteil entspricht. Die Anteile aller höheren Klassen nehmen ausnahmslos zu. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt um 5.4 %, womit diese insgesamt auf 9.3 % kommt. Auch die Häufigkeit der Klasse 23 °C bis 29 °C steigt etwas schwächer um 2.3 % auf 2.8 %. Die Häufigkeit der Klasse von 29 °C bis 35 °C nimmt ebenfalls noch leicht um 0.5 % zu, wodurch sie insgesamt 0.5 % der Nachtstunden repräsentiert. Die Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt ebenfalls leicht um etwas weniger als 0.1 % an. Da sie im Ist-Zustand weit unter 0.1 % der Nachtstunden repräsentiert, kommt sie damit im Zukunftsszenario auf insgesamt 0.1 %. Der Anteil der Klasse mit extremem Hitzestress bleibt dagegen auch im Zukunftsszenario für die Nachtstunden in Ulm bei unter 0.1 %.

2.1.6 ENTWICKLUNG DES THERMISCHEN BIOKLIMAS IN KONSTANZ

Die Stadt Konstanz ist, ebenso wie die Projektstädte Karlsruhe, Mannheim und Teile von Freiburg der TRY Region 12 (Oberrheingraben und unteres Neckartal) zuzuordnen. Entsprechend wurden die Änderungen der Region 12 in die Messdaten der Station Konstanz eingerechnet und die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) errechnet, die der ursprünglichen Verteilung (IST) gegenübergestellt wurde. In der ursprünglichen Verteilung entfallen dabei 38.6 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.18 links).



Entwicklung in Konstanz auf Grundlage von TRY12

Abb. 2.18: Vergleich des thermischen Bioklimas des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035.

Sie ist somit die häufigste der Verteilung. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die dritthäufigste und deckt 13.6 % der Stundenwerte ab. Mit 15.1 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. In den Bereich von 13 °C bis 18 °C fallen immerhin noch 11.9 % der Ergebnisse. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse von 18 °C bis 23 °C 7.9 %, von 23 °C bis 29 °C nur noch 6.5 %, für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 4.3 % und 1.8 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41 °C). Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41^\circ\text{C}$) kommt im Ist-Zustand für Konstanz in 0.3 % der Stunden vor. Dies sind ca. 26 Stunden im Jahr. Betrachtet man das Zukunftsszenario für Konstanz, das eine mittlere Situation für 2035 zeigt, so sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen etwas verändert aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, haben Anteile auf Kosten der Klassen niedriger PET-Werte hinzugewonnen. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im Zukunftsszenario nur noch auf 38.4 %, was einen leichten Rückgang ihres Anteils um 0.1 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt deutlicher um 0.6 % auf dann noch 13.0 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt wieder eine leichtere Abnahme ihrer Häufigkeit um nur 0.1 % auf 15.0 %. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C nimmt dagegen wieder etwas stärker um 0.7 % ab und verbleibt schließlich bei 11.2 %. Der der Klasse 18 °C bis 23 °C fällt ebenfalls um 0.7 % auf 7.2 %, während der der Klasse von 23 °C bis 29 °C um 1.0 % auf 5.6 % zurückgeht. Auch der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C zeigt noch eine leichte Zunahme um 0.4 % auf 3.8 %. Die Anteile der beiden höheren PET Klassen sind dagegen zunehmend. So steigt der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 1.0 % auf 2.8 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt deutlich stärker um 2.7 % an, womit sie 3.0 % aller Stundenwerte

des Zukunftsszenarios für Konstanz repräsentiert. Dies bedeutet für ein Jahr der Periode 2021 bis 2050 in Konstanz durchschnittlich 262 Stunden mit extremem Hitzestress und somit etwas mehr als in Freiburg, jedoch weniger als in Karlsruhe und Mannheim.

Um wieder ein differenzierteres Bild zu erhalten wurde auch für Konstanz zwischen Tag- und Nachtstunden unterschieden. Tagstunden sind dabei wieder alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Nachtstunden sind entsprechend 19 bis 24 Uhr, sowie 1 bis 6 Uhr.

Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen im Ist-Zustand, der aus den Messdaten besteht, 32.6 % aller Tagesstundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.18 Mitte), die damit weiterhin am häufigsten vorkommt. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die viert häufigste und deckt 11.5 % der Stundenwerte ab. Mit 12.6 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die dritthäufigste Klasse der Tagesstundenwerte. Eine noch größere Häufigkeit weist die Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die 13.0 % der Tagesstunden entfallen, was dem zweitgrößten Anteil entspricht. Die Klasse von 18 °C bis 23 °C deckt 11.0 % der Tageswerte ab. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C kommt im Ist-Zustand auf 9.7 %. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen ebenfalls nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 6.4 % und nur noch 2.6 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41°C). 0.5 % der Ergebnisse für die Tagstunden im Ist-Zustand für Konstanz fallen in die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41^\circ\text{C}$).

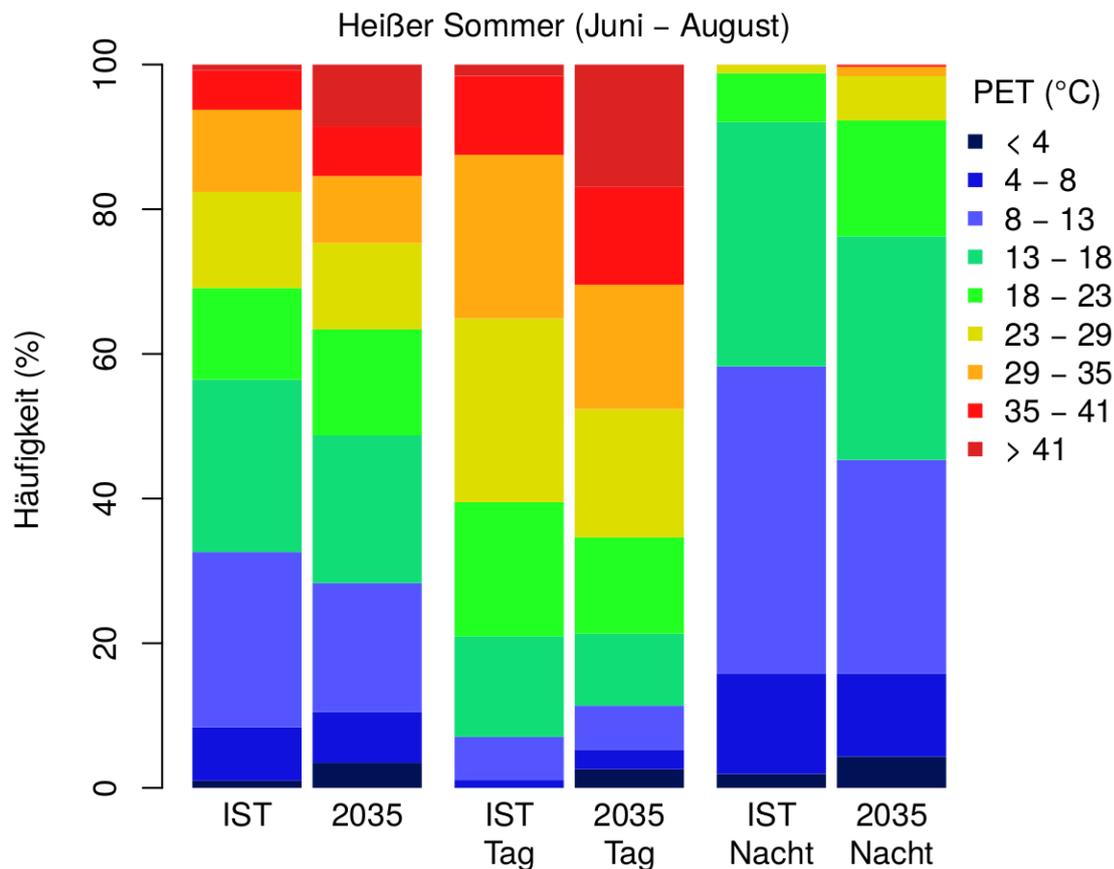
Bei den Tagesstunden des Zukunftsszenarios für Konstanz sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen im unteren Bereich immer noch ähnlich aus wie für die des Ist-Zustands. Im oberen Bereich ist sie jedoch deutlich in Richtung der wärmeren Klassen verschoben. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei den Tagesstunden des Zukunftsszenarios weiterhin auf 31.4 %, was einen Rückgang ihres Anteils um lediglich 1.3 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt etwas stärker. Sie geht um 1.8 % auf 9.8 % zurück. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt wieder eine schwächere Abnahme ihrer Häufigkeit um 1.1 % auf 11.6 %. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C verliert ebenfalls an Häufigkeit. Ihr Anteil geht sogar um 2.7 % auf 10.3 % zurück. Der der Klasse 18 °C bis 23 °C geht wieder etwas schwächer um 1.9 % zurück, womit der Klasse ein Anteil von 9.1 % verbleibt. Auf einen ähnlichen Anteil von 9.3 % kommt die Klasse von 23 °C bis 29°C, deren Häufigkeit etwas leichter um nur 0.4 % fällt. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte nehmen dagegen zu. So steigt die Häufigkeit der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 0.9 % auf 7.3 % und der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 2.7 % auf 5.4 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt ebenfalls. Ihr Anteil nimmt sogar um 5.5 % zu. Ihre Häufigkeit liegt damit bei 6.0 %, was ca. 262 Sommerstunden im Jahr mit extremem Hitzestress bedeutet.

Für die Nachtstunden bietet sich ein etwas anderes Bild (Abb. 2.18 rechts). Die Verteilung der Ergebnisse für PET ist stark in Richtung der niedrigen Klassen verschoben. Für die Nachtstunden des Ist-Zustands für Konstanz entfallen so 50.6 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4°C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist nur die dritthäufigste und deckt 17.7 % der Nachtstundenwerte ab. Mit 20.2 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur noch einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So beträgt der Anteil für die Klasse von 13 °C bis 18 °C nur 9.6 %. Die Klasse von 18 °C bis 23 °C deckt 1.7 % der Nachtstunden ab. Einen noch geringeren Anteil weist die Klasse von 23 °C bis 29 °C auf, die nur 0.2 % der Nachtstunden repräsentiert. Alle darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von weniger als 0.1 % für die Nachtstunden des Ist-Zustands für Konstanz

bedeutungslos. Beim Zukunftsszenario für Konstanz sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen für die Nachtstunden ähnlich aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios jedoch etwas häufiger vor als im Ist-Zustand. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im Zeitraum von 2021 bis 2050 immer noch auf 45.6 %, was jedoch einen deutlichen Rückgang ihres Anteils um 4.9 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt dagegen schwächer um 1.5 % auf insgesamt 16.2 %. Einen wieder etwas stärkeren Rückgang verzeichnet die Klasse von 8 °C bis 13°C, deren Häufigkeit um 1.7 % auf insgesamt 18.5 % zurückgeht. Die Anteile aller Klassen für höhere PET-Werte nehmen zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C um 2.5 %. Damit repräsentiert die Klasse 12.1 % der Nachtstunden. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt sogar um 3.6 %, womit diese insgesamt jedoch auf gerade einmal 5.3 % kommt. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C verzeichnet ebenfalls einen Anstieg ihrer Häufigkeit. Dieser ist jedoch mit 1.6 % geringer, wodurch die Klasse schließlich 1.8 % der Nachtstunden repräsentiert. Der Anteil der nächsthöheren Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt um 0.4 %. Da ihr Anteil für das Ist-Szenario deutlich unter 0.1 % lag, kommt sie im Zukunftsszenario insgesamt ebenfalls auf 0.4 % der Nachtstunden. Die Klasse von 35 °C bis 41°C, die starken Hitzestress repräsentiert, kommt im Zukunftsszenario ebenfalls mit einem Anteil von 0.1 % der Nachtstunden vor. Auch der Anteil der Klasse mit extremem Hitzestress steigt leicht an. Ihre Häufigkeit bleibt jedoch deutlich unter 0.1 %.

Die Zeit der größten Relevanz der Vermeidung thermischen Stresses, die Sommermonate, sollen hier wieder getrennt betrachtet werden. Hierfür wurde ein durch die Differenz der „Heißer Sommer“ TRYs für 2035 und 2010 modifizierter Ausgangsdatensatz dem unveränderten gegenübergestellt (Abb. 2.19 links). In den Sommermonaten (Juni, Juli und August) des unveränderten Datensatzes entfallen dabei nur 1.0 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4°C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C deckt einen etwas größeren Bereich von 7.4 % der Stundenwerte ab. Mit 24.2 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die häufigste. Einen wenig kleineren Anteil deckt die Klasse von 13 °C bis 18 °C ab, die 23.8 % der Stundenmittel repräsentiert. Sie ist damit die zweit häufigste Klasse der Sommermonate des Ist-Zustands. Der Anteil für die Klasse von 18 °C bis 23 °C ist mit 12.6 % nur sehr wenig kleiner als der für die Klasse von 23 °C bis 29°C, der 13.3 % beträgt. Der Anteil der Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C ist mit 11.4 % immer noch relativ groß, während der der Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41°C) mit 5.5 % schon deutlich einstellig ist. Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41^\circ\text{C}$) kommt in den Sommermonaten des unveränderten Datensatzes für Konstanz nur in 0.8 % der Stunden vor.

Betrachtet man die Sommermonate des durch die „Heißer Sommer“ TRYs modifizierten Datensatzes für Konstanz, erscheint die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen stark in Richtung der extremeren Klassen verschoben. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C in den Sommermonaten des Zukunftsszenarios deutlich öfter vor als im Ist-Zustand. Sie erreicht einen Anteil von 3.5 %, was einen starken Anstieg ihres Anteils um 2.5 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C verändert ihre Häufigkeit dagegen weniger stark. Ihr Anteil sinkt schwach um 0.4 % auf 7.1 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt dagegen eine deutliche Abnahme ihrer Häufigkeit von 6.4 % auf nur noch 17.8 %.



Entwicklung in Konstanz auf Grundlage von TRY12

Abb. 2.19: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate Juni, Juli und August des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus „Heißer Sommer“ TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035.

Auch die Anteile der anderen Klassen in der Mitte der Verteilung zeigen sehr unterschiedliche Entwicklungen. So fällt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C etwas weniger stark um 3.4 % auf 20.4 %, der der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt dagegen um 2.0 % auf 14.7 %, der der Klasse von 23 °C bis 29 °C sinkt jedoch wieder um 1.4 % auf 11.9 % und der der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 2.1 % auf 9.3 %. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt um 1.4 % auf 6.9 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt sehr stark an. Ihre Häufigkeit nimmt am stärksten unter alle Klassen um 7.7 % zu und liegt für die Sommermonate des um die Differenz der „Heißer Sommer“ TRYs modifizierten Datensatzes für Konstanz bei 8.5 %. Ihr Anteil ist damit etwas höher als in Freiburg und Ulm, jedoch deutlich geringer als in Karlsruhe und Mannheim.

Um ein möglichst differenziertes Bild zu erhalten ist es hilfreich, auch für die Betrachtung der Sommermonate zwischen Tag- und Nachtstunden zu unterscheiden. Wie oben erläutert sind Tagstunden alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Die Nachtstunden erstrecken sich entsprechend von 19 bis 6 Uhr.

Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen für die Sommermonate des ursprünglichen Datensatzes für Konstanz weniger als 0.1 % aller Tagesstundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.19 Mitte). Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist ebenfalls deutlich seltener als in der Betrachtung für alle Stunden und deckt gerade noch 1.0 % der Tagstundenwerte ab. Mit 6.0 % ist der Anteil der Klasse von 8 °C bis 13 °C schon deutlich größer. Eine noch größere Häufigkeit weist die

Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die immerhin 13.9 % der Tagesstunden entfallen. Ein noch größerer Anteil entfällt mit 18.5 % auf die Klasse von 18 °C bis 23°C. Sie ist damit die dritt-häufigste Klasse für die Tagstunden. Mit 25.4 % der Stunden ist die Klasse von 23 °C bis 29 °C jedoch noch einmal deutlich häufiger. Sie weist die größte Häufigkeit für die Tagstunden in den Sommermonaten der Ist-Situation in Konstanz auf. Die Klassen für höhere PET-Werte weisen etwas niedrigere Anteile auf. So betragen die Anteile für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C noch 22.6 %. 10.9 % der Tagstunden weisen starken Hitzestress (35 °C bis 41°C) auf. Die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41^\circ\text{C}$) kommt für die Tagstunden in den Sommermonaten des Konstanzer Ist-Zustands auf 1.6 % der Stunden.

Bei den Tagesstunden der Sommermonate des entsprechend der „Heißer Sommer“ TRY für die Region 12 modifizierten Datensatzes für Konstanz, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen, verglichen mit der für die Sommermonate des Ist-Zustands, ebenfalls vor allem im oberen und unteren Bereich stark verändert aus. Extremere Klassen, die sehr hohe oder sehr niedrige PET-Werte repräsentieren, haben erneut deutliche Anteile auf Kosten der Klassen gemäßigerer PET-Werte hinzugewonnen. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei den Tagesstunden der Sommermonate des modifizierten Datensatzes auf 2.6 %, was eine starke Zunahme ihres Anteils um 2.5 % entspricht. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C steigt fast ebenso deutlich um 1.7 % auf 2.7 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt dagegen nur eine sehr leichte Zunahme ihrer Häufigkeit. Diese steigt um 0.1 % womit die Klasse auf einen Anteil von 6.1 % kommt. Alle Klassen in der Mitte der Verteilung zeigen rückläufige Häufigkeiten. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C verzeichnet dabei einen deutlichen Rückgang um 4.0 % auf nur noch 10.0 %. Noch deutlicher fällt der Anteil der nächsthöheren Klasse. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C fällt sogar um 5.2 % auf 13.3 %, was nur noch dem viert-größten Anteil entspricht. Der Anteil der Klasse von 23 °C bis 29 °C fällt noch deutlicher um 7.6 % auf 17.7 %. Sie ist somit aber trotzdem die häufigste Klasse für die Tagstunden der Sommermonate des entsprechend der „Heißer Sommer“ TRYs der Region 12 modifizierten Datensatzes für Konstanz. Der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C sinkt ebenfalls, jedoch deutlich schwächer um 5.4 % auf 17.2 %. Dies entspricht dem zweitgrößten Anteil für die Tagstunden. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte nehmen hingegen wieder zu. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt um 2.6 % auf 13.5 %. Die Häufigkeit der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt jedoch extrem um 15.3 % an. Ihre Häufigkeit liegt damit bei 16.9 %. Dies entspricht dem drittgrößten Anteil der Verteilung.

Für die Nachtstunden bietet sich ein etwas anderes Bild (Abb. 2.19 rechts). Die Verteilung der Ergebnisse für PET ist stark in Richtung der niedrigen Klassen verschoben. Trotzdem haben auch heiße Klassen Anteile hinzugewonnen. Für die Nachtstunden der Sommermonate des unveränderten Datensatzes für Konstanz (Ist-Zustand) entfallen so nur 1.9 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4°C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist mit 13.8 % der Nachtstundenwerte schon deutlich häufiger. Den mit deutlichem Abstand größten Anteil von 42.5 % weist jedoch die Klasse von 8 °C bis 13 °C aus. Aber auch die Klasse von 13 °C bis 18 °C hat mit 33.8 % noch einen sehr großen Anteil. Einen viel kleineren Anteil von nur 6.8 % entfällt auf die Klasse von 18 °C bis 23°C. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur noch sehr geringe Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte abnehmend. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C kommt so immerhin noch auf 1.1 %, während die Klasse von 29 °C bis 35 °C nur noch weniger als 0.1 % der Werte repräsentiert. Beide darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von weniger als 0.1 % für die Nachtstunden der Sommermonate des Ist-Zustandes für Konstanz ebenfalls nicht mehr von Bedeutung.

Bei den Nachtstunden der Sommermonate des entsprechend der „Heißer Sommer“ TRYs modifizierten Datensatzes (des Zukunftsszenarios) für Konstanz, sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen

ebenfalls deutlich extremer aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios deutlich häufiger vor als im Ist-Zustand. Aber auch die Klassen mit sehr niedrigen PET-Werten konnten ihren Anteil vergrößern. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C für die Nachtstunden der Sommermonate des modifizierten Datensatzes für Konstanz auf 4.3 %, was einen Anstieg ihrer Häufigkeit um 2.4 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt, wie die für alle Klassen des unteren mittleren Bereichs der Verteilung, deutlich um 2.4 % auf nur noch 11.4 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt jedoch eine weit größere Abnahme ihrer Häufigkeit. Sie verliert 12.9 % und kommt so insgesamt nur noch auf 29.6 %. Sie ist damit jedoch immer noch die zweit häufigste Klasse für die Nachtstunden. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C sinkt wieder etwas leichter um 2.9 %. Damit repräsentiert die Klasse 30.9 % der Nachtstunden, was dem größten Anteil entspricht. Die Anteile aller höheren Klassen nehmen dagegen zu. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt sehr stark um 9.3 %, womit diese insgesamt auf 16.0 % kommt. Auch die Häufigkeit der Klasse 23 °C bis 29 °C steigt noch deutlich um 4.9 % auf 6.1 %. Die Häufigkeit der Klasse von 29 °C bis 35 °C nimmt ebenfalls noch deutlich um knapp 1.3 % zu, wodurch sie insgesamt rund 1.3 % der Nachtstunden repräsentiert. Die Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt ebenfalls leicht um 0.2 % an. Da sie im Ist-Zustand weit unter 0.1 % der Nachtstunden repräsentiert, entspricht dies auch ihrem Anteil im Zukunftsszenario. Dasselbe gilt für die Klasse mit extremem Hitzestress, deren Häufigkeit um 0.1 % steigt.

2.1.7 DISKUSSION

Die Analyse der Test Referenz Jahre erlaubt einen guten, regional differenzierten Überblick über das thermische Bioklima der nahen Zukunft in den verschiedenen Regionen. Dies erlaubt auch eine Abschätzung der Entwicklung für die in den jeweiligen TRY-Regionen liegenden Projektstädte.

Werden die berechneten Entwicklungen jedoch auf die Messdaten angewandt, zeigt sich, dass die TRY-Datensätze nicht hinreichend homogen sind um eine solche Analyse zu erlauben. Die Ursache hierfür dürfte in der Konzeption und Berechnungsmethodik der TRY-Datensätze liegen. So bestehen diese nicht aus homogenen Mittelwerten, sondern bilden ein Jahr mit typischen Witterungsverläufen ab. Haben sich diese zwischen dem Ist-Zustand und dem Zukunftsszenario stark verändert, entstehen daraus weit größere Differenzen als sie aus gemittelten Werten entstehen würden. Dies führt zu einer Überschätzung der Häufigkeit extremer PET-Klassen. Während die allgemeine Tendenz gut wieder gegeben wird, kann aus dem Vergleich der Entwicklung der einzelnen TRY-Regionen und der daraus errechneten Entwicklung in den Projektstädten eine Verschiebung der Häufigkeiten zugunsten der Klassen für PET von < 4 °C und ≥ 35 °C gelesen werden. Diese ist bei der Interpretation der Ergebnisse unbedingt zu berücksichtigen.

2.2 ENTWICKLUNG NACH REMO

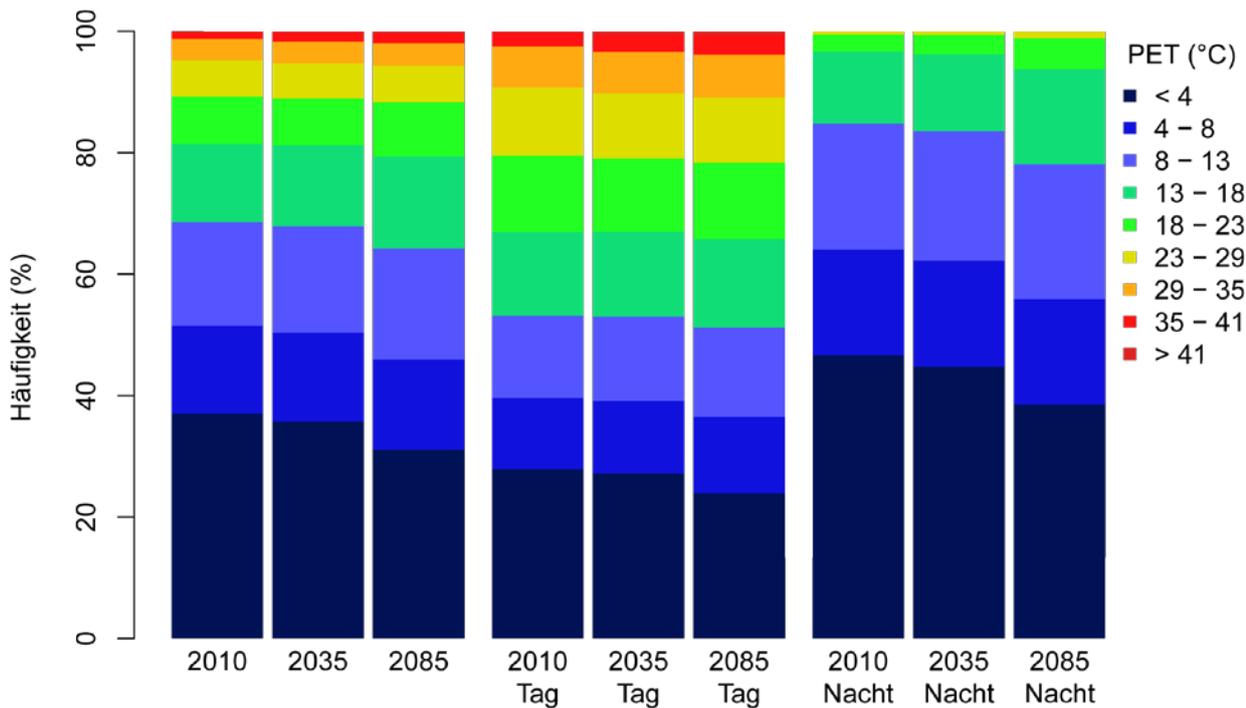
Das Regionalmodell REMO ist ein dreidimensionales, hydrostatisches, atmosphärisches Zirkulationsmodell, das die relevanten physikalischen Prozesse unter Berücksichtigung nicht-linearer Zusammenhänge dynamisch berechnet. Subskalige Prozesse, d.h. nicht vom Modell auflösbar (z.B. Konvektionsbildung, kleinräumige Windsysteme, Turbulenzen), werden durch so genannte physikalische Parametrisierungen berechnet (Jacob et al. 2001, 2007). REMO, das aus dem Europamodell des Deutschen Wetterdienstes entstand (Majewski 1991), wird durch das globale gekoppelte Atmosphäre-Ozean-Modell ECHAM5/MPI-OM angetrieben. Die horizontale Auflösung des Atmosphärenmodells ECHAM5 beträgt dabei 1.875° entsprechend einem Gitterabstand von etwa 200 km am Äquator, während die des Ozeanmodells (MPI-OM) 1.5° entsprechend etwa 160 km am Äquator beträgt. Im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden regionale Klimasimulationen für Deutschland am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg durchgeführt. Diese Simula-

tionen sollen detailliertere Informationen über regionale Änderungen des Klimas liefern. Sie liegen in einer horizontalen Auflösung von 0.088° (~ 10 km) vor. Die zeitliche Auflösung beträgt hierbei bis zu einer Stunde.

Mit Hilfe der REMO Daten für die jeweiligen Gitterzellen wurde das thermische Bioklima der Projektstädte in drei Zeiträumen abgeschätzt. Diese sind die Jahre 1970 bis 2000, die als Ist-Zustand verwendet wurden, ein Zukunftsszenario "2035", das aus den Jahren 2020 bis 2050 berechnet wurde und ein Zukunftsszenario "2085", das aus den Jahren 2070 bis 2100 bestimmt wurde. Anschließend wurde die jeweilige Abweichung der Mittel der beiden Zukunftsszenarien vom Ist-Zustand für alle relevanten Parameter bestimmt und in die bestehenden Datensätze der Messdaten der jeweiligen Stadt eingerechnet.

2.2.1 ENTWICKLUNG DES THERMISCHEN BIOKLIMAS IN FREIBURG

Auch für die Stadt Freiburg wurde der aus den Messdaten der Station Freiburg bestehende Ist-Zustand mit den zwei Zukunftsszenarien „2035“ und „2085“ verglichen und die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) errechnet. Die Verteilungen der Ergebnisse für PET der Zukunftsszenarien wurden jeweils der ursprünglichen Verteilung (IST) gegenübergestellt (vergl. Abb. 2.20links). In der ursprünglichen Verteilung entfallen dabei 37.0 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4°C . Sie ist somit die häufigste der Verteilung. Die Klasse von 4°C bis 8°C ist die dritthäufigste und deckt 14.5 % der Stundenwerte ab. Mit 17.0 % ist die Klasse von 8°C bis 13°C die zweit häufigste. In den Bereich von 13°C bis 18°C fallen immerhin noch 12.9 % der Ergebnisse. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse von 18°C bis 23°C 7.8 %, von 23°C bis 29°C nur noch 6.0 %, für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29°C bis 35°C 3.5 % und 1.1 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35°C bis 41°C). Die Klasse mit extremem Hitzestress ($\text{PET} \geq 41^\circ\text{C}$) kommt im Ist-Zustand für Freiburg in 0.1 % der Stunden vor. Dies entspricht ca. 9 Stunden im Jahr. Der oben beschriebene Ist-Zustand für Freiburg wurde den zwei Zukunftsszenarien, die jeweils ein mittleres Jahr für 2035 und 2085 zeigen, gegenübergestellt. Die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen der PET-Werte der beiden Zukunftsszenarien ähnelt sich auf den ersten Blick, ist jedoch zunehmend in Richtung der wärmeren Klassen verschoben (vergl. Abb. 2.20 links). In beiden Fällen haben die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, Anteile auf Kosten der Klassen niedrigerer PET-Werte hinzugewonnen. Betrachtet man zunächst das Zukunftsszenario 2035, so kommt die Klasse für PET von kleiner als 4°C nur noch auf 35.7 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 1.3 % bedeutet.



Entwicklung von PET in Freiburg

Abb. 2.20: Vergleich des thermischen Bioklimas des Ist-Zustands aus den Messdaten („2010“) mit den beiden Zukunftsszenarien für die Periode 2020 2050 („2035“) und 2070 2100 („2085“) in Freiburg. Unterschieden wird außerdem zwischen dem ganzen Tag (0 bis 24 Uhr, links), den Tagstunden (7 bis 18 Uhr, Mitte) und den Nachtstunden (19 bis 6 Uhr, rechts).

Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C nimmt dagegen in deutlich schwächerem Umfang um 0.2 % auf 14.7 % zu. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt wieder eine etwas deutlichere, aber immer noch schwache Zunahme ihrer Häufigkeit um 0.5 % auf 17.5 %. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C ist ebenfalls leicht zunehmend. Ihre Häufigkeit steigt schwach um 0.5 % und verbleibt damit bei 13.4 %. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C zeigt dagegen eine leichte Abnahme um 0.1 % auf 7.7 %. Ebenfalls abnehmend ist der Anteil der Klasse von 23 °C bis 29 °C, der in wenig größerem Umfang von 0.2 % auf 5.8 % zurückgeht. Der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C ändert sich hingegen fast gar nicht. Er nimmt um weniger als 0.1 % zu und verbleibt so bei 3.5 %. Alle höheren Klassen weisen dagegen steigende Häufigkeiten auf. Der Anteil der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C steigt wieder etwas stärker um 0.3 % auf 1.5 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt wieder etwas schwächer um 0.1 % an, womit sie 0.3 % aller Stundenwerte des Zukunftsszenarios 2035 für Freiburg repräsentiert. Dies entspricht ca. 26 Stunden pro Jahr.

Betrachtet man dagegen das Zukunftsszenario 2035 für Freiburg, so kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C nur noch auf 31.0 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 6.0 % gegenüber dem Ist-Zustand bedeutet. Der Rückgang ist somit noch einmal sehr viel deutlicher als für das Zukunftsszenario 2035. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C steigt dagegen leicht um 0.4 % auf dann 14.9 %. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt eine etwas stärkere Zunahme ihrer Häufigkeit um 1.3 % auf 18.3 %. Der Anteil der Klasse von 13 °C bis 18 °C nimmt noch stärker um 2.3 % gegenüber dem Ist-Zustand ab und verbleibt schließlich bei 15.1 %. Die Anteile der höheren PET Klassen weisen wieder geringere Zunahmen auf. So steigt der der Klasse 18 °C bis 23 °C bereits schwächer um 1.1 % auf 9.0 %, während der der Klasse von 23 °C bis 29 °C sich im Zukunftsszenario 2085 nicht vom Ist-Zustand für Freiburg unterscheidet und bei 6.0 % verbleibt. Der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt dagegen wieder leicht um 0.2 % auf 3.7 %. Der der Klasse mit

starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C nimmt sogar um 0.7 % auf 1.6 % zu. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt wieder schwächer um 0.2 % an, womit sie 0.3 % aller Stundenwerte des Zukunftsszenarios 2085 für Freiburg repräsentiert. Dies bedeutet für ein Jahr der Periode 2070 bis 2100 in Freiburg durchschnittlich 26 Stunden mit extremem Hitzestress.

Um ein differenzierteres Bild zu erhalten wurde wieder zwischen Tag- und Nachtstunden unterschieden. Tagstunden sind dabei alle Stunden von 7 bis 18 Uhr lokaler Standardzeit. Nachtstunden sind entsprechend 19 bis 24 Uhr, sowie 1 bis 6 Uhr. Werden wieder die thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) zugrunde gelegt, entfallen im Ist-Zustand, der aus den Messdaten für Freiburg besteht, 27.9 % aller Tagesstundenwerte auf die Klasse kleiner als 4 °C (vergl. Abb. 2.20 Mitte), die damit am häufigsten vorkommt. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die fünft häufigste und deckt 11.7 % der Stundenwerte ab. Mit 13.5 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die dritthäufigste Klasse der Tagesstundenwerte des Ist-Zustands in Freiburg. Eine noch etwas größere Häufigkeit weist die Klasse von 13 °C bis 18 °C auf, auf die 13.8 % der Tagesstunden entfallen, was dem zweitgrößten Anteil entspricht. Die Klasse von 18 °C bis 23 °C deckt 12.6 % der Tageswerte ab. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C kommt im Ist-Zustand auf 11.2 %. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So betragen die Anteile für die Klasse mit moderatem Hitzestress von 29 °C bis 35 °C 6.8 % und nur noch 2.2 % für die Klasse mit starkem Hitzestress (35 °C bis 41°C). 0.3 % der Ergebnisse für die Tagstunden im Ist-Zustand für Freiburg fallen in die Klasse mit extremem Hitzestress ($PET \geq 41^\circ\text{C}$).

Bei den Tagesstunden des Zukunftsszenarios 2035 für Freiburg sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen deutlich in Richtung der wärmeren Klassen verschoben aus. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei den Tagesstunden Zukunftsszenarios 2035 noch auf 27.2 %, was einen Rückgang ihres Anteils um 0.7 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C steigt dagegen leicht an. Sie nimmt um 0.3 % auf 12.0 % zu. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt wieder eine etwas stärkere Zunahme ihrer Häufigkeit um 0.4 % auf 13.9 %. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C gewinnt ebenfalls etwas an Häufigkeit. Ihr Anteil steigt um 0.2 % auf 14.0 %. Der der Klasse 18 °C bis 23 °C geht dagegen deutlich zurück. Er nimmt um 0.6 % ab, womit der Klasse ein Anteil von 12.0 % verbleibt. Auf eine leicht schwächere Abnahme ihres Anteils kommt die Klasse von 23 °C bis 29°C, deren Häufigkeit um 0.5 % auf 10.7 % zurückgeht. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte nehmen dagegen wieder zu. So steigt der der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 0.1 % auf 6.8 % und der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 0.7 % auf 2.9 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt ebenfalls. Ihr Anteil nimmt jedoch deutlich schwächer um nur 0.3 % zu. Ihre Häufigkeit liegt damit bei 0.5 %, was im Zukunftsszenario 2035 für Freiburg ca. 22 Stunden im Jahr mit extremem Hitzestress bedeutet.

Bei den Tagesstunden des Zukunftsszenarios 2085 für Freiburg sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen, verglichen mit dem Ist-Zustand, noch etwas stärker in Richtung der heißeren Klassen verschoben aus als für das Zukunftsszenario 2035. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C bei den Tagesstunden des Zukunftsszenarien 2085 nur noch auf 12.9 %, was eine Abnahme ihres Anteils um 4.0 % gegenüber dem Ist-Zustand bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C steigt dagegen. Sie nimmt um 0.8 % auf 12.5 % zu. Die Klasse von 8 °C bis 13 °C zeigt eine stärkere Zunahme ihrer Häufigkeit um 1.2 % auf 14.7 %. Die Klasse von 13 °C bis 18 °C gewinnt ebenfalls an Häufigkeit. Ihr Anteil steigt um 0.9 % auf 14.6 %. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C verändert sich dagegen fast nicht. Er geht um weit weniger als 0.1 % zurück, womit der Klasse ein Anteil von 12.6 % verbleibt. Deutlich stärker fällt der Anteil der Klasse von 23 °C bis 29°C, deren Häufigkeit um 0.5 % auf 10.7 % zurückgeht. Die Anteile aller Klassen höherer PET-Werte sind dagegen wieder zunehmend. So steigt der Anteil der Klasse von 29 °C bis 35 °C um 0.3 %

auf 7.1 % und der der Klasse mit starkem Hitzestress von 35 °C bis 41 °C um 0.9 % auf 3.2 %. Der Anteil der heißesten Klasse, die extremen Hitzestress repräsentiert, steigt dagegen wieder etwas schwächer. Ihr Anteil nimmt um 0.4 % zu. Ihre Häufigkeit liegt damit bei 0.7 %, was für das Zukunftsszenario 2085 für Freiburg ca. 31 Stunden im Jahr mit extremem Hitzestress bedeutet.

Für die Nachtstunden bietet sich ein etwas anderes Bild (vergl. Abb. 2.20 rechts). Die Verteilung der Ergebnisse für PET ist stark in Richtung der niedrigen Klassen verschoben. Für die Nachtstunden des Ist-Zustands für Freiburg entfallen so 46.6 % aller Stundenwerte auf die Klasse kleiner als 4°C. Die Klasse von 4 °C bis 8 °C ist die dritthäufigste und deckt 17.4 % der Nachtstundenwerte ab. Mit 20.8 % ist die Klasse von 8 °C bis 13 °C die zweit häufigste. Auch die Klasse von 13 °C bis 18 °C hat mit 11.9 % noch einen deutlich zweistelligen Anteil. Die Klassen für höhere PET-Werte erreichen nur noch einstellige Anteile. Diese sind für steigende PET-Werte schnell abnehmend. So deckt die Klasse von 18 °C bis 23 °C 2.8 % der Nachtstunden ab. Einen noch geringeren Anteil weist die Klasse von 23 °C bis 29 °C auf, die nur 0.5 % der Nachtstunden repräsentiert. Alle darüber liegenden Klassen sind mit Anteilen von weniger als 0.1 % für die Nachtstunden des Ist-Zustands für Freiburg bedeutungslos.

Beim Zukunftsszenario 2035 für Freiburg sieht die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen für die Nachtstunden ähnlich aus. Die Klassen, die höhere PET-Werte repräsentieren, kommen für die Nachtstunden des Zukunftsszenarios jedoch etwas häufiger vor als im Ist-Zustand. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im Zukunftsszenario 2035 immer noch auf 44.8 %, was jedoch einen deutlichen Rückgang ihres Anteils um 7.9 % bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C steigt dagegen leicht um 0.1 % auf insgesamt 17.5 %. Einen etwas stärkeren Anstieg verzeichnet die Klasse von 8 °C bis 13°C, deren Häufigkeit um 0.5 % auf insgesamt 21.3 % steigt. Auch die Anteile aller Klassen für höhere PET-Werte nehmen zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C um 0.8 %. Damit repräsentiert die Klasse 12.7 % der Nachtstunden. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt wieder schwächer um 0.4 %, womit diese insgesamt auf nur 3.2 % kommt. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C verzeichnet ebenfalls einen leichten Anstieg ihrer Häufigkeit. Dieser ist jedoch mit 0.1 % gering, wodurch die Klasse schließlich auch nur 0.5 % der Nachtstunden repräsentiert. Der Anteil der nächsthöheren Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt noch leicht an. Der Anstieg bleibt jedoch deutlich unter 0.1 %. Da ihr Anteil auch im Ist-Zustand deutlich unter 0.1 % lag, kommt sie auch im Zukunftsszenario insgesamt auf deutlich unter 0.1 % der Nachtstunden. Die Anteile der beiden wärmeren Klassen steigen ebenfalls leicht an. Ihre Häufigkeit bleibt jedoch im Zukunftsszenario 2035 für Freiburg deutlich unter 0.1 %. Beim Zukunftsszenario 2085 für Freiburg ähnelt die Verteilung der thermischen Empfindungsklassen für die Nachtstunden kaum von der für das Zukunftsszenario 2035. Insgesamt scheint sie jedoch noch einmal deutlich in Richtung der heißeren Klassen verschoben. So kommt die Klasse für PET von kleiner als 4 °C im Zukunftsszenario 2085 noch auf 38.6 %, was jedoch einen deutlicheren Rückgang ihres Anteils als für das Zukunftsszenario 2035 um 8.1 % gegenüber dem ist-Zustand bedeutet. Die Häufigkeit der Klasse 4 °C bis 8 °C fällt dafür schwächer um weit weniger als 0.1 %, so dass sie bei 17.4 % verbleibt. Einen deutlichen Anstieg verzeichnet dagegen die Klasse von 8 °C bis 13°C, deren Häufigkeit um 1.4 % auf insgesamt 22.2 % steigt. Die Anteile aller Klassen für höhere PET-Werte nehmen ebenfalls zu. So steigt der der Klasse von 13 °C bis 18 °C sogar um 3.8 %. Damit repräsentiert die Klasse 15.7 % der Nachtstunden. Der Anteil der Klasse 18 °C bis 23 °C steigt wieder schwächer um 2.3 %, womit diese insgesamt auch nur auf 5.1 % kommt. Die Klasse von 23 °C bis 29 °C verzeichnet ebenfalls einen Anstieg ihrer Häufigkeit. Dieser ist jedoch mit 0.6 % deutlich geringer, wodurch die Klasse schließlich auch nur 1.0 % der Nachtstunden repräsentiert. Der Anteil der nächsthöheren Klasse von 29 °C bis 35 °C steigt um etwas weniger als 0.1 %. Da ihr Anteil für das Ist-Szenario unter 0.1 % lag, kommt sie im Zukunftsszenario damit ins-

gesamt gerade so auf 0.1 % der Nachtstunden. Die Klasse von 35 °C bis 41°C, die starken Hitzestress repräsentiert, kommt im Zukunftsszenario 2085 genauso wenig vor wie die Klasse mit extremem Hitzestress.

2.3 ZUSAMMENFASSUNG

Betrachtet man PET für die fünf Projektstädte vergleichend für die Perioden 1970 – 2000, 2020 – 2050 und 2070 – 2100 zeigt sich eine deutliche Zunahme des Auftretens von thermischen Klassen mit großer Wärmebelastung. Dies kann bei allen untersuchten Städten beobachtet werden. Unterschiede zeigen sich jedoch im Umfang der Zunahme (vgl. Tab. 2.1). Eine deutliche Variation zeigt sich dabei nicht nur zwischen den Städten, sondern auch durch die zugrunde liegenden Regionalmodelle. Diese errechnen zwar denselben Trend, divergieren jedoch im Umfang der Änderungen. Die Ergebnisse für die Test Referenzjahre scheinen dabei überschätzt. Die auf Grundlage der REMO Datensätze sind dagegen eher gemäßigt. Selbst die gemäßigtsten Ergebnisse zeigen jedoch eine deutliche Zunahme an Stunden mit thermischem Hitzestress vor allem für die Tagstunden der Sommermonate. Es ist jedoch auch ein Trend hin zu Klassen mit größerer Wärmebelastung während der Nachtstunden zu beobachten. Diese kann durch die Speicherwirkung der Gebäude lokal noch weit größer ausfallen und sich auf die Nachtruhe auswirken.

Tab. 2.1: Überblick über die Änderung des thermischen Bioklimas der Städte über das ganze Jahr repräsentiert durch den thermischen Index PET auf Basis von TRY Datensätzen von 2010 bis 2035. Alle Zahlen sind durchschnittliche Stunden des Auftretens der jeweiligen Klasse.

	< 4°C		13 – 29°C		> 35°C	
	IST	Änderung	IST	Änderung	IST	Änderung
Karlsruhe	3380	-149	2308	-127	182	411
Mannheim	3479	-213	2236	-79	157	377
Freiburg	3243	-194	2338	177	112	199
Ulm	4004	424	2080	-314	96	270
Konstanz	3607	-13	2087	-207	155	325

Tab. 2.2: Überblick über die Änderung des thermischen Bioklimas der Städte über das ganze Jahr repräsentiert durch den thermischen Index PET auf Basis von TRY Datensätzen von 2010 bis 2035. Alle Zahlen sind durchschnittliche Stunden des Auftretens der jeweiligen Klasse.

	< 4°C		13 – 29°C		> 35°C	
	IST	Änderung	IST	Änderung	IST	Änderung
Karlsruhe	87	268	4614	-732	657	969
Mannheim	105	205	4653	-639	554	919
Freiburg	59	122	4970	-363	408	959
Ulm	215	425	4472	-897	363	979
Konstanz	87	216	4361	-243	548	802

3 Adaptations- und Mitigationsmöglichkeiten

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden Adaptations- und Mitigationsmöglichkeiten für Städte in Bezug auf Grünflächen und Vegetation untersucht. In bestehenden Studien wurde für Mitteleuropa der Einsatz von städtischem Grün als praktikabelster Weg identifiziert (Matzarakis und Endler 2010, Matzarakis 2013). Um der Effekt Vegetation auf das thermische Mikroklima zu quantifizieren wurden für verschiedene exemplarische Szenarien jeweils eine mit und eine ohne Begrünung gegenübergestellt.

3.1 EINFLUSS VON STÄDTISCHEM GRÜN

Zur Abschätzung der Möglichkeiten zur Reduktion von thermischem Hitzestress durch den Einsatz städtischen Grüns wurden Simulationen mit Hilfe des Modells ENVI-met durchgeführt (Bruse und Fleer 1998). Berechnet wurden dabei sechs verschiedene Szenarien, in denen städtisches Grün unterschiedlicher Art in verschiedenen Kombinationen eingesetzt wurde.

Alle Szenarien weisen 60 Zellen in x- und y- Richtung auf und sind 30 Zellen hoch. Die Zellweite beträgt in jede Richtung 2 m. Alle Modellgebiete sind somit $120 \cdot 120 \cdot 60$ m groß. Alle Szenarien weisen prinzipiell dieselbe Anordnung von Gebäuden und Straßen auf. Lediglich in den drei Park-Szenarien sind zwei der Gebäude und die zwischen ihnen liegende Straße durch einen Park ersetzt. Die Gebäude selbst haben in allen Szenarien eine Grundfläche von $42 \cdot 14$ m und sind 15 m hoch. Sie sind parallel in x-Richtung in zwei Spalten angeordnet und von einem gepflasterten Gehweg umgeben. Die zwischen ihnen liegenden Straßen haben einen Belag aus Asphalt.

Die meteorologischen Eingangsdaten sind ebenfalls für alle Szenarien identisch um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Sie sind den meteorologischen Messdaten der Station Karlsruhe entnommen und stellen den Beginn einer Serie warmer Strahlungstage ab dem 19.08.2005 dar. Die einzelnen verwendeten meteorologischen Eingangsparameter und Einstellungen können Tab. 3.1 entnommen werden.

Tab. 3.1: Eingangsgrößen und Einstellungen für alle ENVI-met Simulationen.

Parameter	Wert	Einheit
Startdatum	19.08.2005	
Startuhrzeit	04:00	
Simulationsdauer	24	h
Windgeschwindigkeit in 10 m ü. Grund	3	m/s
Windrichtung (0 - 359)	225	°
Rauigkeitslänge	0.1	m
Potentielle Temperatur	289.75	K
Spezifische Feuchte in 2500 m	10.55	g Wasser / kg Luft
Relative Luftfeuchte in 2 m	60	%

Zunächst wurde ein Referenzszenario „Straße ohne Grün“ erstellt, welches aus Gebäuden, Gehwegen und Straßen besteht. Verglichen wurde es mit einem Szenario mit grünen Fassaden („Fassadengrün“) und mit

einem Szenario mit Bäumen mit großen Kronendurchmessern entlang der Straßen („Straße mit Bäumen“). Zusätzlich wurden drei Szenarien mit einem Park berechnet. Im ersten der drei Parkszenarien enthält dieser lediglich eine Rasenfläche mit einer umgebenden Hecke („Park mit Rasen“). Ein weiteres Parkszenario weist einzelne Bäume auf der Rasenfläche auf („Park mit Bäumen“). Ein drittes Parkszenario enthält schließlich eine größere Anzahl dicht stehender Bäume verschiedener Größe auf derselben Fläche („Park mit vielen Bäumen“). Die einzelnen Szenarien wurden mit ENVI-met (Abschnitt 3.1.1) berechnet und sind in den folgenden Absätzen im Detail beschrieben.

3.1.1 ENVI-met

ENVI-met (Bruse und Fleer 1998, Bruse 1999) ist ein prognostisches, dreidimensionales, mikroskaliges Modell zur Berechnung klimatologischer und lufthygienischer Zustände. Toudert (2005) bezeichnet es als eines der ersten Modelle, die versuchen die wichtigsten Prozesse in der Atmosphäre mit Einfluss auf das Mikroklima durch physikalische Berechnungen zu beschreiben. ENVI-met setzt sich im Wesentlichen aus drei Submodellen zusammen, dem Atmosphärenmodell, dem Bodenmodell und dem Vegetationsmodell. Räumlich besteht ENVI-met aus einem Modellkern, der in Gitterzellen unterteilt ist und eine ihn umgebende Randzelle. Diese legt alle Randbedingungen fest und dient auch als Referenz für die Kernzellen. In der Randzelle, die sich vertikal bis weit über den Modellkern hinaus erstreckt, werden zudem die Zustände der gesamten atmosphärischen Grenzschicht modelliert.

Der Modellkern besteht wiederum aus einem Raster von Zellen mit einer typischen horizontalen Auflösung zwischen 0,5 und 10 m. Vertikal sind Auflösungen von einem bis 20 m möglich, wobei die unterste Zelle zur genaueren Berechnung bodennaher Prozesse in fünf Teilzellen gegliedert werden kann. Auflösungen außerhalb dieser Bereiche wirken sich negativ auf die Genauigkeit der Parametrisierung subskaliger Prozesse aus. Für jede dieser Kernzellen werden die drei oben genannten Teilmodelle sowie deren Interaktionen berechnet.

3.1.1.1 ATMOSPHÄRENMODELL

Das in ENVI-met verwendete Atmosphärenmodell umfasst dabei alle relevanten Prozesse, die außerhalb von Boden, Gebäuden oder Vegetation ablaufen. Hierzu zählen vor allem Luftströmung, Lufttemperatur und -feuchtigkeit sowie die verschiedenen Strahlungsflüsse.

Das Atmosphärenmodell beruht hauptsächlich auf der numerischen Annäherung an die Lösung der dreidimensionalen Navier-Stokes Transportgleichung in der nicht hydrostatischen Form. Die bodennahe Luft wird dabei als nicht komprimierbar angenommen. Hierdurch lässt sich der Luftdruck nach dem Boussinesq Verfahren eliminieren, was eine Annäherung an die Lösung der Transportgleichung mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung erlaubt. Die zeitliche Integration erfolgt anhand eines einfachen Vorwärts-Euler Schemas. Aus der Luftströmung wird anschließend die Verteilung von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit berechnet. Dabei finden lokale Quellen und Senken Berücksichtigung. Diese Quellen und Senken befinden sich in Bezug auf die Lufttemperatur vorrangig in Energieumsatzflächen. Probleme entstehen dabei in der Berücksichtigung turbulenter Austauschprozesse. Diese müssen aufgrund der Modellauflösung aufwendig parametrisiert werden. In Bezug auf Quellen und Senken der Luftfeuchtigkeit sind hauptsächlich Pflanzen, unversiegelter Boden und Wasserflächen zu nennen.

Von besonderer Bedeutung für diese Arbeit ist die Berechnung der Strahlungsflüsse. Diese werden in ENVI-met getrennt in langwellige und kurzwellige Strahlung betrachtet. Die aus der Atmosphäre abwärts gerichtete langwellige Strahlung wird dabei hauptsächlich als Funktion der potentiellen Temperatur und des Wasserdampfgehalts der Luft behandelt. Für die Berechnung der kurzwelligen Einstrahlung werden dagegen

noch sehr viele weitere Faktoren, wie beispielsweise Strahlungsintensität der Sonne, Sonnenhöhe sowie Reflexionen zwischen Erdoberfläche und Wolkenunterseite berücksichtigt. Sowohl langwellige als auch kurzwellige Strahlung werden im Modell von Gebäuden und der Vegetation stark beeinflusst. Bäume werden dabei zur Modifikation der Strahlung vereinfacht als trübes Medium behandelt. Die Stärke der Trübung ist dabei abhängig vom Blattflächenindex. Gebäude stellen dagegen solide Hindernisse dar. Für ihren Schatten wird keine direkte Einstrahlung berechnet. Diffuse Strahlung fließt jedoch unter Berücksichtigung des Sky View Faktors in die Berechnung mit ein. Hinzu kommen kurzwellige Reflexionen, die anhand des Mittelwertes der mittleren Albedo aller vorkommenden Wände und der Bodenoberfläche bestimmt werden. Die indirekte langwellige Strahlung wird aus der mittleren Fassadenoberflächentemperatur und deren Ein- und Ausstrahlungsverhalten errechnet.

3.1.1.2 BODENMODELL

Das Bodenmodell ist für die Berechnung aller Vorgänge unterhalb der Erdoberfläche zuständig. Während seine horizontale Erstreckung der des Modellkerns entspricht, liegt die vertikale Erstreckung fix bei 0 m bis -1,75 m. Es ist demnach auch ein Grenzflächenmodell, welches alle Vorgänge an Grenzflächen, wie Gebäudewänden und Dächern berechnet. Über Eigenschaften und Zustände der Oberflächen berechnet es zudem wichtige Informationen für das Atmosphärenmodell. Beispiele hierfür sind Oberflächentemperaturen und Verdunstungsleistung.

3.1.1.3 VEGETATIONSMODELL

Da Vegetation aufgrund selbstständiger aktiver Steuermechanismen nicht als einfache Oberfläche behandelt werden kann, steht für die Berechnung der Prozesse, an denen Pflanzen beteiligt sind, ein eigenes Vegetationsmodell zur Verfügung. Dieses besitzt die wichtige Fähigkeit, mehrere Zellen als eine Pflanze mit einheitlichen physiologischen Zuständen zu betrachten. An das Atmosphärenmodell werden durch das Vegetationsmodell Informationen wie die Oberflächentemperatur der Blätter, der Wärmeaustausch zwischen Pflanze und Atmosphäre und der Einfluss auf den Wasserhaushalt geliefert.

3.1.2 SZENARIO „STRAÙE OHNE GRÜN“

Das erste Szenario ist das Szenario „Straße ohne Grün“. Es dient als Referenzszenario ohne StraÙengrün. Es enthält lediglich 8 mit gepflasterten Gehwegen (in der Breite einer Zelle) umgebene Gebäude, zwischen denen sich asphaltierte Straßen befinden, die den Rest des Raums ausfüllen.

Für einen warmen Sommertag ohne Bewölkung ergeben sich für das Szenario „Straße ohne Grün“ die höchsten Wärmebelastungen aller berechneten Szenarien. PET liegt in 1.5 m Höhe im Median (exklusive der Gebäude) bei 32.7 °C. Auch der Mittelwert ist mit 31.0 °C der höchste der Szenarien.

Die Verteilung von PET im Szenario „Straße ohne Grün“ in 1.5 m Höhe, der Datenebene die am ehesten der Höhe des durchschnittlichen Schwerpunkts eines Menschen von 1.1 m entspricht, zeigt thermisch komfortable Bereiche ausschließlich im Schatten der Gebäude (Abb. 3.1). In der Mitte der Straßen in x-Richtung herrscht dagegen, dank der Windrichtung parallel zu den Gebäuden, nur moderater Hitzestress (vgl. Tab. 1.1). Starker und extremer Hitzestress finden sich dagegen in Bereichen mit geringer Windgeschwindigkeit und ungehinderter Einstrahlung. Dies ist vor allem im Südwesten der Gebäude zu sehen, wo die Staulage zu geringerer Windgeschwindigkeit und die reflektierte kurzwellige Strahlung der Wände sowie die langwellige Ausstrahlung der aufgeheizten Wände zu erhöhten Strahlungsgewinnen führt. Auf der Südostseite der Gebäude findet sich durch die im ähnlichen Umfang erhöhte Einstrahlung starker, jedoch kein extremer Hitzestress, da die Windgeschwindigkeit dort sehr viel höher ist.

3.1.3 SZENARIO „FASSADENGRÜN“

Begrünte Fassaden haben nicht nur einen ästhetischen Effekt sondern verändern auch die Strahlungsbilanz vor der jeweiligen Wand. Um diesen Einfluss abzuschätzen zu können wurde ein Szenario „Fassadengrün“ erstellt. Da ENVI-met in der vorliegenden Version 3.5 keine grünen Fassaden berechnen kann, wurde versucht diese durch eine Hecke in der Höhe des jeweiligen Gebäudes vor allen Wänden zu simulieren.

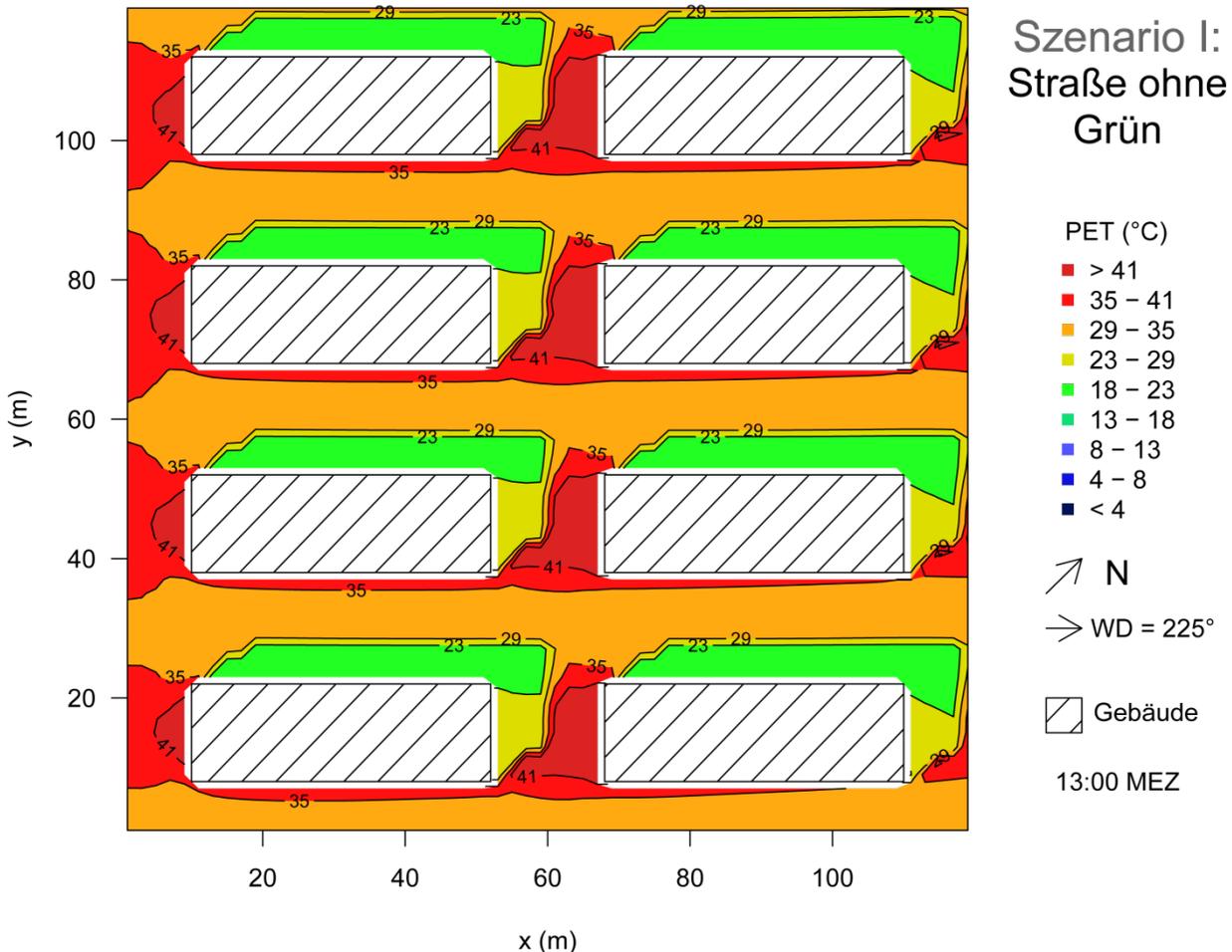


Abb. 3.1: Räumliche Verteilung von PET für das Szenario „Straße ohne Grün“ an einem Sommertag um 13 Uhr lokaler Zeit in einer Höhe von 1.5 m. Die Farben entsprechen den PET Klassen aus Tab. 1.1. Die schraffierten Flächen markieren die Grundfläche der Gebäude. Das Modellgebiet ist um 45 ° gegen die Nordrichtung gedreht.

Für einen warmen Sommertag ergibt sich daraus in einer Höhe von 1.5 m eine insgesamt etwas geringere Wärmebelastung für das Szenario „Fassadengrün“ als für das Szenario „Straße ohne Grün“. So liegt der Mittelwert mit 29.6 °C um 1.4 °C unter dem des Referenzszenarios. Der Median liegt im Szenario „Fassadengrün“ mit 27.2 °C sogar um 5.5 °C niedriger. Der Blick auf die Verteilung der Ergebnisse für PET in einer Höhe von 1.5 m im Szenario „Fassadengrün“ zeigt zunächst stark verkleinerte Bereiche mit moderatem Hitzestress (Abb. 3.2).

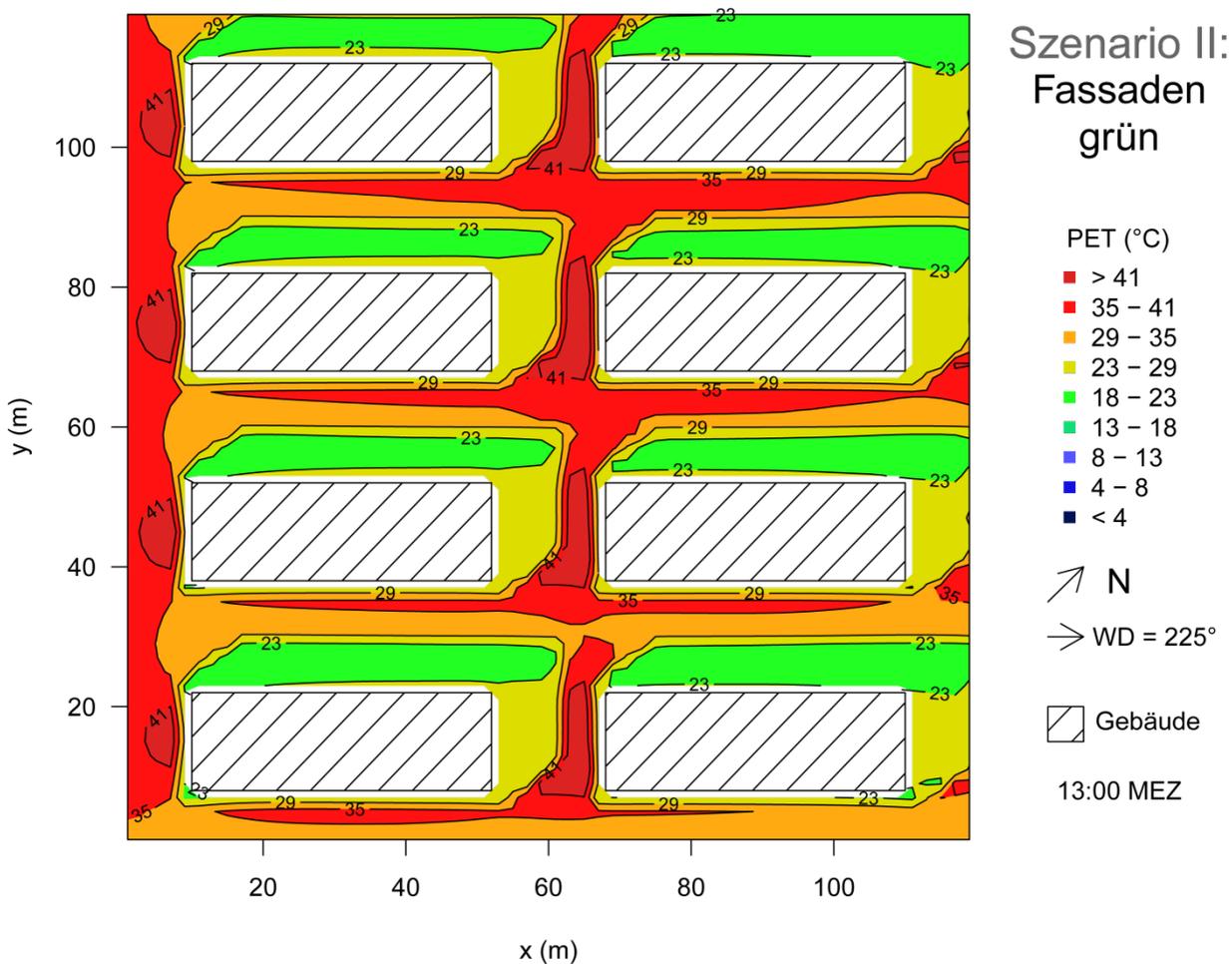


Abb. 3.2: Räumliche Verteilung von PET für das Szenario „Fassadengrün“ an einem Sommertag um 13 Uhr lokaler Zeit in einer Höhe von 1.5 m. Die Farben entsprechen den PET Klassen aus Tab. 1.1. Die schraffierten Flächen markieren die Grundfläche der Gebäude. Das Modellgebiet ist um 45 ° gegen die Nordrichtung gedreht.

Vergrößert haben sich dagegen die Bereiche mit leichtem Hitzestress, aber auch jene mit starkem Hitzestress. Die Bereiche mit extremem Hitzestress sind im Vergleich zum Szenario „Straße ohne Grün“ etwas kleiner.

An der Südostseite der Gebäude ist gut zu sehen, dass das Modell die verringerte Einstrahlung vor den begrünten Wänden berücksichtigt und sich diese auch deutlich auf die Wärmebelastung auswirkt. Da die verwendeten Hecken modellbedingt jedoch deutlich dicker sind als eine reale Fassadenbegrünung verringert sich die Windgeschwindigkeit überproportional. Dies erhöht PET und führt in Teilen des Modellgebiets, vor allem südöstlich der Gebäude in einiger Entfernung von ihnen zu erhöhter Wärmebelastung. Durch diese modellbedingte Unterschätzung der Windgeschwindigkeit ist zu erwarten, dass das Szenario „Fassadengrün“ in der Realität günstiger ausfallen würde, als durch das Modell abgebildet.

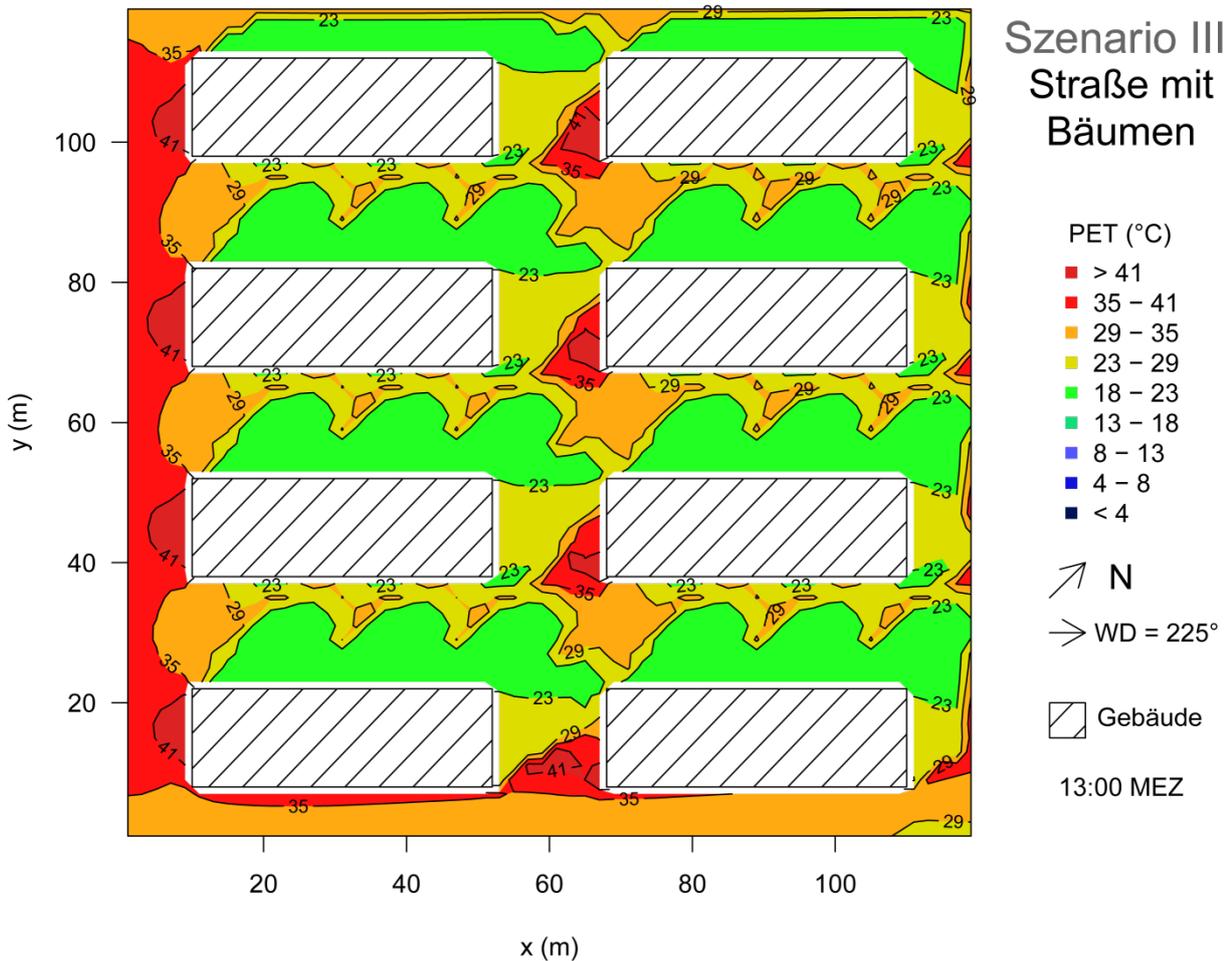


Abb. 3.3: Räumliche Verteilung von PET für das Szenario „Straße mit Bäumen“ an einem Sommertag um 13 Uhr lokaler Zeit in einer Höhe von 1.5 m. Die Farben entsprechen den PET Klassen aus Tab. 1.1. Die schraffierten Flächen markieren die Grundfläche der Gebäude. Das Modellgebiet ist um 45° gegen die Nordrichtung gedreht.

In vielen Studien wurden Straßenbäume als effektivstes Mittel gegen Hitzebelastung in Städten identifiziert (z.B. (Lin et al. 2010)). Auch in dieser Studie soll ihr Nutzen quantitativ aufgezeigt und mit anderen Optionen verglichen werden. Dem Referenzszenario wurden hierzu entlang der Straßen in x-Richtung und der Straße in y-Richtung Bäume mit großen Kronenradien zu beiden Seiten der Straße hinzugefügt. Dabei stehen jeweils 3 Bäume nordwestlich und südöstlich der Gebäude, während in der nordwest-südöstlich verlaufenden Straße an jedem der Gebäude ein Baum steht. Für das so entstandene Szenario „Straße mit Bäumen“ wurde anschließend wieder PET berechnet.

Die Auswertung der Ergebnisse für einen heißen Sommertag um 13 Uhr lokaler Zeit bestätigen die durch vorherige Studien geweckten Erwartungen. Das Szenario „Straße mit Bäumen“ ist im Mittel mit 27.1 °C deutlich kühler als die beiden vorherigen Szenarien. Gegenüber dem Referenzszenario „Straße ohne Grün“ liegt der Mittelwert von PET sogar um 3.8 °C niedriger. Noch deutlicher zeigt sich der Unterschied beim Median für PET. Dieser liegt mit 25.6 °C sogar 7.1 °C unter dem des Szenarios ohne Bäume.

Auch die Verteilung der Ergebnisse für PET in einer Höhe von 1.5 m bestätigt die statistischen Werte. Die grünen Flächen, die thermisch komfortable Bedingungen markieren, nehmen im Szenario „Straße mit Bäumen“ fast die volle Breite der Straßen in x-Richtung ein. Starker oder gar extremer Hitzestress kommen auf diesen Straßen gar nicht mehr vor. Lediglich im Windstau an der Südwestseite der Gebäude finden sich noch Bereiche mit extremem Hitzestress. Diese sind gegenüber dem Szenario „Straße ohne Grün“ jedoch stark verkleinert. Zwar ist die Windgeschwindigkeit im gesamten Szenario stark verringert, doch wird ihr Effekt durch die ebenfalls stark verringerte Einstrahlung mehr als ausgeglichen.

3.2 FERNWIRKUNG VON STÄDTISCHEM GRÜN

Zur Untersuchung der Fernwirkung von städtischen Grünflächen wurden ebenfalls drei ENVI-met Szenarien erstellt und berechnet. Sie unterscheiden sich von den zuvor beschriebenen Szenarien und speziell vom Referenzszenario „Straße ohne Grün“ auf dem sie beruhen dadurch, dass zwei der Gebäude und die zwischen ihnen liegende Straße durch eine Grünfläche ersetzt wurden. Für diesen Park wurden drei verschiedene Ausführungen in drei Szenarien untersucht. Besonderes Augenmerk wurde dabei darauf gelegt, in wie weit sich der luvseitige Park auf das thermische Bioklima der Straßen im Lee auswirkt.

3.2.1 SZENARIO „PARK MIT RASEN“

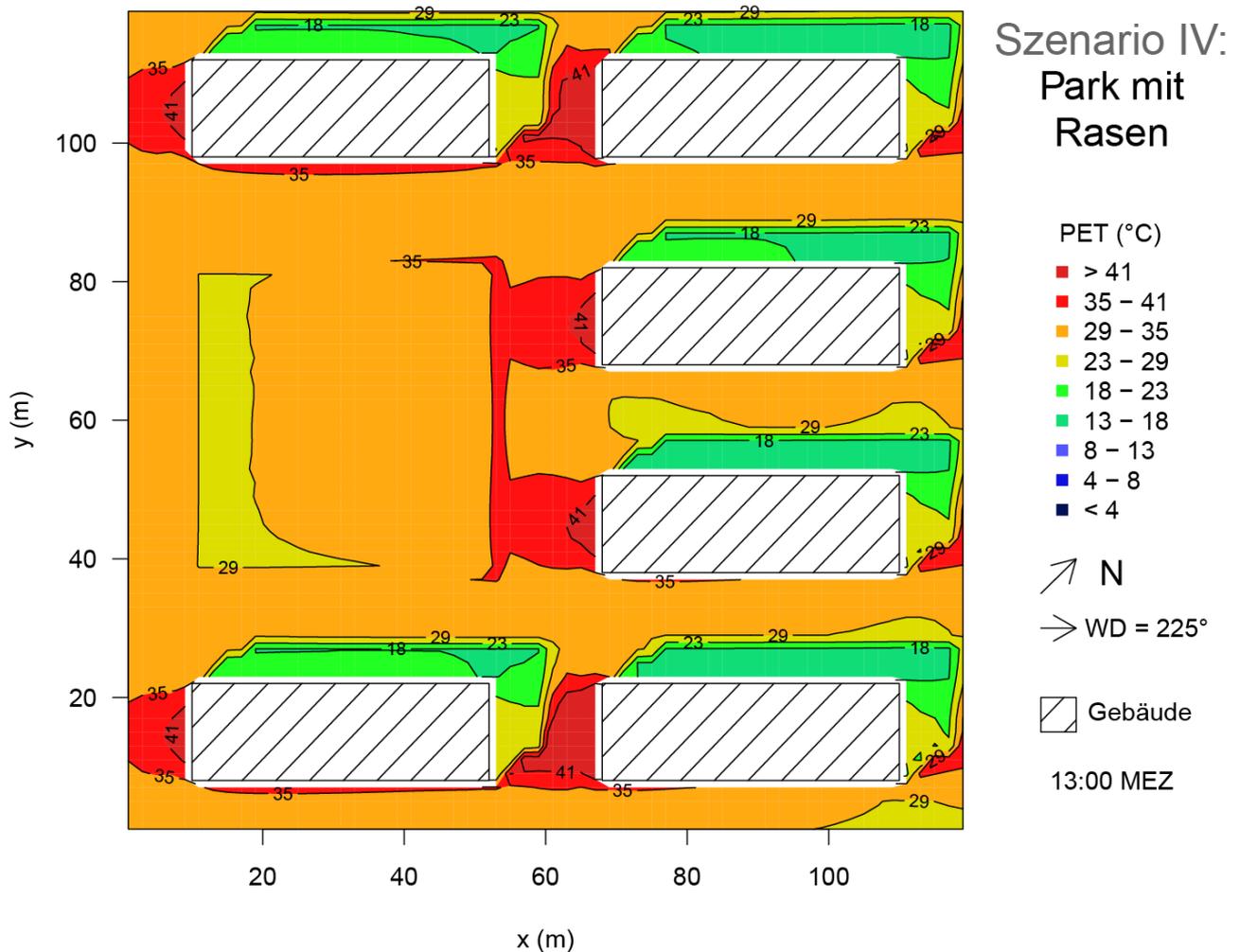


Abb. 3.4: Räumliche Verteilung von PET für das Szenario „Park mit Rasen“ an einem Sommertag um 13 Uhr lokaler Zeit in einer Höhe von 1.5 m. Die Farben entsprechen den PET Klassen aus Tab. 1.1. Die schraffierten Flächen markieren die Grundfläche der Gebäude. Das Modellgebiet ist um 45° gegen die Nordrichtung gedreht.

Das erste der Park Szenarien ist das Szenario „Park mit Rasen“. Bereits die einfache Rasenfläche mit der umschließenden Hecke hat einen großen Einfluss auf das thermische Bioklima des Szenarios. Es ist an einem mittleren Sommertag um 13 Uhr mit einer mittleren PET von 29.5 °C in 1.5 m Höhe 0.5 °C kühler als das Szenario „Straße ohne Grün“. Der Median liegt mit 30.0 °C sogar um 2.7 °C niedriger (Abb. 3.3).

Betrachtet man die Verteilung der Ergebnisse für PET an einem Sommertag um 13 Uhr in 1.5 m Höhe (Abb. 3.4) fällt zunächst die freie Rasenfläche als deutlicher Unterschied zum Referenzszenario auf. Diese weist auf ihrer Luvseite etwas komfortablere Bedingungen auf als auf ihrer Leeseite. Dies ist hauptsächlich der die Rasenfläche umgebenden Hecke geschuldet, die sich als Strömungshindernis erweist und die Windgeschwindigkeit herabsetzt. Besonders deutlich tritt dieser Effekt in Windrichtung, hinter der Hecke die an die Straße in y-Richtung grenzt, auf. Hier bildet sich, verglichen mit dem Szenario „Straße ohne Grün“, ein deutlich vergrößerter Bereich mit starkem Hitzestress. Da die Rasenfläche mit der Hecke jedoch insgesamt ein geringeres Strömungshindernis darstellt als die zwei Gebäude im Referenzszenario, ist PET im Szenario „Park mit Rasen“ im Lee der Rasenfläche etwas geringer. Dies zeigt sich besonders deutlich auf der Nordwestseite der Gebäude im Lee der Rasenfläche, in deren Schatten sogar leichter Kältestress auftritt.

3.2.2 SZENARIO „PARK MIT BÄUMEN“

In einem weiteren Szenario wurden dem Park einige Bäume hinzugefügt. Mit dem so entstandenen Szenario „Park mit Bäumen“ sollte untersucht werden, in wie weit die eingesetzten neun einzeln stehenden Bäume den Einfluss des Parks verstärken. Statistisch ist dieser Einfluss deutlich. PET liegt im Szenario „Park mit Bäumen“ an einem warmen Sommertag in einer Höhe von 1.5 m im Mittel bei 27.0 °C. Das Szenario ist damit um 2.4 °C kühler als das Szenario „Park mit Rasen“ und sogar 4.0 °C kühler als das Referenzszenario „Straße ohne Grün“. Da die Abkühlung räumlich ungleichmäßig verteilt ist, sind die Unterschiede im Median geringer. Dieser liegt für das Szenario „Park mit Bäumen“ bei 28.9 °C und damit 3.8 °C unter dem des Referenzszenarios. Gegenüber dem Parkszenario ohne Bäume liegt der Median für PET um 1.1 °C niedriger.

Die Verteilung von PET in einer Höhe von 1.5 m für das Szenario „Park mit Bäumen“ (Abb. 3.5) zeigt zunächst vor allem die Auswirkungen des veränderten Windfeldes. Durch die Bäume des Parks wird mehr Luft um selbigen herum gelenkt, so dass nun auch in den beschatteten Bereichen der benachbarten Seitenstraßen eine Abkühlung zu verzeichnen ist. Insgesamt ist der Einfluss außerhalb des Parks jedoch weiterhin sehr gering. Deutlich kühlere Bereiche sind nur im Schatten unter den zusätzlichen Bäumen zu finden.

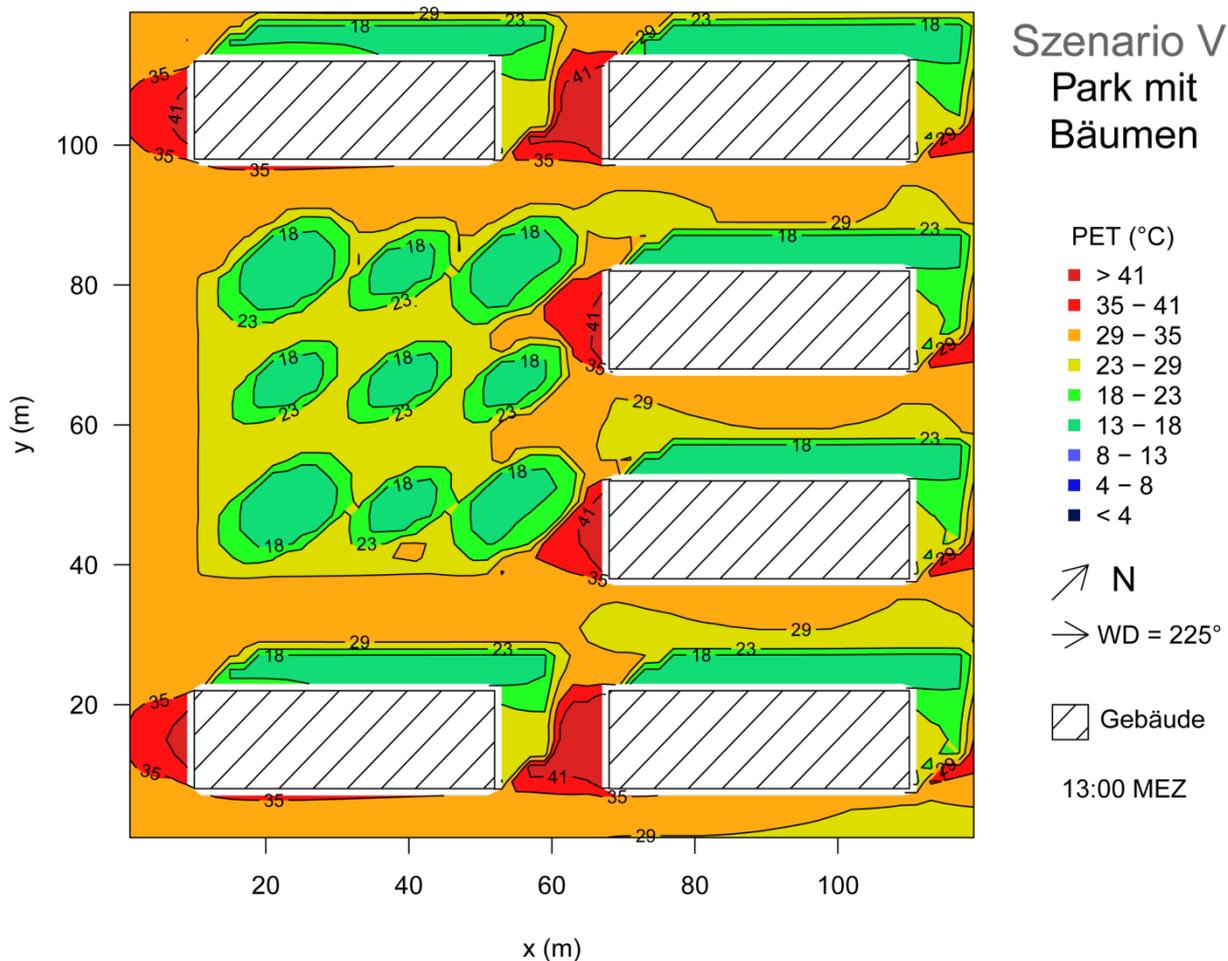


Abb. 3.5: Räumliche Verteilung von PET für das Szenario „Park mit Bäumen“ an einem Sommertag um 13 Uhr lokaler Zeit in einer Höhe von 1.5 m. Die Farben entsprechen den PET Klassen aus Tab. 1.1. Die schraffierten Flächen markieren die Grundfläche der Gebäude. Das Modellgebiet ist um 45° gegen die Nordrichtung gedreht.

3.2.3 SZENARIO „PARK MIT VIELEN BÄUMEN“

In einem weiteren Szenario wurden der Parkfläche weitere Bäume hinzugefügt. Diese weisen unterschiedliche Höhen auf und stehen erheblich dichter als im Szenario „Park mit Bäumen“. Statistisch wirkt sich dies weiterhin in einer Reduktion von PET für einen Sommertag in 1.5 m Höhe aus. Diese liegt im Mittel 27.0 °C. Damit hat sich gegenüber dem Szenario „Park mit Bäumen“ nichts verändert. Der Medianwert liegt mit 29.0 °C sogar 0.1 °C höher als im Szenario „Park mit Bäumen“.

Die Ursache hierfür lässt sich anhand der räumlichen Verteilung der Ergebnisse für PET an einem Sommertag in 1.5 m Höhe leicht ablesen (Abb. 3.6). Im Luv des Parks hat sich ein schmaler Streifen mit starkem Hitzestress gebildet. Auch auf der Rasenfläche vor den ersten Bäumen ist zumindest mäßiger Hitzestress zu beobachten. Dies zeigt, dass die erhöhte Anzahl an dichter stehenden Bäumen verschiedener Größen ein stärkeres Strömungshindernis darstellt, welches die Windgeschwindigkeit reduziert und so die thermische Belastung vergrößert. Dies zeigt sich auch an den umliegenden Straßen. Während die Straßen oberhalb und unterhalb des Parks weniger belastende Bedingungen aufweisen, hat sich die Situation für die Straße im Lee des Parks verschlechtert. Dies ist darin begründet, dass der Park vom Großteil der Luft umströmt werden muss. Unter den Bäumen innerhalb des Parks herrschen dagegen weiterhin thermisch komfortable bis kühle Bedingungen vor.

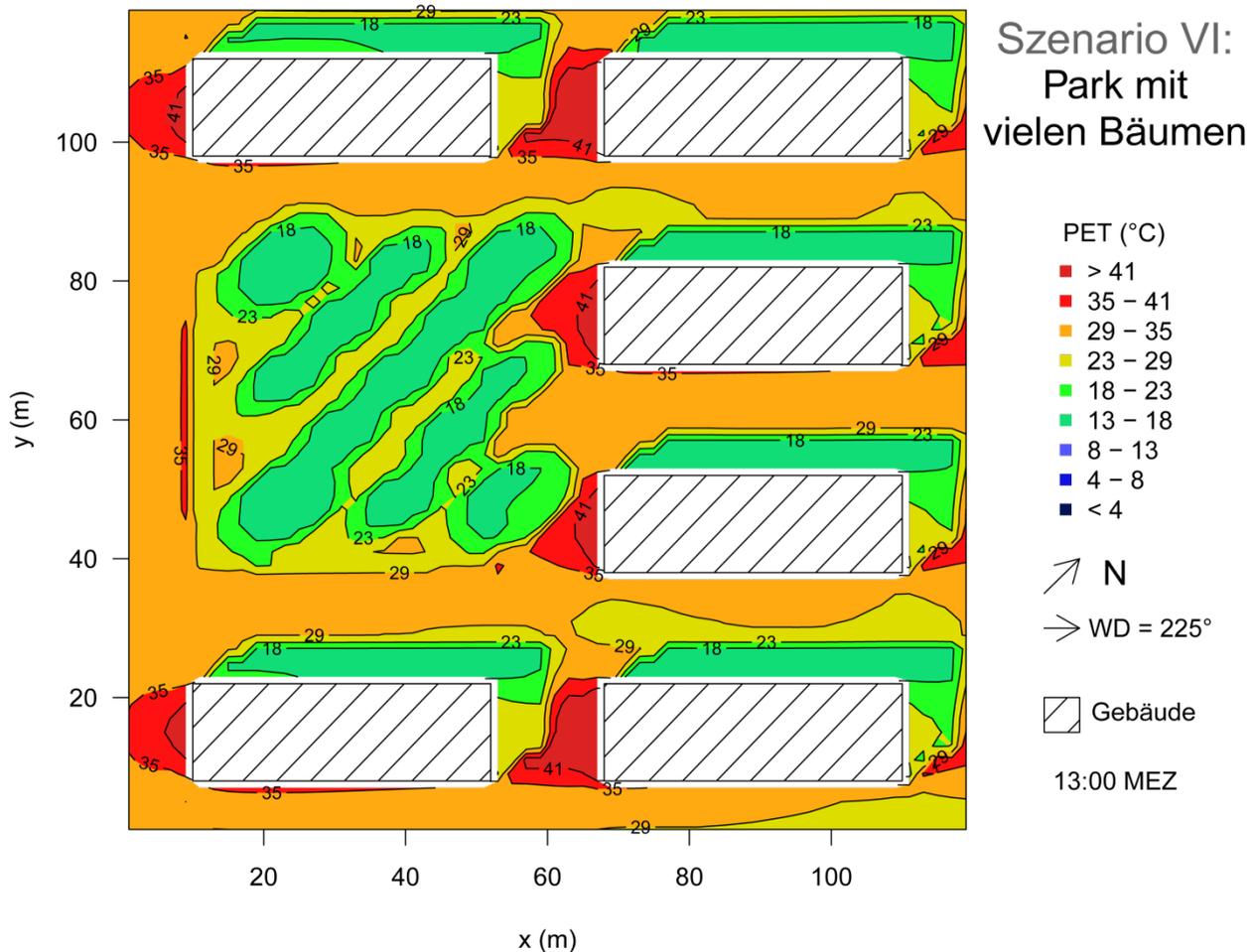


Abb. 3.6: Räumliche Verteilung von PET für das Szenario „Park mit vielen Bäumen“ an einem Sommertag um 13 Uhr lokaler Zeit in einer Höhe von 1.5 m. Die Farben entsprechen den PET Klassen aus Tab. 1.1. Die schraffierten Flächen markieren die Grundfläche der Gebäude. Das Modellgebiet ist um 45° gegen die Nordrichtung gedreht.

3.3 ZUSAMMENFASSUNG

Eine der vielversprechendsten Mitigationmöglichkeiten für sommerlichen Hitzestress stellt die Verschattung einer Stadt dar. Diese reduziert den Strahlungsgewinn, sodass sich die mittlere Strahlungstemperatur (T_{mrt}) an die Lufttemperatur (T_a) annähert. Eine so erzeugte, gemäßigte T_{mrt} wirkt sich dabei fast immer positiv auf die thermische Empfindung aus. Neben der Bebauungsstruktur selbst stellt städtisches Grün die häufigste Art der Schattenspender in Städten dar. Seine Effektivität hängt jedoch nicht allein von der Art der Begrünung ab, sondern auch von deren Verteilung. So kann ein lokaler Park mit einer Rasenfläche auf dieser selbst für komfortablere Bedingungen sorgen als eine Straße. Deutlich verbessert sich die Situation innerhalb des Parks durch das Hinzufügen von Bäumen. Die Wirkung bleibt jedoch auf den Park selbst beschränkt. Eine weitreichende Verbesserung für größere Bereiche kann somit nur durch den flächendeckenden Einsatz von städtischem Grün erreicht werden.

4 Verbesserung von Modellen

Die Ergebnisse des vorliegenden Projekts basieren größtenteils auf dem Einsatz bestehender numerischer Modelle. Es wurde jedoch auch ein Modell weiter entwickelt um zukünftig umfassendere Aussagen zu ermöglichen.

4.1 SKYHELIOS

SkyHelios (Matzarakis und Matuschek 2011) ist ein mikroskaliges Simulationsmodell zur Berechnung mikrometeorologischer Kenngrößen im urbanen Raum. Bei der Entwicklung von SkyHelios wurde besonderer Wert auf bestimmte Punkte gelegt:

- Reduzierung der Laufzeitkomplexität, durch intensiven Einsatz des Grafikprozessors (GPU)
- Reduzierung der Kosten, durch die Verwendung von quelloffener und freier Drittsoftware
- Möglichkeit mikrometeorologische Kenngrößen für gezielte Punkte, sowie räumlich für ein komplettes Modellgebiet zu berechnen

Als Datengrundlage zur Berechnung der mikrometeorologischen Kenngrößen werden Daten aus digitalen Geländemodellen (DEM) meist in Form von Rasterdaten sowie aus Vektordaten in SkyHelios unterstützt. Es können unterschiedliche Rasterformate sowie unterschiedliche Vektordaten und Daten von urbanen Hindernissen (OBS) (Matzarakis et al. 2007) eingelesen werden.

Aus den eingelesenen Daten wird mit Hilfe der 3D Grafik Engine Mogre (Ogre Team 2014) ein dreidimensionales Modellgebiet in einer gemeinsamen Szenerie für die Grafikkarte (Renderszene) nachgebaut. Durch die Abbildung des Modellgebiets in eine Renderszene ist es möglich, indirekt Berechnungen auf der GPU durchzuführen.

4.1.1 SKY VIEW FACTOR UND SONNENSCHINDAUER

Das ursprüngliche Ziel von SkyHelios war es, ein Modell zu entwickeln, das den Sky View Faktor (SVF) flächendeckend für ein Modellgebiet berechnen kann. Der Sky View Faktor ist ein Maß für die Horizontüberhöhung des oberen Halbraums durch Hindernisse (z.B. Gebäude, Bäume). Der SVF beschreibt somit den Anteil des direkt sichtbaren Himmels an einem gegebenen Ort. In Kombination mit dem Sonnenstand zu einem gegebenen Datum und Ort kann in SkyHelios anschließend die reale Sonnenscheindauer berechnet werden. Die reale Sonnenscheindauer gibt an, wie lange die Sonne an einem Ort direkt sichtbar ist. Die reale Sonnenscheindauer wird direkt durch den SVF beeinflusst.

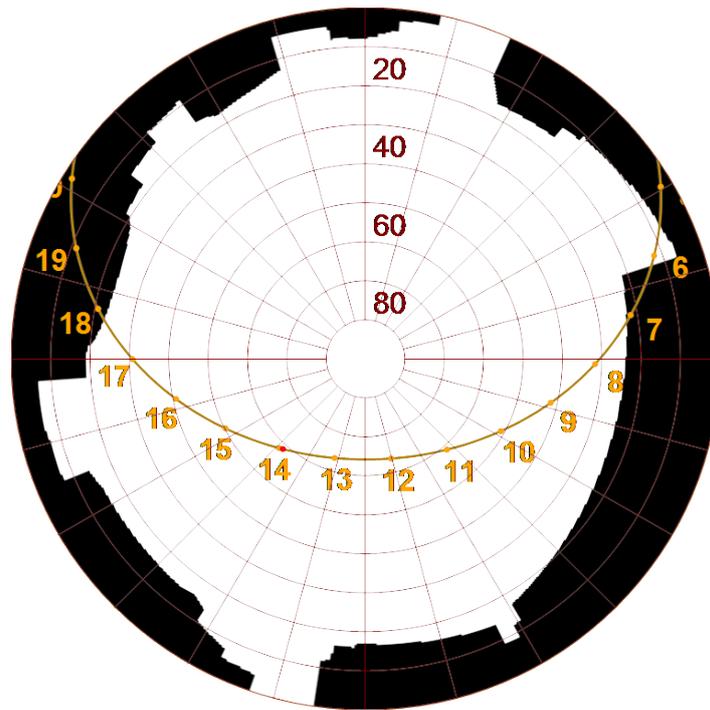


Abb. 4.1: Beispiel für eine Fisheye-Grafik, aus welchem SVF und Sonnenstand zu einer bestimmten Zeit bezogen werden können. Gezeigt wird das Beispiel eines Punktes auf dem Platz der Alten Synagoge in Freiburg

4.1.2 BERECHNUNG ABGELEITETER (BIO-) METEOROLOGISCHER GRÖßEN

Das ursprüngliche Ziel wurde erfolgreich erreicht, so dass das Model um zusätzliche Berechnungen erweitert werden kann. Besonders wichtig ist hier die Berechnung der Globalstrahlung (G) und der daraus berechneten mittleren Strahlungstemperatur, da diese einen großen Einfluss auf das thermische Befinden des Menschen hat.

Um den thermischen Komfort eines Menschen unter bestimmten Bedingungen zu simulieren werden abgeleitete biometeorologische Größen berechnet. Diese biometeorologischen Größen basieren nicht nur auf der Globalstrahlung, mittleren Strahlungstemperatur, dem SVF und dem Sonnenstand, sondern basieren außerdem auch auf der Lufttemperatur, dem Dampfdruck, der relativer Luftfeuchte, der Windgeschwindigkeit und der Wolkenbedeckung. Diese meteorologischen Größen, können bisher nur als Parameter in das mikroskali-ge Model eingegeben werden.

4.1.2.1 THERMISCHE INDIZES

Mit Hilfe human-biometeorologischen Indizes wie der Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET, Höppe 1999) und des Universal Thermal Climate Index (UTCI, Jendritzky et al. 2012) wird der thermische Komfort des Menschen auf Grundlage der menschlichen Energiebilanz und den meteorologischen Bedingungen beurteilt.

4.1.3 GRAFISCHE DREIDIMENSIONALE DARSTELLUNG DES MODELLGEBIETS

Die Mogre Engine wurde nicht nur verwendet um die Berechnungen auf der GPU durchzuführen, sondern auch um die Renderszene in SkyHelios zu berechnen. Dazu wurde ein Mogre Window in die GUI eingebettet, um damit das Modellgebiet in verschiedenen Ansichten dreidimensional dazustellen. Meteorologische Größen, insbesondere die Strahlungsflüsse können für ausgewählte Orte berechnet werden.

Im Zuge des Projekts wurde das bestehende Modell SkyHelios um ein Windmodell erweitert. Dieses erlaubt die schnelle Approximation des drei-dimensionalen Windfeldes (Windgeschwindigkeit und Windrichtung). Die Windgeschwindigkeit ist eine wichtige Eingangsgröße bei der Berechnung thermischer Indizes.

Soll das thermische Bioklima für einen Bereich, beispielsweise einen Platz oder ein Wohnviertel berechnet werden, ist hierfür die Kenntnis der Zustände sämtlicher Eingangsgrößen an jedem Punkt des Bereichs erforderlich. Solche Daten sind durch Messungen nicht zu erfassen und können nur durch numerische Modelle bereitgestellt werden (z.B. Lin et al. (2010; 2013)).

Meteorologische Modelle bilden die Prozesse der Atmosphäre und die Interaktion Atmosphäre-Erdoberfläche vereinfacht ab. Durch die Vereinfachung und Parametrisierung von Prozessen kommt es zu Unsicherheiten. Bestehende mikro-meteorologische Modelle, wie ENVI-met (Bruse und Fleer, 1998) oder RayMan (Matzarakis et al. 2007; 2010) haben ihre Schwachstellen und Unzulänglichkeiten (z.B. Fröhlich und Matzarakis (2011)). So berechnet RayMan die Strahlungsflüsse und die thermischen Indizes für einen einzelnen Punkt innerhalb eines komplexen urbanen Untersuchungsgebietes. Dabei müssen Lufttemperatur, Dampfdruck und Windgeschwindigkeit für diesen zu modellierenden Standort durch den Benutzer eingegeben werden. Dies stellt insofern ein Problem dar, als dass die Daten oftmals von der nächstgelegenen Messstation transformiert werden müssen.

Das Modell ENVI-met simuliert meteorologischen Größen für ein räumliches Gebiet mit bis zu 240 x 240 Gitterzellen und einer Auflösung zwischen $1 - 10\text{ m}$ für ein bis drei Tage (Fröhlich und Matzarakis 2013). Der Rechenaufwand von ENVI-met ist sehr groß. Neuere Ansätze verbinden die Vorteile beider Modelle durch deren Kombination (Fröhlich und Matzarakis 2011; 2013). So können nicht nur die Ergebnisse des einen Modells durch die des anderen validiert, sondern auch deren Aussagen ergänzt werden. Die Verknüpfung einer Analyse langer Zeitreihen für einzelne Punkte mit Hilfe von RayMan mit räumlichen Daten für einzelne Extremsituationen erlaubt bereits eine gut fundierte Aussage. Die Anwendung von mehreren Modellen bedeutet jedoch meist auch einen großen Mehraufwand beispielsweise durch die Erstellung des Modellgebiets in der jeweils benötigten Form.

Das Modell SkyHelios (Matzarakis und Matuschek 2011), das derzeit an der Professur für Meteorologie und Klimatologie der Universität Freiburg entwickelt wird, unterstützt das Einlesen gängiger Formate räumlicher Daten (Shapefiles, Rasterdaten) und auch die Sonderformate der RayMan und ENVI-met Modellgebiete werden unterstützt. Auf der Grundlage von Topografie, Gebäude und Vegetation sollen zunächst grundlegende Parameter, wie SVF, Schattenwurf oder Rauigkeit berechnet werden, welche benötigt werden, um weitere meteorologische Parameter und schließlich die thermischen Indizes zu berechnen. SkyHelios kann bereits der SVF nach zwei unterschiedlich gewichtenden Ansätzen (Hämmerle et al. 2011), die Sonnenscheindauer (Abb. 4.1), sowie den Schattenwurf innerhalb der Modellgebiete berechnen. Im Zuge des Projekts wurde das Modell SkyHelios um ein Windfeldmodell erweitert. Neben den Strahlungsflüssen ist die Windgeschwindigkeit diejenige meteorologische Größe, welche die größte Fluktuation aufweist. Die Berechnung der thermischen Indizes soll flächenhaft in einer definierten Auflösung für den Zeitraum einer Klimanormalperiode ermöglicht werden. Deshalb wird besonders Augenmerk auf die Optimierung der Laufzeit gelegt.

Die Windgeschwindigkeit und -richtung kann für ein diskretes Modellgebiet entweder mit einem prognostischen oder einem diagnostischen Ansatz berechnet werden. Ein Prognostisches Windfeldmodell beginnt mit

definierten Start- und Randbedingungen und rechnet davon ausgehend in kleinen Zeitschritten in die Zukunft. Diese Zeitschritte müssen dabei sehr klein gewählt werden um die Stabilität des Modells zu gewährleisten. Physikalisch basieren solche Modelle auf einer Näherungslösung der dreidimensionalen Navier-Stokes Transportgleichungen in nicht-komprimierbarer Form in Verbindung mit der Massenerhaltung (Bruse 1999, Eichhorn et al. 1988, Eichhorn und Kniffka 2010). Ein Vorteil dieser Methode ist theoretisch eine hohe Genauigkeit, allerdings sprechen eine lange Rechenzeit, sowie die Unfähigkeit nicht zusammenhängende Zeitreihen zu berechnen gegen diesen Ansatz.

Eine höhere Flexibilität bietet der diagnostische Ansatz. Er sieht vor, dass zunächst ein Initialwindfeld berechnet wird. Dieses enthält die Einflüsse jedes Hindernisses im Modellgebiet. Da sich diese Einflüsse jedoch gegenseitig und mit der ursprünglichen Luftströmung überlagern, enthält das so erzeugte Initialwindfeld große Divergenzen. Da aber natürlich an keiner Stelle Luft entstehen oder verschwinden darf, muss die Divergenz des Initialwindfeldes anschließend in einem iterativen Verfahren minimiert werden (Röckle 1990, Singh et al. 2008, Gowardhan et al. 2011). Beim diagnostischen Ansatz wird für jede Zeile von Eingangsdaten ein eigenes Windfeld berechnet, das mit den vorherigen in keinem Zusammenhang stehen muss. Die Qualität des errechneten Windfeldes ist in hohem Maße von der Parametrisierung der Einflüsse der Strömungshindernisse abhängig. Auch verbleibt häufig eine höhere Restdivergenz. Diese ist für die Berechnung thermisch-bioklimatischer Fragestellungen jedoch wenig relevant. Hier überwiegt der Vorteil, dass das Verfahren sehr viel schneller als die Lösung der dreidimensionalen Transportgleichungen ist.

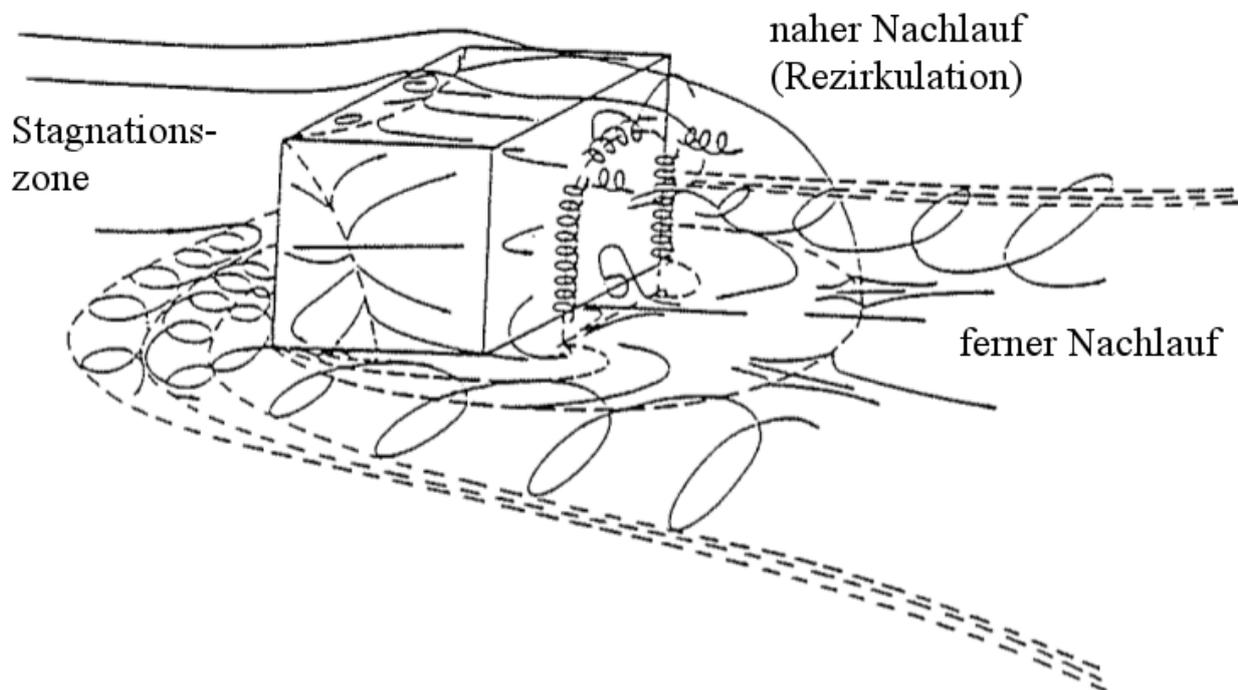


Abb. 4.2: Zeichnung der Strömung um ein quaderförmiges, solides Hindernis. Eingezeichnet sind die drei Elemente der luvseitigen Stagnationszone, der leeseitigen Rezirkulation und der leeseitigen Zone verringerter Windgeschwindigkeit (ferner Nachlauf). Verändert nach Hunt et al. (1978).

Das jetzt implementierte Windfeldmodell wurde auf Basis früherer Überlegungen zur Parametrisierung einer luvseitigen Stagnationszone, einer leeseitigen Rezirkulation, einer leeseitigen Zone verringerter Windgeschwindigkeit, sowie zur Erkennung einer Straßenschlucht und der Erzeugung eines Vortex in derselben

Straßenschlucht erstellt (Fröhlich 2013) (Abb. 4.2). Die Implementierung wurde auf Grund von Überlegungen der Laufzeitminimierung in der Programmiersprache C++ durchgeführt. Dies soll im Folgenden im Detail beschrieben werden.

4.2.1 AUFBAU DES IMPLEMENTIERTEN WINDMODELLS

Das für SkyHelios entwickelte diagnostische Windmodell besteht im Wesentlichen aus acht großen Modulen. Die aufeinander aufbauenden Module sind im Folgenden in der Reihenfolge ihres Aufrufs beschrieben.

4.2.1.1 ERSTELLUNG EINER LISTE DER STRÖMUNGSHINDERNISSE

Beim Aufruf wird dem Windmodell von SkyHelios ein dreidimensionales Raster in der gewünschten Auflösung übergeben das alle Objekte innerhalb des Modellgebietes beinhaltet, die später vom Windmodell berücksichtigt werden sollen. Diese sind durch einen Faktor ihrer Unpassierbarkeit für Luft charakterisiert. Eine Zelle, die ein Gebäude enthält weist so den Wert 1.0 auf, während eine Zelle in einem Baum, der ein poröses Hindernis darstellt, einen weit geringeren Wert, z.B. 0.3 aufweist.

Aus diesem dreidimensionalen Modellgitter wird zunächst eine Tabelle erstellt, die das Modellgebiet enthält, welches in einzelne rechteckige Hindernisse mit gleichem Durchströmungswiderstand eingeteilt ist. Für jedes Hindernis werden darin die Anfangskordinaten in x-, y- und z-Richtung, die metrische Erstreckung in x-, y- und z-Richtung sowie der Durchströmungswiderstand abgelegt. Die Hindernisse können sich dabei überlappen um den Einfluss beider in vollem Umfang behandeln zu können. Hindernisse die vollständig in anderen Hindernissen enthalten sind werden aus Gründen der Laufzeitoptimierung entfernt.

4.2.1.2 ERSTELLUNG DER UNGESTÖRTEN FLUSSGITTER

Bevor der Einfluss von Strömungshindernissen berücksichtigt werden kann, muss ein ungestörtes Windfeld erstellt werden, in das diese übertragen werden können. Aus technischen Gründen ist es hierbei sinnvoll, nicht mit Windgeschwindigkeit und -richtung in einer Zelle, sondern mit den Flüssen von einer Zelle in die jeweils nächste zu rechnen. Alle Berechnungen werden somit auf drei, um eine halbe Zelle versetzten Gittern durchgeführt, die die Zellübergänge in x-, y- und z-Richtung repräsentieren. Unter der Annahme nicht komprimierbarer Luft, die für die gewünschte Skala als gültig zu betrachten ist, müssen alle Flüsse in eine Zelle und aus einer Zelle heraus in der Summe 0 ergeben (da in einer Zelle weder Luft entstehen noch verschwinden darf). Die Flussgitter ermöglichen so am Ende die einfache Berechnung eines gültigen Windfeldes.

Zu Erstellung der Flussgitter für das ungestörte Windfeld muss zunächst aus der durch SkyHelios an das Windmodell übergebenen Windgeschwindigkeit sowie deren Messhöhe ein Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit erstellt werden. Hierzu kommt ein Ansatz aus Kuttler (2000, S. 428) zum Einsatz.

$$\bar{u}(z) = \bar{u}_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^a \quad \text{Gl. 4.1}$$

$\bar{u}(z)$ repräsentiert dabei die Windgeschwindigkeit in einer Höhe von z , während \bar{u}_{ref} die Windgeschwindigkeit der Messhöhe bezeichnet.

Der Rauigkeitsexponent a wird wie in Kuttler (2000) und Matzarakis et al. (2009) nach folgender Formel berechnet Gl. 4.2.

$$a = 0.12 * z_0 + 0.18 \quad \text{Gl. 4.2}$$

Dieser Ansatz erlaubt die Verwendung einer Rauigkeitslänge z_0 bis 1.0 m.

Wurde das vertikale Windprofil erfolgreich erstellt, muss dieses entsprechend der Windrichtung für jede Höhe in seine x- und y-Komponente unterteilt werden. Dies geschieht mit Hilfe einer einfachen trigonometrischen Funktion. Für die x-Richtung hat diese die Form von Gl. 4.3.

$$u_z = -\bar{u}(z) * \sin(WD) \quad \text{Gl. 4.3}$$

In y-Richtung wird Gl. 4.3 entsprechend mit dem Kosinus verwendet. Die so errechnete Windgeschwindigkeit wird in das Flussgitter der jeweiligen Höhe übertragen. Das Flussgitter für die vertikalen Flüsse (z-Richtung) wird mit 0 m/s initialisiert.

4.2.1.3 BERECHNUNG EINER LUVSEITIGEN STAGNATION

Als erster Schritt der Berücksichtigung der Strömungshindernisse wird für jedes Hindernis eine luvseitige Stagnationszone berechnet (vgl. Abb. 4.2). Jedes Strömungshindernis kann, je nach Richtung der Anströmung eine Stagnationszonen bei lotrechter Anströmung oder zwei Stagnationszonen in x- und y-Richtung haben (vgl. Abb. 4.4). Die Stagnationszonen haben die Form einer halben Ellipse und werden jeweils lotrecht vor das angeströmte Hindernis platziert.

Zur Bestimmung der Größe der Ellipse müssen deren Halbachsen bestimmt werden. Dabei ist eine der Halbachsen die halbe Länge der angeströmten Seite des Hindernisses und somit bereits bekannt. Die zweite Halbachse in Richtung der Anströmung (a_x) wird aus der Breite des Hindernisses (w_i) sowie dessen Höhe (h), der Windgeschwindigkeit sowie der Windrichtung bestimmt. Hieraus kann mit Hilfe von Gl. 4.4 die maximale Länge der Halbachse (L_f) bestimmt werden (Röckle 1990).

$$\frac{L_f}{h} = \frac{2\left(\frac{w_i}{h}\right)}{1+0.8\left(\frac{w_i}{h}\right)} \quad \text{Gl. 4.4}$$

Zudem muss, da die Länge der Stagnationszone mit der Höhe abnimmt, die jeweilige Höhe (z) berücksichtigt werden. Aus dieser sowie der Windrichtung kann anschließend die Länge der Halbachse für die aktuelle Höhe errechnet werden (Röckle (1990)).

$$a_x = L_f * \sin^2 * WD * \sqrt{1 - \left(\frac{z}{0.6h}\right)^2} \quad \text{Gl. 4.5}$$

Zur korrekten Platzierung der Ellipse muss zudem ihr Mittelpunkt bekannt sein. Dieser besteht für die luvseitige Stagnationszone aus den Koordinaten der Mitte der angeströmten Grenze des Hindernisses und ist daher leicht bestimmbar.

Für jede Gitterzelle, die innerhalb der so berechneten Ellipse liegt, wird der Fluss in Richtung des Hindernisses mit 0.0 m/s überschrieben.

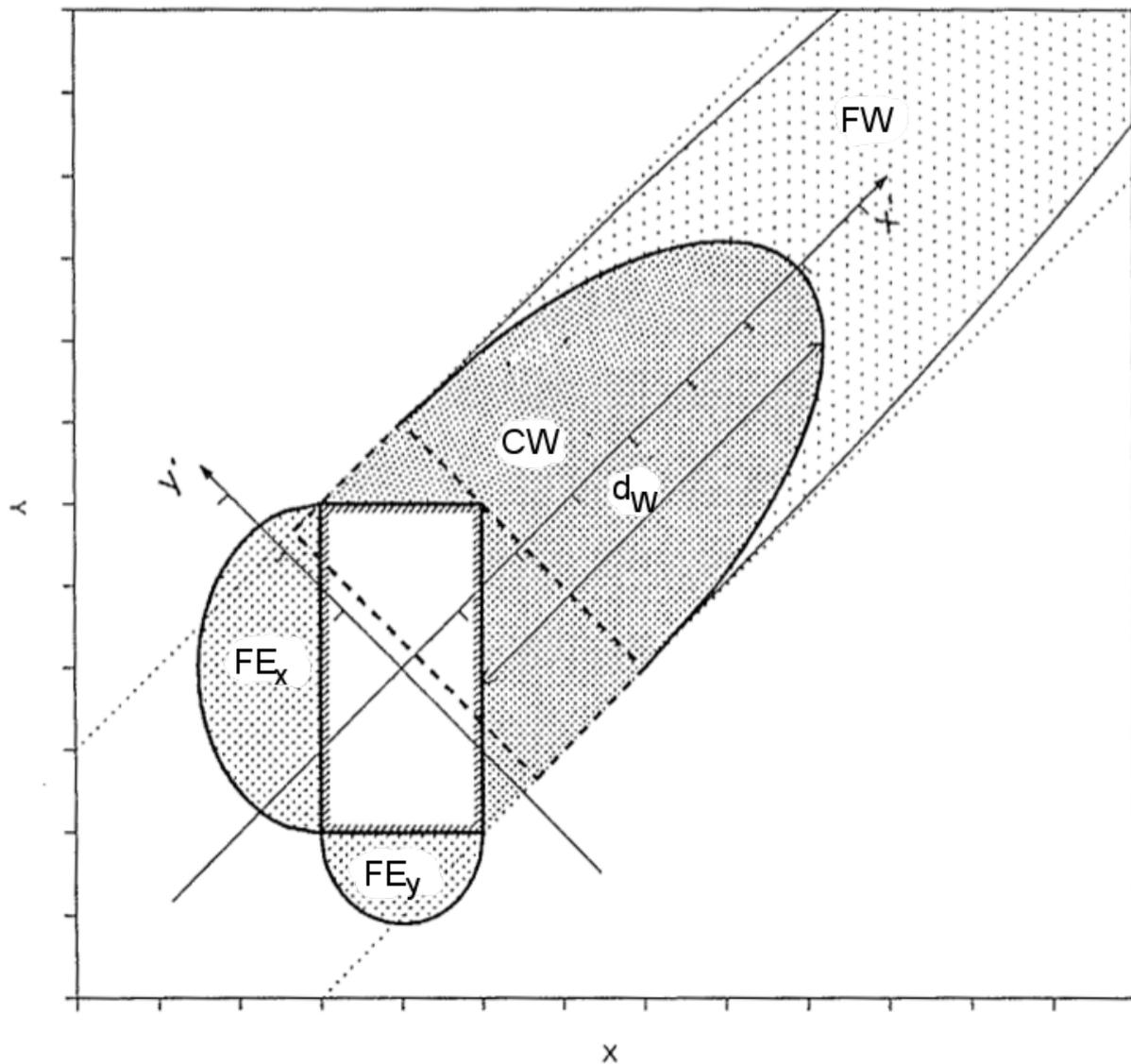


Abb. 4.3: Skizze der Lage der verschiedenen berechneten Einflusszonen eines soliden, quaderförmigen Hindernisses auf das Windfeld (FE_x/FE_y = luvseitige Stagnationszone in x- und y-Richtung, CW = naher Nachlauf, FW = ferner Nachlauf, d_W = Entfernung zwischen der Leeseite des Hindernisses und dem Ende der Nachlaufzone) unter der Annahme einer Anströmung von unten links (\nearrow). Verändert nach Röckle (1990)

4.2.1.4 BERECHNUNG EINES LEESEITIGEN RÜCKLAUFS

Komplexer als die im Luv sind die Flüsse im Lee eines Hindernisses. Hier wird zunächst eine dicht hinter dem Hindernis liegende Rezirkulation berechnet. Diese hat wieder die Form einer halben Ellipse (vgl. Abb. 4.4).

$$\frac{L_R}{h} = \frac{1.8 \cdot \frac{wi}{h}}{\left(\frac{l}{h}\right)^{0.3} \cdot \left(1 + 0.24 \cdot \frac{wi}{h}\right)} \quad \text{Gl. 4.4}$$

Die Maximale Länge der Rezirkulationszone (L_R) kann mit einer Formel aus (Röckle 1990) bestimmt werden. Dabei ist die Breite wi , die Höhe des Hindernisses h , Hindernislänge in Strömungsrichtung l . Aus dieser können anschließend die Halbachsen der Ellipse (a_x und a_y) bestimmt werden. Da die Länge der Rezirkulation mit der Höhe (z) abnimmt, muss dabei wieder die aktuelle Höhe berücksichtigt werden.

$$a_x = L_r \sqrt{1 - \left(\frac{z}{h}\right)^2} \quad \text{Gl. 4.5}$$

$$a_y = \frac{wi}{2} \quad \text{Gl. 4.6}$$

Bei schräger Anströmung müssen alle Berechnungen auf einem rotierten Koordinatensystem stattfinden, dessen x-Achse parallel zur Strömungsrichtung verläuft (vgl. Abb. 4.4). Sind Position und Ausdehnung der Rezirkulationszone bestimmt, werden mit Gl. 4.8 die Modifikationen der Flussgitter berechnet.

$$u^0 = -u(h) \left(1 - \frac{d_l}{d_w}\right)^2 \quad \text{Gl. 4.7}$$

dabei ist d_l die Distanz des fraglichen Punkts, für den die Modifikation berechnet werden soll (von der Leeseite des Hindernisses), d_w die Entfernung zwischen der Leeseite des Hindernisses und dem Ende der Rezirkulation. Gl. 4.8 beschreibt nur die Modifikation des Flussgitters in x-Richtung an einer bestimmten Stelle (u^0). Die Formel für die y-Richtung ist jedoch entsprechend. Diese Änderungen werden auf einem getrennten Flussgitter gespeichert und später verrechnet.

4.2.1.5 BERECHNUNG DES FERNEN NACHLAUFS

Der ferne Nachlauf befindet sich hinter der Rezirkulation im Lee des Hindernisses (Abb. 4.4). Er hat ebenfalls die Grundform einer halben Ellipse. Die Berechnung von Position und Ausdehnung des nahen Nachlaufs geschieht analog zu der der Rezirkulation. Einzig die Länge seiner Halbachse in Strömungsrichtung entspricht der dreifachen des nahen Nachlaufs.

Innerhalb der fernen Nachlaufzone nähern sich die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung wieder der jeweils ungestörten an. Dies geschieht mit Hilfe von Gl. 4.9 (verändert nach Röckle (1990)) für eine Zelle des Flussgitters in x-Richtung (u_0). Die sonstigen Symbole entsprechen denen im nahen Nachlauf.

$$u^0 = u(z) \left(\frac{1}{\left(\frac{d_w}{d_l}\right)^{1.5}} \right) \quad \text{Gl. 4.8}$$

Auch die so errechneten Modifikationen für den fernen Nachlauf werden zunächst in drei eigenen Flussgittern entsprechend der drei Raumrichtungen abgelegt.

4.2.1.6 STRAßENSCHLUCHTEN

Stehen zwei Hindernisse in Strömungsrichtung hintereinander kann sich zwischen ihnen ein horizontaler Wirbel bilden. Dies findet in Städten vor allem in Straßenschluchten zwischen parallel stehenden Gebäuden statt. Zur Berücksichtigung ihres Einflusses muss eine Straßenschlucht zunächst als solche erkannt werden. Hierfür muss sie eine Länge von mindestens 30 m sowie eine maximale Breite von 25 m aufweisen.

Wurde eine Straßenschlucht erkannt, wird sowohl das Flussgitter quer zur Straßenrichtung, als auch das vertikale Flussgitter modifiziert. Dies geschieht mit Hilfe von Gl. 4.10 und Gl. 4.11.

$$u^0 = -u_{rt} \left(\frac{d_l}{W}\right) \left(\frac{W-d_l}{W/2}\right) \quad \text{Gl. 4.9}$$

$$w^0 = \left| \frac{u_{rt}}{2} \left(1 - \frac{d_l}{w/2} \right) \right| \left(1 - \frac{w-d_l}{w/2} \right) \quad \text{Gl. 4.10}$$

W bezeichnet dabei die Breite der Straßenschlucht, d_l den Abstand des jeweiligen Gitterpunktes zum luvseitigen Strömungshindernis. u_{rt} steht für die Windgeschwindigkeit in x-Richtung an der Obergrenze des höheren, die Straßenschlucht umgebenden, Hindernisses.

4.2.1.7 ZUSAMMENFÜGEN DER MODIFIKATIONEN

Sind alle oben genannten Modifikationen berechnet, werden diese den drei ursprünglichen Flussgittern hinzugefügt und so ein Initialwindfeld erstellt. Werden dabei für eine Zelle von mehreren Modulen Modifikationen berechnet müssen diese entsprechend ihrer Priorität eingefügt werden. Dabei werden nur die Modifikationen des Moduls mit der jeweils höchsten Priorität berücksichtigt. Die Prioritäten der einzelnen Module lauten wie folgt:

1. Straßenschluchten
2. naher Nachlauf
3. ferner Nachlauf
4. Stagnationsszone

Das so entstandene Windfeld enthält jedoch starke Divergenzen (Luft müsste entstehen und verschwinden). Diese müssen beseitigt werden um ein gültiges Windfeld zu erhalten.

4.2.2 MINIMIERUNG DER DIVERGENZ

Die Divergenz des Initialwindfeldes lässt sich unter der Annahme, dass die Luft im unteren Teil der planetaren Grenzschicht nicht nennenswert komprimierbar ist, als Poisson-Gleichung beschreiben. Sie hat somit keine analytische Lösung. Die Divergenz kann somit nicht vollständig beseitigt werden. Es ist jedoch möglich, die Lösung der Poisson-Gleichung numerisch anzunähern und somit die Divergenz des Initialwindfeldes zu minimieren. Dies geschieht im Windfeld für SkyHelios mit Hilfe eines Successive-Overrelaxation (SOR) Verfahrens.

SOR ist ein iteratives Verfahren, das auf dem Gauss-Seidel Verfahren beruht. Im Gegensatz zu diesem wird jedoch bei jedem Iterationsschritt eine Überkorrektur durchgeführt, die schneller zu einem akzeptablen Ergebnis führt. Ein solches akzeptables Ergebnis ist erreicht, wenn die verbleibende Restdivergenz einen Schwellenwert unterschreitet. Dieser wurde für das Windmodell für SkyHelios auf $1 \cdot 10^{-5}$ festgelegt, was als vernachlässigbar angenommen wird.

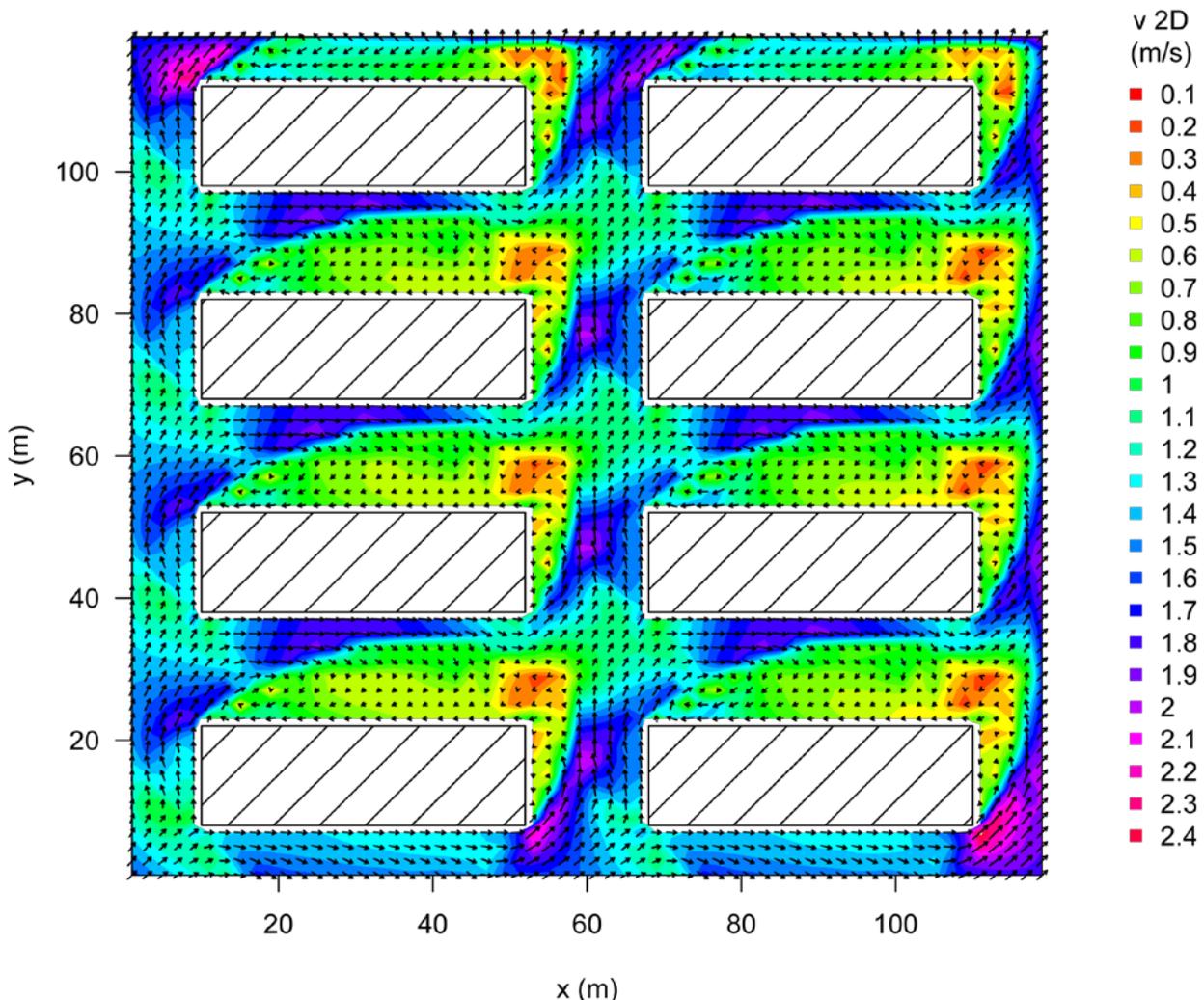
Implementiert wurde im Windfeld für SkyHelios ein gerade/ungerade SOR-Verfahren mit Chebyshev Beschleunigung entsprechend (Press et al. 2007)[S. 1062ff]. Beim gerade/ungerade SOR wird das gesamte Modellgitter schachbrettartig in gerade und ungerade Zellen unterteilt, die abwechselnd optimiert werden, was schneller zu einem besseren Ergebnis führt. Die Chebyshev Beschleunigung schreibt für die ersten beiden Iterationsschritte einen anderen Überkorrekturfaktor vor. Da die ersten beiden Iterationsschritte nach dem unveränderten SOR Verfahren das Ergebnis häufig verschlechtern, führt dies zu einer spürbaren Beschleunigung der Methode.

4.2.3 AUSBLICK

Inzwischen liegen erste Ergebnisse für Windfelder vor, die mit Hilfe des neuen Modells berechnet wurden (vgl. Abb. 4.5). Diese werden jetzt zunächst auf Plausibilität geprüft.

Dabei sollen grobe Fehler und problematische Konfigurationen von Hindernissen erkannt und Lösungen gefunden werden.

Windgeschwindigkeit und Windrichtung im Szenario 'Straße ohne alles'



Einströmung von 3m/s aus 180° (in 10m), z=2, Gitterrotation 45°.

Abb. 4.4: Windgeschwindigkeit und Windrichtung im Szenario „Straße ohne Alles“ berechnet durch das neue Windfeldmodell. Die schraffierten Flächen markieren die Grundfläche der Gebäude. Das Modellgebiet ist um 45° gegen die Nordrichtung gedreht.

Auch sollen neue Entwicklungen im Bereich diagnostischer Windfeldmodelle Berücksichtigung finden. So soll zum Beispiel ein verbesserter Ansatz für die luvseitige Stagnationszone und einen darin befindlichen horizontalen Vortex nach Bagal et al. (2004) in das Modell integriert werden. Für die leeseitige Zone verminderter Windgeschwindigkeit und der Rücklauf im Lee eines Hindernisses könnten nach einem Ansatz von Pardyjak et al. (2004) ebenfalls eine Verbesserung erzielt werden. Vor allem für die Parametrisierung der Strömung in den Straßenschluchten besteht noch einiges Verbesserungspotential. Hierzu wurden von Singh et al. (2008) ein vielversprechender Ansatz publiziert. Ein verbessertes initiales Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit nach Karimpour et al. (2012) könnte die Qualität der erzeugten Windfelder weiter deutlich verbessern. Schließlich ließe sich die Minimierung der Divergenz durch den Einsatz der Multigrid Methode von Wang et al. (2005) verbessern oder zumindest beschleunigen, da diese im Gegensatz zu SOR parallelisierbar ist und somit eine moderne CPU besser auslasten könnte.

Ein wichtiger Baustein, der dem Modell hinzugefügt werden sollte ist ein einfaches Geländemodell. Hierzu wurde bereits von Sherman (1978) ein grundlegender Ansatz formuliert. Ein durch diesen in angepasster Form modifizierten Ansatz erzeugtes Strömungsfeld könnte als Initialwindfeld in das Modell aufgenommen werden.

Anschließende Tests und Vergleiche mit Messdaten und anderen Modellen können Möglichkeiten für Optimierungen aufzeigen, die in verbesserte Parametrisierungen einfließen sollen. Geplant sind hierbei Vergleiche mit den Modellen ENVI-met und QUIC-URB (z.B. Bagal et al. (2004), Singh et al. (2008), Singh et al. (2011) und Pardyjak et al. (2004)). Schließlich muss vor dem produktiven Einsatz eine Validierung durchgeführt werden. Diese ist wichtig um Stärken und Schwächen des Modells zu erkennen und dem Anwender die optimale Nutzung des Modells zu ermöglichen. Sie soll zudem dazu dienen, die Parametrisierungen weiter zu verfeinern.

4.3 ZUSAMMENFASSUNG

Um den Einfluss verschiedener Planungsszenarien auf das thermische Empfinden von Menschen zu untersuchen werden mikroskalige numerische Modelle benötigt. Hierbei gibt es, wenn ein leistungsfähiger thermischer Index wie PET zum Einsatz kommen soll, bisher nur wenige Möglichkeiten. Die bekannteste stellt dabei das Modell ENVI-met dar. ENVI-met ist zwar sehr umfassend und bietet viele Funktionen. Das Modell ist jedoch komplex und sehr langsam. Es benötigt zudem spezielle Eingangsdaten, die zuvor manuell erstellt werden müssen. Zur Vereinfachung der flächenhaften Auswertung von thermischen Indizes wurde im Rahmen des Projektes das Modell SkyHelios um ein Windmodell erweitert. Es ermöglicht nun, verschiedene Planungsszenarien einfach und schnell untersuchen zu können.

5 Literaturverzeichnis

Bagal, N.; Pardyjak, E.; und Brown, M., 2004: Improved Upwind Cavity Parameterizations for a Fast Response Urban Wind Model.

Blazejczyk, K.; Epstein, Y.; Jendritzky, G.; Staiger, H.; und Tinz, B., 2012: Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology* 56(3), 515–535. doi: 10.1007/s00484-011-0453-2.

Bruse, M., 1999: Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima. Entwicklung des prognostischen numerischen Modells ENVI-met zur Simulation der Wind-, Temperatur und Feuchteverteilung in städtischen Strukturen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum.

Bruse, M. und Fler, H., 1998: Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software* 13(3–4), 373–384. doi: 10.1016/S1364-8152(98)00042-5.

Büttner, K., 1938: *Physikalische Bioklimatologie*. Akademische Verlagsgesellschaft. Leipzig. Eichhorn, J. und Kniffka, A., 2010: The numerical flow model MISKAM: State of development and evaluation of the basic version. *Meteorologische Zeitschrift* 19(1), 81–90. doi: 10.1127/0941-2948/2010/0425.

Eichhorn, J.; Schrodin, R.; und Zdunkowski, W., 1988: Three-Dimensional Numerical Simulations of the Urban Climate. *Phys. Atmosph.* 61(3), 187–203.

Fanger, P., 1972: *Thermal comfort*. McGraw-Hill. New York.

Fiala, D.; Havenith, G.; Broede, P.; Kampmann, B.; und Jendritzky, G., 2012: UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology* 56(3), 429–441. doi: 10.1007/s00484-011-0424-7.

Fröhlich, D., 2013: Rapid assessment of a wind field in complex environment for the integration in micro scale models. Masterarbeit, Albert-Ludwigs Universität Freiburg.

Fröhlich, D. und Matzarakis, A., 2011: Hitzestress und Stadtplanung Am Beispiel des „Platz der alten Synagoge“ in Freiburg im Breisgau. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 71 (7/8), 333–338.

Fröhlich, D. und Matzarakis, A., 2013: Modeling of changes in thermal bioclimate: examples based on urban spaces in Freiburg, Germany. *Theoretical and Applied Climatology* (111), 547–558. doi: 10.1007/s00704-012-0678-y.

Gowardhan, A. A.; Pardyjak, E. R.; Senocak, I.; und Brown, M. J., 2011: A CFD-based wind solver for an urban fast response transport and dispersion model. *Environmental Fluid Mechanics* 11(5), 439–464. doi: 10.1007/s10652-011-9211-6.

Havenith, G.; Fiala, D.; Błazejczyk, K.; Richards, M.; Bröde, P.; Holmér, I.; Rintamaki, H.; Benshabat, Y.; und Jendritzky, G., 2012: The UTCI-clothing model. *Int J Biometeorol* 56(3), 461–470. doi: 10.1007/s00484-011-0451-4.

Hunt, J.; Abell, C.; Peterka, J.; und Woo, H., 1978: Kinematical studies of the flows around free or surface-mounted obstacles. Applying topology to flow visualisation. *Journal of Fluid Mechanics* (86), 179–200.

Hämmerle, M.; Gál, T.; Unger, J.; und Matzarakis, A., 2011: Comparison of models calculating the Sky View Factor used for urban climate investigations. *Theoretical and Applied Climatology* (105), 521–527.

Höppe, P.R., 1984: Die Energiebilanz des Menschen. Dissertation, Münchner UniversitätsSchriften, Wissenschaft. Mittelungen Nr. 49.

Höppe, P. R., 1993: Heat balance modeling. *Experientia* (49).

Höppe, P. R., 1999: The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int J Biometeorol* 43, 71–75.

Jacob, D.; Van den Hurk, B. J. J. M.; Andræ, U.; Elgered, G.; Fortelius, C.; Graham, L. P.; Jackson, S. D.; Karstens, U.; Koepken, C.; Lindau, R.; Podzun, R.; Roeckel, B.; Rubel, F.; Sass, B. H.; Smith, R. N. B.; und Yang, X., 2001: A comprehensive model intercomparison study investigating the water budget during the BALTEX PIDCAP period. *Meteorol. Atmos. Phys.* (77), 19–43.

Jakob, D.; Bäring, L.; Christensen, O. B.; Christensen, J. H.; De Castro, M.; Deque, M.; Giorgi, F.; Hagemann, S.; Hirschi, M.; Jones, R.; Kjellström, E.; Lenderink, G.; Rockel, B.; Sanchez, E.; Schär, C.; Senviratne, S.; Somot, S.; Van Ulden, A.; und Van Den Hurk, B., 2007: An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. *Climatic Change* (81), 31–52.

Jendritzky, G. und Nübler, W., 1981: A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms. *Arch Meteorol. Geophys. Bioclimatol. B.* (29), 313–326.

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

Jendritzky, G.; Dear, de R.; und Havenith, G., 2012: UTCI-Why another thermal index? *Int J Biometeorol* (56), 421–428.

Kampstra, P., 2008: Beanplot: A Boxplot Alternative for Visual Comparison of Distributions. *Journal of Statistical Software, Code Snippets* 1(28), 1–9.

Karimpour, A.; Kaye, N. B.; und Baratian-Ghorghi, Z., 2012: Modeling the neutrally stable atmospheric boundary layer for laboratory scale studies of the built environment. *Building and Environment* 49, 203–211. doi: 10.1016/j.buildenv.2011.09.026.

Kuttler, W., 2000: Stadtklima. In Guderian, R.; editor, *Atmosphäre 1B of Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxologie* pages 420–470. Springer Verlag.

Lin, T.-P.; Matzarakis, A.; und Hwang, R.-L., 2010: Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *International Symposium on the Interaction between Human and Building Environment Special Issue Section 45(1)*, 213–221. doi: 10.1016/j.buildenv.2009.06.002.

Lin, T.-P.; Tsai, K.-T.; Liao, C.-C.; und Huang, Y.-C., 2013: Effects of thermal comfort and adaptation on park attendance regarding different shading levels and activity types. *Building and Environment* 59(0), 599–611. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.10.005.

Matzarakis, A., 2013: Stadtklima vor dem Hintergrund des Klimawandels. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* 73(3), 115–118.

Matzarakis, A. und Endler, C., 2010: Climate change and thermal bioclimate in cities: impacts and options for adaptation in Freiburg, Germany. *International Journal of Biometeorology* 54(4), 479–483. doi: 10.1007/s00484-009-0296-2.

Matzarakis, A. und Matuschek, O., 2011: Sky view factor as a parameter in applied climatology rapid estimation by the SkyHelios model. *Meteorologische Zeitschrift* 20(1), 39–45.

Matzarakis, A. und Mayer, H., 1996: Another kind of environmental stress: Thermal stress. *WHO Newsletter* (18), 7–10.

Matzarakis, A.; Mayer, H.; und Iziomon, M. G., 1999: Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology* 43(2), 76–84. doi: 10.1007/s004840050119.

Matzarakis, A.; Rutz, F.; und Mayer, H., 2007: Modelling radiation fluxes in simple and complex environments application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology* 51(4), 323–334. doi: 10.1007/s00484-006-0061-8.

Matzarakis, A.; De Rocco, M.; und Najjar, G., 2009: Thermal bioclimate in Strasbourg the 2003 heat wave. *Theoretical and Applied Climatology* (98), 209–220.

Matzarakis, A.; Rutz, F.; und Mayer, H., 2010: Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology* 54(2), 131–139. doi: 10.1007/s00484-009-0261-0.

Mayer, H. und Höppe, P., 1987: Thermal Comfort of Man in Different Urban Environments. *Theoretical and Applied Climatology* (38), 43–49.

Ogre Team, 2014: Ogre. <http://www.ogre3d.org/>.

Pardysjak, E. R.; Brown, M. J.; und Bagal, N., 2004: Improved Velocity Deficit Parameterizations for a Fast Response UrbanWind Model. In *Symposium on Planning, Nowcasting, and Forecasting in the Urban Zone*.

- Press, W. H.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T.; und Flannery, B. P., 2007: Numerical recipes : the art of scientific computing. Cambridge Univ. Press. Cambridge 3rd edition.
- Runnalls, K. und Oke, T., 2000: Dynamics and controls of the near-surface heat island of Vancouver, B.C. *Physical Geography* 21, 283–304.
- Röckle, R., 1990: Bestimmung der Strömungsverhältnisse im Bereich komplexer Bebauungsstrukturen. Dissertation, Fachbereich Mechanik der Technischen Hochschule Darmstadt.
- Schmidt, H., 2012: Die Bevölkerung in Stadt und Land. *Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg* 4, 19–26.
- Schär, C.; Vidale, P. L.; Luthi, D.; Frei, C.; Haberli, C.; Liniger, M. A.; und Appenzeller, C., 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427(6972), 332–336. doi: 10.1038/nature02300.
- Sherman, C., 1978: Mass-consistent model for wind fields over complex terrain. *Journal of Applied Meteorology* 17(3), 312–319. doi: 10.1175/1520-0450(1978)017<0312:AMCMFW>2.0.CO;2.
- Singh, B.; Hansen, B. S.; Brown, M. J.; und Pardyjak, E. R., 2008: Evaluation of the QUIC-URB fast response urban wind model for a cubical building array and wide building street canyon. *Environmental Fluid Mechanics* 8(4), 281–312. doi: 10.1007/s10652-008-9084-5.
- Singh, B.; Pardyjak, E. R.; Norgren, A.; und Willemsen, P., 2011: Accelerating urban fast response Lagrangian dispersion simulations using inexpensive graphics processor parallelism. *Environmental Modelling & Software* 26(6), 739–750. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.12.011.
- Staiger, H., Bucher, K., Jendritzky, G., 1997. Gefühlte Temperatur. Die physiologisch gerechte Bewertung von Wärmebelastung und Kältestress beim Aufenthalt im Freien in der Maßzahl Grad Celsius. *Annalen der Meteorologie* 33 (100-107).
- Staiger, H.; Laschewski, G.; und Graetz, A., 2012: The perceived temperature a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics. *International Journal of Biometeorology* 56(1), 165–176. doi: 10.1007/s00484-011-0409-6.
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2013: Statistische Berichte Baden-Württemberg: Bevölkerung und Erwerbstätigkeit.
- Toudert, F. A., 2005: Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate. Dissertation, Berichte des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg, 15.
- van der Linden und Mitchell, 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre Exeter.
- VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, 1988: Stadtklima und Luftreinhaltung. Berlin.

Wang, Y. S.; Williamson, C.; Garvey, D.; Chang, S.; und Cogan, J., 2005: Application of a multigrid method to a mass-consistent diagnostic wind model. *Journal of Applied Meteorology* 44(7), 1078–1089. doi: 10.1175/JAM2262.1.

Wang, Y. S.; Williamson, C.; Garvey, D.; Chang, S.; und Cogan, J., 2005: Application of a multigrid method to a mass-consistent diagnostic wind model. *Journal of Applied Meteorology* 44(7), 1078–1089. doi: 10.1175/JAM2262.1.

6 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Übersicht über die Städte, die zur Untersuchung im Rahmen des vorliegenden Projektes ausgewählt wurden (Eigener Entwurf, Datengrundlage: LUBW). 9

Abb. 1.2: Verteilung der Ergebnisse von PT (links), UTCI (Mitte) und PET (rechts) für die Datensätze mit modifizierter Lufttemperatur T_a . Für jeden Index ist je eine Verteilung für $T_a -2^\circ\text{C}$, den Referenzdatensatz und eine für $T_a +2^\circ\text{C}$ dargestellt. Eine dickere Verteilung zeigt dabei ein häufigeres Ergebnis in diesem Bereich an. Die hier dargestellten Verteilungen gelten für Freiburg. 14

Abb. 1.3: Häufigkeit thermischer Belastungsklassen (Tab. 1.1) in den Ergebnissen für PT (oben), UTCI (Mitte) und PET (unten) in Freiburg. Die Grafik zeigt in jeweils eigenen Blocks von links nach rechts die Häufigkeit entsprechend dem unveränderten Datensatz und den modifizierten Testdatensätzen für die Lufttemperatur (T_a), die Windgeschwindigkeit (v), die relative Luftfeuchte (RH) und die mittlere Strahlungstemperatur (T_{mrt}). Die Modifikation des Datensatzes ist jeweils unterhalb der Säule angegeben. Eine Modifikation von 0 (bzw. Tmrt ganz rechts) entspricht dem Referenzdatensatz. 15

Abb. 1.4: Verteilung der Ergebnisse von PT (links), UTCI (Mitte) und PET (rechts) für die Datensätze mit modifizierter Windgeschwindigkeit. Für jeden Index ist je eine Verteilung für $v -2$ m/s, den Referenzdatensatz und eine für $v +2$ m/s dargestellt. Eine dickere Verteilung zeigt dabei ein häufigeres Ergebnis in diesem Bereich an. Die hier dargestellten Verteilungen gelten für Freiburg. 16

Abb. 1.5: Verteilung der Ergebnisse von PT (links), UTCI (Mitte) und PET (rechts) für die Datensätze mit modifizierter relativer Feuchte. Für jeden Index ist je eine Verteilung für RH -10 %, den Referenzdatensatz und eine für RH +10 % dargestellt. Eine dickere Verteilung zeigt dabei ein häufigeres Ergebnis in diesem Bereich an. Die hier dargestellten Verteilungen gelten für Freiburg. 17

Abb. 1.6: Verteilung der Ergebnisse von PT (links), UTCI (Mitte) und PET (rechts) für die Datensätze mit modifizierter mittlerer Strahlungstemperatur. Für jeden Index ist je eine Verteilung für einen Datensatz mit $T_{\text{mrt}} = T_a$ („Schatten“), einen Datensatz mit $T_{\text{mrt}} = 0.5 * T_{\text{mrt}} + 0.5 * T_a$ („Halbschatten“) und den Referenzdatensatz mit $T_{\text{mrt}} = T_{\text{mrt}}$ („Sonne“) dargestellt. Eine dickere Verteilung zeigt dabei ein häufigeres Ergebnis in diesem Bereich an. Die hier dargestellten Verteilungen gelten für Freiburg. 18

Abb. 1.7: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Karlsruhe. Die Häufigkeiten für Tag und Nachtstunden sind gestapelt dargestellt. 19

Abb. 1.8: Isoplethendiagramm zur Verteilung des Mittelwerts von PET im Tages- und Jahresverlauf in Karlsruhe. 20

Abb. 1.9: Häufigkeitsverteilung von PET für Karlsruhe über alle Jahre in Dekaden. Die Einteilung entspricht den thermischen Empfindungsklassen für Mitteleuropa (Tab. 1.1). 21

Abb. 1.10: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Mannheim. Die Häufigkeiten für Tag und Nachtstunden sind gestapelt dargestellt. 22

Abb. 1.11: Isoplethendiagramm zur Verteilung des Mittelwerts von PET im Tages- und Jahresverlauf in Mannheim.	24
Abb. 1.12: Häufigkeitsverteilung von PET für Mannheim über alle Jahre in Dekaden. Die Einteilung entspricht den thermischen Empfindungsklassen für Mitteleuropa (Tab. 1.1).	24
Abb. 1.13: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Freiburg. Die Häufigkeiten für Tag und Nachtstunden sind gestapelt dargestellt.	25
Abb. 1.14: Isoplethendiagramm zur Verteilung des Mittelwerts von PET im Tages- und Jahresverlauf in Freiburg.	26
Abb. 1.15: Häufigkeitsverteilung von PET für Freiburg über alle Jahre in Dekaden. Die Einteilung entspricht den thermischen Empfindungsklassen für Mitteleuropa (Tab. 1.1).	27
Abb. 1.16: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Ulm. Die Häufigkeiten für Tag und Nachtstunden sind gestapelt dargestellt.	28
Abb. 1.17: Isoplethendiagramm zur Verteilung des Mittelwerts von PET im Tages- und Jahresverlauf in Ulm.	29
Abb. 1.18: Häufigkeitsverteilung von PET für Ulm über alle Jahre in Dekaden. Die Einteilung entspricht den thermischen Empfindungsklassen (Tab. 1.1) für Mitteleuropa.	29
Abb. 1.19: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Konstanz. Die Häufigkeiten für Tag und Nachtstunden sind gestapelt dargestellt.	30
Abb. 1.20: Isoplethendiagramm zur Verteilung des Mittelwerts von PET im Tages- und Jahresverlauf in Konstanz.	31
Abb. 1.21: Häufigkeitsverteilung von PET für Konstanz über alle Jahre in Dekaden. Die Einteilung entspricht den thermischen Empfindungsklassen für Mitteleuropa (Tab. 1.1).	32
Abb. 2.1: Übersicht über die Lage und Ausdehnung der Regionen für die Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes. Quelle: Deutscher Wetterdienst	35
Abb. 2.2: Vergleich des thermischen Bioklimas von TRY 2010 und TRY 2035 der Region 6, die Teile des Stadtgebietes der Stadt Freiburg beinhaltet.	36
Abb. 2.3: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate (Juni, Juli und August) von „Heißer Sommer“ TRY 2010 und 2035 der Region 6, die Teile des Stadtgebietes der Stadt Freiburg beinhaltet.	38
Abb. 2.4: Vergleich des thermischen Bioklimas von TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12, die die Projektstädte Karlsruhe, Mannheim, Konstanz und Teile des Stadtgebietes der Stadt Freiburg beinhaltet.	40

- Abb. 2.5: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate (Juni, Juli und August) von „Heißer Sommer“ TRY 2010 und 2035 der Region 12, die die Projektstädte Karlsruhe, Mannheim, Konstanz und Teile des Stadtgebietes der Stadt Freiburg beinhaltet. 43
- Abb. 2.6: Vergleich des thermischen Bioklimas von TRY 2010 und TRY 2035 der Region 13, die auch die Projektstadt Ulm umfasst. 45
- Abb. 2.7: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate (Juni, Juli und August) von „Heißer Sommer“ TRY 2010 und 2035 der Region 12, der Region 13, die auch die Projektstadt Ulm umfasst. 47
- Abb. 2.8: Vergleich des thermischen Bioklimas des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035. 50
- Abb. 2.9: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate Juni, Juli und August des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus „Heißer Sommer“ TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035. 52
- Abb. 2.10: Vergleich des thermischen Bioklimas des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035. 55
- Abb. 2.11: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate Juni, Juli und August des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus „Heißer Sommer“ TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035. 57
- Abb. 2.12: Vergleich des thermischen Bioklimas des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus TRY 2010 und TRY 2035 der Region 06 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035. 60
- Abb. 2.13: Vergleich des thermischen Bioklimas des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035. 61
- Abb. 2.14: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate Juni, Juli und August des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus „Heißer Sommer“ TRY 2010 und TRY 2035 der Region 6 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035. 64
- Abb. 2.15: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate Juni, Juli und August des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus „Heißer Sommer“ TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035. 65
- Abb. 2.16: Vergleich des thermischen Bioklimas des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus TRY 2010 und TRY 2035 der Region 13 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035. 69
- Abb. 2.17: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate Juni, Juli und August des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus „Heißer Sommer“ TRY 2010 und TRY 2035 der Region 13 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035. 72

Abb. 2.18: Vergleich des thermischen Bioklimas des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035. 75

Abb. 2.19: Vergleich des thermischen Bioklimas der Sommermonate Juni, Juli und August des IST-Zustands (Messdaten) mit einem durch die aus „Heißer Sommer“ TRY 2010 und TRY 2035 der Region 12 errechneten Änderungen modifizierten Datensatz für 2035. 78

Abb. 2.20: Vergleich des thermischen Bioklimas des Ist-Zustands aus den Messdaten („2010“) mit den beiden Zukunftsszenarien für die Periode 2020 2050 („2035“) und 2070 2100 („2085“) in Freiburg. Unterschieden wird außerdem zwischen dem ganzen Tag (0 bis 24 Uhr, links), den Tagstunden (7 bis 18 Uhr, Mitte) und den Nachtstunden (19 bis 6 Uhr, rechts). 82

Abb. 3.1: Räumliche Verteilung von PET für das Szenario „Straße ohne Grün“ an einem Sommertag um 13 Uhr lokaler Zeit in einer Höhe von 1.5 m. Die Farben entsprechen den PET Klassen aus Tab. 1.1. Die schraffierten Flächen markieren die Grundfläche der Gebäude. Das Modellgebiet ist um 45° gegen die Nordrichtung gedreht. 89

Abb. 3.2: Räumliche Verteilung von PET für das Szenario „Fassadengrün“ an einem Sommertag um 13 Uhr lokaler Zeit in einer Höhe von 1.5 m. Die Farben entsprechen den PET Klassen aus Tab. 1.1. Die schraffierten Flächen markieren die Grundfläche der Gebäude. Das Modellgebiet ist um 45° gegen die Nordrichtung gedreht. 90

Abb. 3.3: Räumliche Verteilung von PET für das Szenario „Straße mit Bäumen“ an einem Sommertag um 13 Uhr lokaler Zeit in einer Höhe von 1.5 m. Die Farben entsprechen den PET Klassen aus Tab. 1.1. Die schraffierten Flächen markieren die Grundfläche der Gebäude. Das Modellgebiet ist um 45° gegen die Nordrichtung gedreht. 91

Abb. 3.4: Räumliche Verteilung von PET für das Szenario „Park mit Rasen“ an einem Sommertag um 13 Uhr lokaler Zeit in einer Höhe von 1.5 m. Die Farben entsprechen den PET Klassen aus Tab. 1.1. Die schraffierten Flächen markieren die Grundfläche der Gebäude. Das Modellgebiet ist um 45° gegen die Nordrichtung gedreht. 93

Abb. 3.5: Räumliche Verteilung von PET für das Szenario „Park mit Bäumen“ an einem Sommertag um 13 Uhr lokaler Zeit in einer Höhe von 1.5 m. Die Farben entsprechen den PET Klassen aus Tab. 1.1. Die schraffierten Flächen markieren die Grundfläche der Gebäude. Das Modellgebiet ist um 45° gegen die Nordrichtung gedreht. 94

Abb. 3.6: Räumliche Verteilung von PET für das Szenario „Park mit vielen Bäumen“ an einem Sommertag um 13 Uhr lokaler Zeit in einer Höhe von 1.5 m. Die Farben entsprechen den PET Klassen aus Tab. 1.1. Die schraffierten Flächen markieren die Grundfläche der Gebäude. Das Modellgebiet ist um 45° gegen die Nordrichtung gedreht. 95

Abb. 4.1: Beispiel für eine Fisheye-Grafik, aus welchem SVF und Sonnenstand zu einer bestimmten Zeit bezogen werden können. Gezeigt wird das Beispiel eines Punktes auf dem Platz der Alten Synagoge in Freiburg 97

Abb. 4.2: Zeichnung der Strömung um ein quaderförmiges, solides Hindernis. Eingezeichnet sind die drei Elemente der luvseitigen Stagnationszone, der leeseitigen Rezirkulation und der leeseitigen Zone verringerter Windgeschwindigkeit (ferner Nachlauf). Verändert nach Hunt et al. (1978). 99

Abb. 4.3: Räumliche Verteilung von PET für das Szenario „Park mit vielen Bäumen“ an einem Sommertag um 13 Uhr lokaler Zeit in einer Höhe von 1.5 m. Die Farben entsprechen den PET Klassen aus Tab. 1.1. Die schraffierten Flächen markieren die Grundfläche der Gebäude. Das Modellgebiet ist um 45° gegen die Nordrichtung gedreht. **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Abb. 4.4: Skizze der Lage der verschiedenen berechneten Einflusszonen eines soliden, quaderförmigen Hindernisses auf das Windfeld (FE_x/FE_y = luvseitige Stagnationszone in x- und y-Richtung, CW = naher Nachlauf, FW = ferner Nachlauf, d_w = Entfernung zwischen der Leeseite des Hindernisses und dem Ende der Nachlaufzone) unter der Annahme einer Anströmung von unten links (\nearrow). Verändert nach Röckle (1990) 102

Abb. 4.5: Windgeschwindigkeit und Windrichtung im Szenario „Straße ohne Alles“ berechnet durch das neue Windfeldmodell. Die schraffierten Flächen markieren die Grundfläche der Gebäude. Das Modellgebiet ist um 45° gegen die Nordrichtung gedreht. 105

7 Tabellenverzeichnis

- Tab. 1.1: Thermische Empfindungsklassen für Menschen in Mitteleuropa mit einer Aktivität von 80 W und einem Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung von 0.9 clo (verändert nach Matzarakis und Mayer 1996). 11
- Tab. 1.2: Überblick über die Meteorologischen Daten der Station Karlsruhe. Die Aufzeichnungen decken den Zeitraum 01.01.1981 bis 02.11.2008 in stündlicher Auflösung ab. Die Windgeschwindigkeit ist für eine Höhe von 1.1 m angegeben. 19
- Tab. 1.3: Überblick über die Meteorologischen Daten der Station Mannheim. Die Aufzeichnungen decken den Zeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 in stündlicher Auflösung ab. Die Windgeschwindigkeit ist für eine Höhe von 1.1 m angegeben. 22
- Tab. 1.4: Überblick über Tmrt und die Indizes PET und UTCI in Mannheim. Der Berechnungszeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 deckt sich mit dem der Messdaten (vergl. Abschnitt 1.2.1 und Tab. 1.4). 23
- Tab. 1.5: Überblick über die Meteorologischen Daten der Station Freiburg. Die Aufzeichnungen decken den Zeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 in stündlicher Auflösung ab. Die Windgeschwindigkeit ist für eine Höhe von 1.1 m angegeben. 25
- Tab. 1.6: Überblick über Tmrt und die Indizes PET und UTCI in Freiburg. Der Berechnungszeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 deckt sich mit dem der Messdaten (vergl. Abschnitt 1.2.1 und Tab. 1.6). 26
- Tab. 1.7: Überblick über die Meteorologischen Daten der Station Ulm. Die Aufzeichnungen decken den Zeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 in stündlicher Auflösung ab. Die Windgeschwindigkeit ist für eine Höhe von 1.1 m angegeben. 27
- Tab. 1.8: Überblick über Tmrt und die Indizes PET und UTCI in Ulm. Der Berechnungszeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 deckt sich mit dem der Messdaten (vergl. Abschnitt 1.2.1 und Tab. 1.8). 28
- Tab. 1.9: Überblick über die Meteorologischen Daten der Station Konstanz für den Zeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 in stündlicher Auflösung. Die Windgeschwindigkeit ist für eine Höhe von 1.1 m angegeben. 30
- Tab. 1.10: Überblick über Tmrt und die Indizes PET und UTCI in Konstanz. Der Berechnungszeitraum 01.01.1981 bis 20.10.2013 deckt sich mit dem der Messdaten (vergl. Abschnitt 1.2.1 und Tab. 1.10). 31
- Tab. 1.11: Überblick über das thermische Bioklima der Städte repräsentiert durch den thermischen Index PET im jeweiligen Messzeitraum. Alle Zahlen sind durchschnittliche Stunden des Auftretens der jeweiligen Klasse. Die beiden heißesten Klassen haben dabei im Mittel einen Anteil von weniger als 1 Stunde. 33
- Tab. 2.1: Überblick über die Änderung des thermischen Bioklimas der Städte über das ganze Jahr repräsentiert durch den thermischen Index PET auf Basis von TRY Datensätzen von 2010 bis 2035. Alle Zahlen sind durchschnittliche Stunden des Auftretens der jeweiligen Klasse. 85

Tab. 2.2: Überblick über die Änderung des thermischen Bioklimas der Städte über das ganze Jahr repräsentiert durch den thermischen Index PET auf Basis von TRY Datensätzen von 2010 bis 2035. Alle Zahlen sind durchschnittliche Stunden des Auftretens der jeweiligen Klasse. 85

Tab. 3.1: Eingangsgrößen und Einstellungen für alle ENVI-met Simulationen. 86

