

Klimawandel und Heizgradtage in Freiburg im Breisgau, Südwestdeutschland

A. Matzarakis, F. Thomsen, H. Mayer

Zusammenfassung Der Klimawandel äußert sich global, regional und lokal in einem Anstieg der bodennahen Lufttemperatur T_a . Dieser Effekt zeigt sich auch für Freiburg im Breisgau, der wärmsten Stadt Deutschlands. Simulationen der regionalen Klimaentwicklung sagen einen Anstieg von T_a um ca. 3,5 °C bis zum Ende des 21. Jahrhunderts voraus. Über den 30-jährigen Zeitraum von 1979 bis 2008 betrug T_a in Freiburg im Mittel 11,5 °C, während dieser Mittelwert in der Klimanormalperiode von 1961 bis 1990 nur bei 10,7 °C lag. Um die Auswirkungen des regionalen Klimawandels auf die thermischen Bedingungen in Freiburg zu analysieren, beschäftigt sich diese Studie mit den zeitlichen Änderungen der Anzahl der Heiz-, Heizgrad- und Kühlgradtage in dieser Stadt für den Zeitraum 1961 bis 2007. Zusätzlich wird die Änderung des Heizenergiebedarfs auf der Grundlage von Ergebnissen aus regionalen Klimasimulationen untersucht. Die Ergebnisse weisen auf eine Abnahme des Heizenergiebedarfs um ca. 30 % hin.

Climate change and heating degree days in Freiburg im Breisgau, south-west Germany

Abstract One significant characteristic of climate change is the increase of the near-surface air temperature T_a on a global, regional and local scale. For the city of Freiburg (south-west Germany), the warmest city in Germany, the increase of T_a until the end of the 21st century will be in the range of about 3.5 °C. The annual mean T_a in Freiburg was 11.5 °C in the 30-year period 1979 to 2008, whereas it was only 10.7 °C in the climate standard period 1961 to 1990. In order to analyse the effects of regional climate change on the thermal conditions in Freiburg, this study deals with the temporal changes of the number of heating days as well as heating and cooling degree days for the period 1961 to 2007 in this city. In addition, the change of heating energy demand is analyzed based on results of regional climate simulations. The results show a decrease of the heating energy demand of approx. 30%.

1 Einleitung

Die globalen anthropogenen Treibhausgasemissionen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit für den Anstieg der mittleren bodennahen Lufttemperatur T_a im globalen Maßstab verantwortlich sind [1], stiegen im Zeitraum von 1970 bis 2004 um 70 %, die CO₂-Emissionen sogar um 80 % an. Klimasimulationen prognostizieren mit hoher Wahrscheinlichkeit einen weiteren T_a -Anstieg. Er bewirkt eine Reduktion des Energieverbrauchs für die Beheizung von Innenräumen.

Ein „Heiztag“ ist ein Tag, an dem der Tagesmittelwert von T_a einen bestimmten Schwellenwert unterschreitet. Dementsprechend ist ein „Kühltag“ ein Tag, an dem der Tagesmittelwert von T_a einen bestimmten Schwellenwert überschreitet [2 bis 4]. Sobald diese Schwellenwerte unter- bzw. über-

schritten sind, erfolgt unter statistischem Aspekt eine Heizung oder Kühlung von Gebäuden und Wohnungen [5]. Um ein Maß für den Wärmeverbrauch in der Heizperiode zu bekommen, wird der Begriff „Gradtagszahl“ eingeführt. Die Gradtagszahl ist nach VDI 2067 [6] das Produkt aus der Zahl der Heiztage und der Differenz zwischen der mittleren Raumtemperatur und der mittleren Außentemperatur T_a . Um diese thermischen Bedingungen unter ökonomischen Aspekten in Zahl und Maß angeben zu können, werden Heiz- und Kühlgradtage berechnet. Die Bestimmung des Energieverbrauchs erfolgt also auf der Grundlage der T_a -Tagesmittel [2; 7 bis 9].

Freiburg ist aufgrund seiner topografischen Lage die wärmste Stadt in Deutschland. Daher sind hier problem-spezifische Informationen über die Entwicklung der thermischen Bedingungen infolge des regionalen Klimawandels von besonderem Interesse. Ziel dieser Studie ist die Analyse der zeitlichen Veränderung der Anzahl der Heiz-, Heizgrad- und Kühlgradtage in dieser wärmeexponierten Stadt. Eine innerstädtische Differenzierung lässt sich auf der Basis der ermittelten Daten allerdings nicht durchführen.

2 Daten

Für eine detaillierte Untersuchung des Heizenergiebedarfs sind lange Zeitreihen der gemessenen und simulierten T_a -Daten erforderlich. Für die vorliegende Untersuchung werden T_a -Tagesmittel von retrospektiven Klimazeitreihen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) (1961 bis 2007) sowie aus zwei auf der Basis des A1B-Szenarios (1961 bis 2100) und B1-Szenarios (2001 bis 2100) mit dem REMO-Modell durchgeführten regionalen Klimasimulationen verwendet [10 bis 15]. Die Simulationen beruhen auf Annahmen über den Ausstoß von Treibhausgasen (Emissionsszenarien) auf der Grundlage der Berichte des Weltklimarates [1].

Das A1-Szenario beschreibt eine zukünftige Welt mit raschem Wirtschaftswachstum und rascher Einführung neuer und effizienterer Technologien. Es ist in drei Szenarien unterteilt, die unterschiedliche Ausrichtungen technologischer Änderungen im Energiesystem beschreiben: (i) fossilintensiv (A1FI), (ii) nichtfossile Energiequellen (A1T) und (iii) ausgewogene Nutzung aller Quellen (A1B). Das A1B-Szenario spiegelt eine nicht allzu große Abhängigkeit von einer bestimmten Energiequelle und Verbesserungspotenzial für alle Energieversorgungs- und Energieverbrauchstechnologien wider [1]. Das in dieser Arbeit verwendete A1B-Szenario führt in den Klimasimulationen zum Ergebnis, dass T_a bis zum Jahr 2100 um 1,7 bis 4,4 °C ansteigt.

Das B1-Szenario beschreibt eine zusammenwachsende Welt mit raschen Änderungen der wirtschaftlichen Strukturen in Richtung einer Dienstleistungs- und Informationswirtschaft bei gleichzeitigem Rückgang des Materialverbrauchs sowie der Einführung von sauberen und ressourceneffizienten Technologien. Das Schwergewicht liegt auf globalen Lösun-

Prof. Dr. Andreas Matzarakis, Finn Thomsen,
Prof. Dr. Helmut Mayer,

Meteorologisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität
Freiburg.

gen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit, einschließlich erhöhter sozialer Gerechtigkeit, aber ohne zusätzliche Klimainitiativen [1]. Klimasimulationen mit dem B1-Szenario führen zu einem T_a -Anstieg von 1,1 bis 2,9 °C bis zum Jahr 2100.

Um regionale Klimaprojektionen für die Region Freiburg zu erstellen, wurden Ergebnisse aus Simulationen mit dem regionalen Klimamodell REMO verwendet, das am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) entwickelt wurde [11; 14]. REMO wird durch das globale gekoppelte Atmosphäre-Ozean-Modell ECHAM5/MPI-OM [15 bis 17] initialisiert und angetrieben. Das bedeutet, dass an den seitlichen Rändern des Untersuchungsgebiets Luftmassen, wie sie im Globalmodell berechnet wurden, in das Berechnungsgebiet des regionalen Modells hineinströmen. Mithilfe von REMO wird dann ein zukünftiges regionales Klima unter Berücksichtigung der globalen Informationen sowie der lokalen und regionalen Gegebenheiten simuliert. Diese regionalen Klimamodellläufe werden mit einer horizontalen Auflösung von 0,088° (10 km x 10 km) und einer zeitlichen Auflösung bis zu wenigen Stunden durchgeführt.

REMO ist ein dreidimensionales, hydrostatistisches, atmosphärisches Zirkulationsmodell, das die relevanten physikalischen Prozesse dynamisch berechnet [10; 11; 14; 18]. Es ist aus dem Europamodell des DWD hervorgegangen [19; 20]. Die prognostischen Variablen des Modells sind die horizontalen Windvektorkomponenten, der Luftdruck im Bodenniveau, Lufttemperatur, spezifische Feuchte sowie Flüssigwassergehalt. Für die hier vorliegenden Untersuchungen wurde REMO mit den physikalischen Parametrisierungen aus ECHAM 5 betrieben, da diese auf Klimasimulationen abgestimmt sind und außerdem eine möglichst große Konsistenz mit dem antreibenden Globalmodell erreicht wird.

REMO ist ein Gitterpunktsmodell und liefert somit Ergebnisse für ein über das gesamte Simulationsgebiet (Deutschland, Österreich und Schweiz) gelegtes Raster. Im Rahmen dieser Untersuchung werden die Daten des Regionalmodells REMO für den Untersuchungszeitraum von 1961 bis 2100 verwendet. Dabei liegen Simulationsresultate für das A1B-Szenario von 1950 bis 2100 vor. Ergebnisse aus B1-Szenarienläufen sind dagegen nur von 2001 bis 2100 verfügbar. Der Informationstransfer vom größeren Modellgebiet zu REMO erfolgt über die acht Randgitterboxen jeder Seite. Die Größe einer Gitterbox beträgt 10 km x 10 km. Die Region Freiburg wurde für die Berechnung in die Mitte der neun Gitterboxen gelegt.

3 Methodik

Um die Heizgradtage (HGT) und Kühlgradtage (KGT) pro Jahr berechnen zu können, benötigt man die Tagesmittelwerte von T_a , die Heizgrenze T_{hg} bzw. Kühlgrenze T_{kg} (einen Schwellenwert von T_a), und die Anzahl z der Heiztage bzw. Kühltag. Zur Bestimmung der Gradtagszahlen GTZ wird eine Lufttemperatur im Innenraum (Innenraumtemperatur) von 20 °C angenommen. Diese genannten thermischen Kenngrößen werden nach folgenden Ansätzen berechnet [5; 4; 12; 21; 22]:

Heizgradtage

$$HGT_{hg} = \sum_1^z (T_{hg} - T_a) \quad (1)$$

HGT_{hg} : Heizgradtage für ein Jahr in K·d/a
 z : Anzahl der Heiztage eines Jahres
 T_{hg} : Heizgrenze in °C
 T_a : mittlere Lufttemperatur eines Heiztages in °C

Kühlgradtage

$$KGT_{kg} = \sum_1^z (T_a - T_{kg}) \quad (2)$$

KGT_{kg} : Kühlgradtage für ein Jahr in K·d/a
 z : Anzahl der Kühltag eines Jahres
 T_{kg} : Kühlgrenze in °C
 T_a : mittlere Lufttemperatur eines Kühltag in °C

Berechnung der Gradtagszahlen (bei einer Raumtemperatur von 20 °C)

$$GTZ_{20/hg} = \sum_1^z (T_{a,i} - T_a) \quad (3)$$

$GTZ_{20/hg}$: Gradtagszahl für ein Jahr bei gewählter Heizgrenze in K·d/a
 z : Anzahl der Heiztage eines Jahres
 $T_{a,i}$: mittlere Raumtemperatur in °C
 T_a : mittlere Lufttemperatur eines Heiztages

Berechnung des Heizenergieverbrauchs bei einer Raumtemperatur von 20 °C und der Heizgrenztemperatur von 15 °C

$$HEV_{Zukunft} = HEV_{Mittel} \cdot \frac{GTZ_{Zukunft}}{GTZ_{Mittel}} \quad (4)$$

$HEV_{Zukunft}$: Heizenergieverbrauch in kWh/a, der berechnet werden soll
 HEV_{Mittel} : Heizenergieverbrauch, der für einen bestimmten Zeitraum bekannt ist (hier 1997 bis 2007, [23])
 $GTZ_{Zukunft}$: Gradtagszahl, die für eine bestimmte Zeit berechnet wurde
 GTZ_{Mittel} : Gradtagszahl, die für den gewählten Zeitraum bekannt ist (hier 1997 bis 2007)

International sind verschiedene Heizgrenzen T_{hg} für Heizgradtage (sog. Basistemperaturen) festgelegt. In dieser Untersuchung wurden vier T_{hg} -Werte verwendet: 15, 14, 13 und 12. Damit lässt sich abschätzen, wie die berechneten Werte (Heiz- und Heizgradtage sowie Gradtagszahlen) durch unterschiedliche T_{hg} -Werte beeinflusst werden und zu welchem Energieeinsparpotenzial schon geringe Änderungen im Heiz- und Kühlverhalten der Bevölkerung führen können.

3 Ergebnisse

Die Analyse der Ergebnisse erfolgt in vier Schritten:

a) Analyse der Heiztage für verschiedene Basistemperaturen (12, 13, 14 und 15 °C),

Anzahl der mittleren jährlichen Heiztage je Dekade für Freiburg mit den vier Heizgrenzen (T_{hg}) von 15, 14, 13 und 12 °C, basierend auf (i) simulierten T_a -Tagesmittelwerten für das A1B-Szenario im Zeitraum von 1961 bis 2100 und (ii) gemessenen T_a -Tagesmittelwerten im Zeitraum von 1961 bis 2007 an der Messstelle Freiburg des Deutschen Wetterdienstes.

Dekade	Heiztage (15°C) A1B	Heiztage (14°C) A1B	Heiztage (13°C) A1B	Heiztage (12°C) A1B	Heiztage (15°C) DWD	Heiztage (14°C) DWD	Heiztage (13°C) DWD	Heiztage (12°C) DWD
1961–1970	265	245	228	209	249	232	215	198
1971–1980	250	229	209	189	251	235	220	204
1981–1990	237	219	201	185	241	225	207	191
1991–2000	247	231	214	197	238	219	202	186
2001–2010	247	229	209	192	229*	210*	194*	178*
2011–2020	242	222	206	190				
2021–2030	239	222	207	191				
2031–2040	230	215	197	181	*Zeitraum (2001-2007)			
2041–2050	221	205	185	169				
2051–2060	220	204	189	174				
2061–2070	206	194	181	165				
2071–2080	201	184	171	158				
2081–2090	193	179	165	147				
2091–2100	193	178	162	146				
r^2	0,922	0,908	0,886	0,861	0,891	0,885	0,847	0,818

b) Analyse der Heizgradtage für eine Basistemperatur von 15 °C,

c) Analyse der Gradtagszahlen (bei einer Innenraumtemperatur von 20 °C) für eine Basistemperatur von 15 °C,

d) Heizenergiebedarf für Freiburg.

Der Vergleich zwischen den Heiztagen mit unterschiedlichen T_{hg} -Werten ergab Folgendes (Tabelle): In der Dekade von 1961 bis 1970 gab es 249 Heiztage bei einer Heizgrenze von 15 °C, 232 Heiztage bei der Heizgrenze von 14 °C, 215 Heiztage bei einer Heizgrenze von 13 °C und 198 Heiztage bei einer Heizgrenze von 12 °C. Damit wurde die Abnahme der Heiztage mit geringerer Heizgrenze für den Untersuchungsraum Freiburg quantifiziert. Dieses Ergebnis ist auch auf die anderen betrachteten Zeiträume übertragbar. Im Durchschnitt hat ein Absenken der Heizgrenze von 15 auf 12 °C eine Reduzierung um ca. 50 Heiztage zur Folge [24].

Die Anzahl der Heiztage geht bei der Heizgrenze von 15 °C von der Dekade von 2001 bis 2100 um 54 Tage zurück (Tabelle). Der Rückgang bei den Heizgrenzen von $T_{hg} = 14$ °C (51 Tage), $T_{hg} = 13$ °C (47 Tage) und $T_{hg} = 12$ °C (46 Tage) verläuft ähnlich. Dieser negative Trend ist bei den Heiztagen sowohl auf der Grundlage von gemessenen als auch simulierten T_a -Werten statistisch signifikant.

Vergleicht man die Anzahl der Heiztage pro Dekade auf der Grundlage der gemessenen und simulierten T_a -Werte im gesamten Zeitraum von 1961 bis 2100 bei einer Heizgrenze von $T_{hg} = 15$ °C, dann existiert eine relativ gute Übereinstimmung zwischen der Anzahl der Heiztage auf der Basis von gemessenen (DWD-Werte) und simulierten (A1B-Szenario) T_a -Werten in den beiden Dekaden von 1971 bis 1980 und 1981 bis 1990 (Bild 1). In den drei übrigen miteinander vergleichbaren Dekaden

liegt die Anzahl der Heiztage aus den simulierten T_a -Werten über jener, die auf T_a -Messungen des DWD an der Station Freiburg basiert. Ab der Dekade von 2021 bis 2050 sinkt die Anzahl der Heiztage des A1B-Szenarios unter die des B1-Szenarios.

Kennt man die Ergebnisse für die Anzahl der Heiztage, lassen sich die Ergebnisse für die Anzahl der Heizgradtage abschätzen, da sich in den Analysen ein direkter Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen ergeben hat. Die Anzahl der Heizgradtage auf der Basis der gemessenen T_a -Werte liegt in den drei Dekaden des Zeitraums von 1961 bis 1990 über derjenigen des simulierten A1B-Szenarios (Bild 2). Ab der Dekade von 2031 bis 2040 liegt die Anzahl der Heizgradtage des A1B-Szenarios unter derjenigen des B1-Szenarios. Der Verlauf von *HGT* weist für alle drei Fälle einen deutlichen negativen Trend auf.

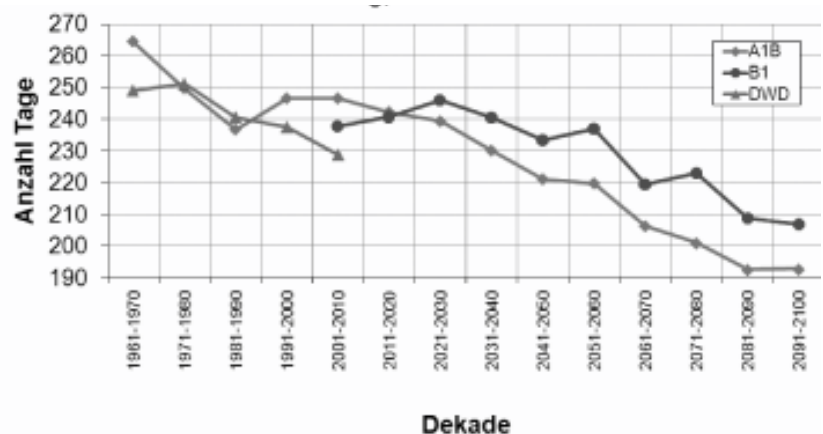


Bild 1. Anzahl der mittleren jährlichen Heiztage je Dekade für Freiburg mit der Heizgrenze von $T_{hg} = 15$ °C, basierend auf (i) simulierten T_a -Tagesmittelwerten für das A1B- und B1-Szenario im Zeitraum von 1961 bis 2100 und (ii) gemessenen T_a -Tagesmittelwerten im Zeitraum von 1961 bis 2007 an der Messstelle Freiburg des Deutschen Wetterdienstes.

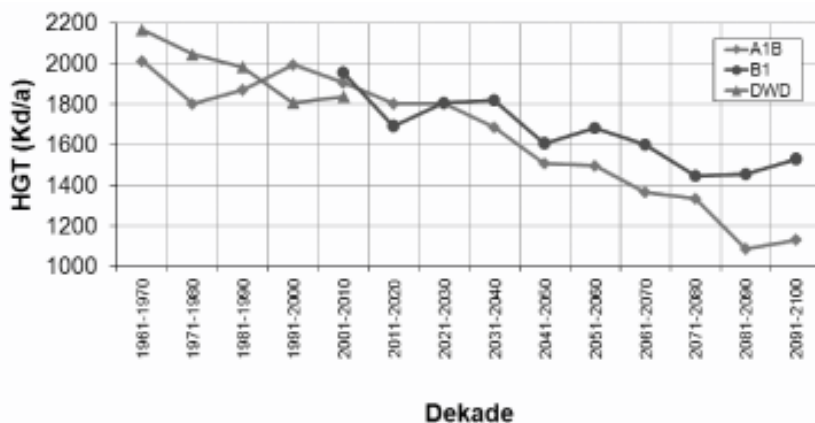


Bild 2. Mittlere jährliche Heizgradtage (HGT) je Dekade für Freiburg mit der Heizgrenze von $T_{hg} = 15$ °C, basierend auf (i) simulierten T_a -Tagesmittelwerten für das A1B- und B1-Szenario im Zeitraum von 1961 bis 2100 und (ii) gemessenen T_a -Tagesmittelwerten im Zeitraum von 1961 bis 2007 an der Messstelle Freiburg des Deutschen Wetterdienstes.

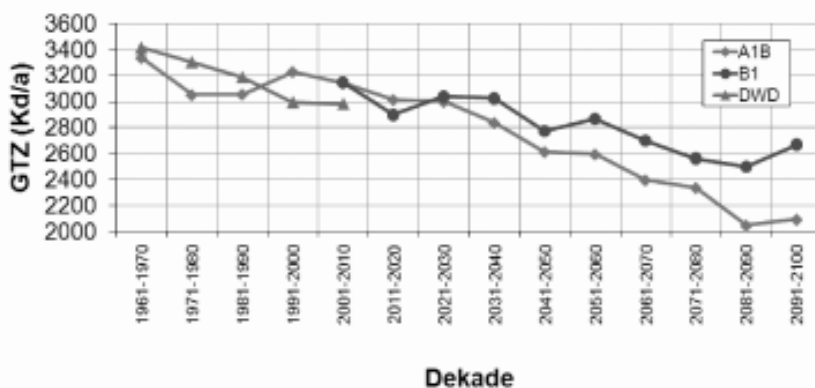


Bild 3. Mittlere jährliche Gradtagszahlen (GTZ) je Dekade für Freiburg mit der Heizgrenze von $T_{hg} = 15$ °C, basierend auf (i) simulierten T_a -Tagesmittelwerten für das A1B- und B1-Szenario im Zeitraum von 1961 bis 2100 und (ii) gemessenen T_a -Tagesmittelwerten im Zeitraum von 1961 bis 2007 an der Messstelle Freiburg des Deutschen Wetterdienstes.

Die zeitliche Entwicklung der Gradtagszahlen ist wie bei den Heiz- und Heizgradtagen durch einen negativen Trend gekennzeichnet (Bild 5). In den drei Dekaden von 1961 bis 1990 befinden sich die Gradtagszahlen, die auf den T_a -Messwerten des DWD basieren, über den Werten des A1B-Szenarios. Ab der Dekade von 2021 bis 2050 liegen alle errechneten Gradtagszahlen des B1-Szenarios über denen des A1B-Szenarios.

Eine weitere Möglichkeit zur Quantifizierung der lokalen thermischen Auswirkungen der regionalen Klimaentwicklung bietet die Berechnung des Heizenergiebedarfs (HEV) für Freiburg mit seinen ca. 25 000 Gebäuden. „Mittlere Gebäude“ in Freiburg bestehen aus drei bis sechs Wohneinheiten, wurden im Zeitraum zwischen 1949 und 1960 gebaut und besitzen eine effektive Fläche von 350 m² mit einem jährlichen Energieverbrauch von 61 950 kWh/a. Laut Fitz [25] betrug der mittlere jährliche Energieverbrauch für den Zeitraum von 1997 bis 2007 in Freiburg 1 442 GWh/a. Beim Heizenergieverbrauch ist für die A1B- und B1-Szenarios ein negativer Trend zu erkennen (Bild 4). Der Gesamtenergieverbrauch der Stadt Freiburg im Mittel über die Jahre von 1997 bis 2007 ist in dieser Abbildung als Balken dargestellt. Wie auch bei den Abbildungen zuvor liegen die DWD-Resultate

der ersten Dekaden unter den A1B- (2011 bis 2050) und B1-Resultaten (2021 bis 2040). Danach befinden sich die Werte des Heizenergieverbrauchs unter dem im Zeitraum von 1997 bis 2007. Da der HEV auf den Gradtagszahlen basiert, ist auch hier ein ähnlicher Verlauf der Kurven der Szenarios zueinander wie in Bild 3 zu erkennen: von 2011 bis 2020: B1 unter A1B, danach darüber; von 2021 bis 2030: B1 knapp über A1B; von 2041 bis 2050: Einbruch beim B1-Szenario; von 2091 bis 2100: leichter Anstieg beim A1B-Szenario.

Bei den Berechnungen für das letzte Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts und den Beginn des 21. Jahrhunderts zeigt sich, dass in Freiburg die gemessenen T_a -Tagesmittel deutlich höher waren als die über das A1B-Szenario simulierten. In den zwei Dekaden von 1991 bis 2000 und 2001 bis 2010 ist die Anzahl von Heiz- und Heizgradtagen auf der Basis gemessener T_a -Werte niedriger als die aus Klimasimulationen abgeleitete. Die Unterschiede zwischen den simulierten und gemessenen Bedingungen sind nach [25] ein Ergebnis der milden Winter und heißen Sommer dieser Periode.

Bei den Heiz- und Heizgradtagen sowie den Gradtagszahlen, die auf gemessenen als auch simulierten T_a -Werten beruhen, ist ein negativer linearer Trend zu erkennen. Der Gesamtenergieverbrauch der Stadt Freiburg weist bei den Szenarios ebenfalls einen negativen Trend auf. Bei den Kühl- und Kühlgradtagen hingegen existiert ein positiver linearer Trend.

Ganz allgemein können aufgrund der Analyse aller erzielten Resultate folgende Aussagen gemacht werden: Es kann mit einer Reduzierung der Heiztage um ca. vier, der Heizgradtage um ca. 60 und der Gradtagszahlen um ca. 70 pro Dekade gerechnet werden.

Wird als Heizgrenze 15 anstelle von 12 °C gewählt, können sich die Heiztage um ca. 50, die Heizgradtage um ca. 620 und die Gradtagszahlen um ca. 320 erniedrigen. Für den Heizenergieverbrauch ergibt sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine Abnahme von ca. 30 %.

Aus einer Abnahme der Heizgradtage und somit des Heizenergiebedarfs resultiert eine Zunahme der Anzahl der Kühlgradtage. In Bild 5 sind die Kühlgradtage auf der Grundlage der Basistemperatur von 18,3 °C dargestellt. Prinzipiell zeigt sich, dass es mit den gemessenen als auch simulierten T_a -Werten zu einer Zunahme der Anzahl der Kühlgradtage kommt. Für die Kühlgradtage wurde ein positiver Trend ermittelt. In den Zeiträumen von 1971 bis 1990 existiert eine relativ gute Übereinstimmung zwischen der Anzahl der Kühlgradtage auf der Basis von gemessenen und simulierten (A1B-Szenario) T_a -Werten. Nach der Dekade von 1981 bis 1990 ist die Anzahl der Kühlgradtage aus REMO-Simulationen kleiner als diejenige aus gemessenen T_a -Werten.

Es wird mit einem Anstieg der Kühltage um ca. vier und der Kühlgradtage um ca. 25 pro Dekade gerechnet.

4 Diskussion

Die Gradtagszahl liegt in weiten Teilen Deutschlands zwischen 3 000 und 4 000 [26]. Nur in den Höhenlagen der Mittelgebirge steigt die GTZ auf Werte zwischen 4 000 und 5 000. In den Alpen werden jedoch noch höhere GTZ-Werte von bis zu 7 000 erreicht. Dies bedeutet in erster Näherung für die Gradtagszahl: je niedriger der T_a -Tagesmittelwert, desto größer ist GTZ [12].

Für Freiburg ergibt sich aus den Berechnungen von [12], dass die GTZ bis zum Jahr 2100 beim B1-Szenario um 500 bis 750 und beim A1B-Szenario zwischen 1 000 und 1 500 abnehmen könnte. Für alle Szenarien werden für das Ende dieses Jahrhunderts Abnahmen berechnet. Für die GTZ nehmen die Werte ab: in B1 um etwa 700, in A1B um ca. 1 000 im Flächenmittel. Becker et al. [26] fanden bei ihren Simulationen (basierend auf den Klimasimulationen A1B des CLM-Modells von 2011 bis 2050) heraus, dass die Küstenbereiche sowie die Höhenlagen der Mittelgebirge und die Alpenregion zu den „heiztechnischen Gewinnern“ gehören. Die GTZ würde im Vergleich zum Zeitraum von 1961 bis 2000 um ca. 300 abnehmen. Für das Rhein-Main-Gebiet und große Teile der östlichen Bundesländer wären geringere Änderungen zu verzeichnen. Der Heizbedarf nimmt auch hier ab, aber deutlich geringer als z. B. in Schleswig-Holstein.

Die Heizgradtage werden sich laut den Szenarien reduzieren. Damit verbunden wäre ein geringerer Energiebedarf für das Heizen und ein Sinken der Kosten, vorausgesetzt die Preise bleiben stabil. Aber was passiert, wenn mehr gekühlt wird? Wird dann der Energiebedarf, der für das Heizen eingespart wurde, durch das Kühlen vielleicht doch aufgewogen oder könnten dadurch sogar höhere Kosten entstehen?

5 Schlussfolgerungen

Die Studie hat für die Stadt Freiburg in quantitativer Weise aufgezeigt, wie sich Kenngrößen der bodennahen Lufttemperatur, die für Heizen und Kühlen relevant sind, im Zeitraum von 1961 bis 2100 unter dem Einfluss des regionalen Klimawandels verändern. Die Grundlage dafür bilden gemessene T_a -Tagesmittelwerte bis 2007 und simulierte T_a -Tagesmittelwerte im gesamten Untersuchungszeitraum. Die Studie hat vordergründig lokalen Charakter, weil sie sich nur auf die Stadt Freiburg bezieht. Berücksichtigt man jedoch, dass Freiburg die wärmste Stadt in Deutschland und somit durch eine klimatische Hintergrundsituation auf

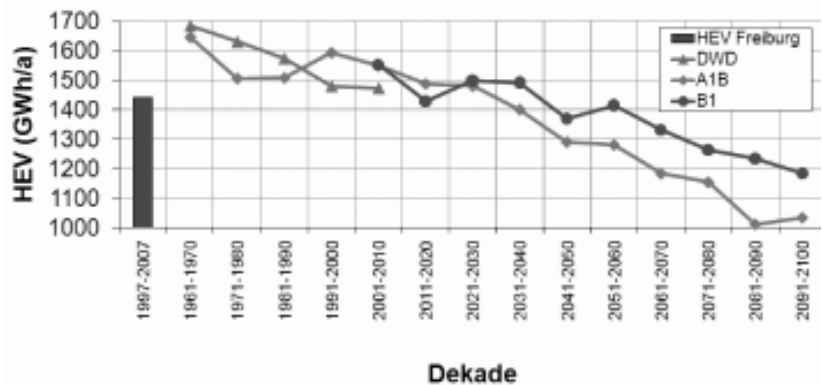


Bild 4. Mittlerer Heizenergiebedarf (HEV) je Dekade für Freiburg mit der Heizgrenze von $T_{hg} = 15^\circ\text{C}$, basierend auf (i) simulierten T_a -Tagesmittelwerten für das A1B- und B1-Szenario im Zeitraum von 1961 bis 2100 und (ii) gemessenen T_a -Tagesmittelwerten im Zeitraum von 1961 bis 2007 an der Messstelle Freiburg des Deutschen Wetterdienstes.

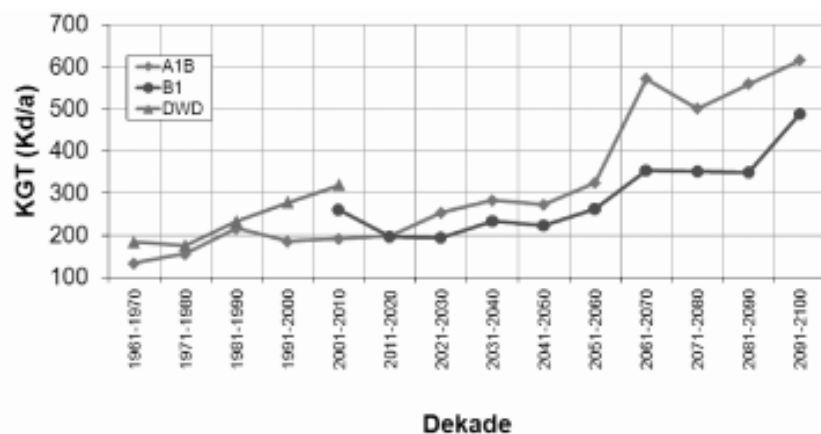


Bild 5. Mittlere jährliche Kühlgradtage (KGT) je Dekade für Freiburg mit der Kühlgrenze von $T_{kg} = 18.3^\circ\text{C}$, basierend auf (i) simulierten T_a -Tagesmittelwerten für das A1B- und B1-Szenario im Zeitraum von 1961 bis 2100 und (ii) gemessenen T_a -Tagesmittelwerten im Zeitraum von 1961 bis 2007 an der Messstelle Freiburg des Deutschen Wetterdienstes.

einem erhöhten thermischen Niveau gekennzeichnet ist, gewinnen die lokalen Resultate an genereller Bedeutung.

Die hier erzielten Ergebnisse spiegeln die Folgen des positiven Trends der Lufttemperatur innerhalb des Klimawandels wider. Bei ihrer Beurteilung im stadtplanerischen Abwägungsprozess werden die Resultate für die Kühlgradtage langfristig eine steigende Bedeutung erlangen. Sie bilden eine Verbindung zu extremer Hitze, die eine zentrale Erscheinungsform von Extremwetter darstellt. Es erfährt durch den Klimawandel eine Verstärkung im regionalen Maßstab. Die Zunahme der Kühlgradtage weist vordergründig auf einen erhöhten Klimatisierungs- und damit Energiebedarf in Gebäuden hin. Zur Einhaltung von Umweltschutzziele, aber auch zur Aufrechterhaltung eines Mindestmaßes an thermischem Komfort für Stadtbewohner sollte hier mit allen Mitteln im Bereich von Städtebau und Architektur versucht werden, den Eintrag von Hitze in Innenräume, d. h. überwiegend tagsüber, so zu reduzieren, dass Energieverbrauchende Klimaanlage nicht eingesetzt werden müssen.

Literatur

- [1] Vierter Sachstandsbericht des IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4). Klimaänderung 2007: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. www.de-ipcc.de
- [2] *Martinaitis, V.*: Analytic calculation of degree-days for the regulated heating season. *Energy Buildings* 28 (1998), S. 185-189.
- [3] VDI 3807 Blatt 1: Energie- und Wasserverbrauchskennwerte für Gebäude – Grundlagen. Berlin: Beuth 2007.
- [4] VDI 4710 Blatt 2: Meteorologische Daten in der technischen Gebäudeausrüstung – Gradtage. Berlin: Beuth 2007.
- [5] *Thom, H. C. S.*: The rational relationship between heating degree days and temperature. *Monthly Weath. Rev.* 82 (1954) Nr. 1, S. 1-6.
- [6] VDI 2067 Blatt 10: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Energiebedarf beheizter und klimatisierter Gebäude. Berlin: Beuth 1998.
- [7] *Hitchen, E. R.*: Degree days in Britain. *Build. Serv. Eng. Des. Tech.* 2 (1981), S. 73-82.
- [8] *McMaster, G. S.; Wilhelm, W. W.*: Growing degree-days. One equation, two interpretations. *Agricult. Forest Meteorol.* 87 (1987), S. 291-300.
- [9] *Matzarakis, A.; Balafoitis, C.*: Heating degree days as an index of energy consumption. *Int. J. Climatol.* 24 (2004), S. 1817-1828.
- [10] *Jacob, D.; van den Hurk, B.; 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.; Yang, X.*: A comprehensive model intercomparison study investigating the water budget during the BALTEX PIDCAP period. *Meteorol. Atmos. Phys.* 77 (2001), S. 19-43.
- [11] *Jacob, D.; Bärring, L.; Christensen, O. B.; Christensen, J. H.; Hagemann, S.; Hirschi, M.; Kjellström, E.; Lenderink, G.; Rockel, B.; Schär, C.; Seneviratne, S. I.; Somot, S.; Van Ulden, A.; Van Den Hurk, B.*: An inter-comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and 34 model performance. *Climatic Change* 81 (2007), S. 31-52.
- [12] *Jacob, D.; Göttel, H.; Kotlarski, S.; Lorenz, P.; Sieck, K.*: Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 204 41 138. Max-Planck-Institut für Meteorologie. Hamburg 2008.
- [13] *Zebisch, M.; Grothmann, T.; Schröter, D.; Haße, C.; Fritsch, U.; Cramer, W.*: Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. 2005. www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2947.pdf
- [14] *Jacob, D.*: A note on the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorol. Atmos. Phys.* 77 (2001), S. 61-73.
- [15] *Roeckner, E.; Bäuml, G.; Bonaventura, L.; Brokopf, R.; Esch, M.; Giorgetta, M.; Hagemann, S.; Kirchner, I.; Kornblüeh, L.; Manzini, E.; Rhodin, A.; Schlese, U.; Schulzweida, U.; Tompkins, A.*: The atmospheric general circulation model ECHAM5: Part I: Model description. Report Nr. 349. Max-Planck-Institut für Meteorologie. Hamburg 2003.
- [16] *Marsland, S. J.; Haak, H.; Jungclaus, J. H.; Latif, M.; Röske, F.*: The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. *Ocean Modelling* 5 (2003), S. 91-127.
- [17] *Jungclaus, J. H.; Botzet, M.; Haak, H.; Keenlyside, N.; Luo, J.-J.; Latif, M.; Marotzke, J.; Mikolajewicz, U.; Roeckner, E.*: Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM. *J. Climate* 19 (2006), S. 3952-3972.
- [18] *Jacob, D.; Podzun, R.*: Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorol. Atmos. Phys.* 63 (1997), S. 119-129.
- [19] *Majewski, D.*: The Europa-Modell of the Deutscher Wetterdienst. ECMWF Seminar on Numerical Methods in Atmospheric Models 2 (1991), S. 147-191.
- [20] *Majewski, D.; Doms, G.; Edlmann, W.; Gertz, M.; Hanisch, T.; Heise, E.; Link, A.; Prohl, P.; Schaettler, U.; Ritter, B.*: Dokumentation des EM/DM-Systems. Abteilung Forschung, Deutscher Wetterdienst, Offenbach 1995.
- [21] *Prettenthaler, F.; Gobiet, A.; Habsburg-Lothringen, C.; Steinacker, R.; Töglhofer, C.; Türk, A.*: Auswirkungen des Klimawandels auf Heiz- und Kühlenergiebedarf in Österreich. StartClim2006.F. Teilprojekt von StartClim2006. 2007.
- [22] WESTE-Gradtagszahlen, 2008. www.dwd.de
- [23] *Fitz, S.*: GIS-gestützte Klimaschutz- und Energieverbrauchsanalyse der Gebäudetypologie der Stadt Freiburg im Breisgau. Magisterarbeit am Institut für Physische Geographie der Albert-Ludwig-Universität Freiburg 2008.
- [24] *Thomsen, F.*: Langzeitliche Entwicklung der Heiz- und Kühlgradtage in Freiburg auf der Grundlage von Messungen und REMO-Modellierungen. Bachelorarbeit. Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg 2008.
- [25] *Schönwiese, C.-D.; Staeger, T.; Trömel, S.*: Klimawandel und Extremereignisse in Deutschland. Klimastatusbericht 2005. www.dwd.de
- [26] *Becker, P.; Deutschländer, T.; Namyslo, J.; Koßmann, M.; Sievers, U.; Süßenguth, G.; Tinz, B.*: Klimawandel und technische Klimatologie. 2007. http://meetings.copernicus.org/dach2007/download/DACH2007_A_00161.pdf