

DWD

Untersuchung

zur Entwicklung
der Anzahl der klimatischen Kenntage
sowie
des sommerlichen Stadtklimaeffektes
in Bremerhaven



Untersuchung

zur Entwicklung der Anzahl der klimatischen Kenntage sowie des sommerlichen Stadtklimaeffektes in Bremerhaven

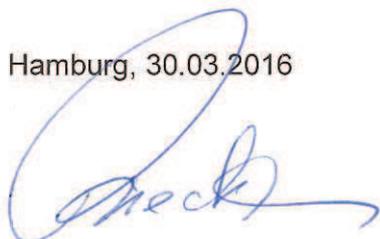
Auftraggeber:

Freie Hansestadt Bremen
Senator für Umwelt, Bau und Verkehr
Ansgaritorstraße 2
28195 Bremen

Wissenschaftliche Bearbeitung:

Dipl.-Met. Gabriele Krugmann

Hamburg, 30.03.2016

A blue ink signature of Wolfgang Riecke, written in a cursive style.

Dipl.-Met. Wolfgang Riecke
Leiter des Regionalen Klimabüros
Hamburg

A blue ink signature of Gabriele Krugmann, written in a cursive style.

Dipl.-Met. Gabriele Krugmann
Regionales Klimabüro Hamburg

Diese Untersuchung ist urheberrechtlich geschützt, außerhalb der mit dem Auftraggeber vertraglich vereinbarten Nutzungsrechte ist seine Vervielfältigung oder Weitergabe an Dritte sowie die Mitteilung seines Inhaltes, auch auszugsweise, nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des Deutschen Wetterdienstes gestattet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Lage der Stadt Bremerhaven	4
3	Verwendete Unterlagen	5
4	Klimatologische Zeitreihen der Lufttemperatur an der Wetterstation Bremerhaven..	6
5	Die klimatologischen Kenntage in Bremerhaven und Umgebung	9
5.1	Anzahl der Kenntage.....	10
5.2	Andauer der Kenntage.....	10
5.3	Tropennächte sind flankiert von Sommertagen.....	11
5.4	Die Kenntage in Bremerhaven bezogen auf unterschiedliche klimatische Zeiträume ..	11
5.4.1	Sommertage in Bremerhaven.....	12
5.4.2	Heiße Tage in Bremerhaven	12
5.4.3	Tropennächte in Bremerhaven	13
6	Zukünftige Entwicklung der klimatologischen Kenntage bis 2100	14
7	Die Ergebnisse der Messkampagne in Bremerhaven	15
7.1	Die Witterung während der Messkampagne.....	16
7.2	Die Messungen an den drei Stationen im Vergleich	16
7.3	Die Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Windrichtung.....	18
7.4	Windrichtungsabhängigkeit bei Schwachwind.....	18
7.5	Die Wassertemperaturen der Weser im Zeitraum Juni bis September 2015	20
8	Anwendung der Ergebnisse der Messkampagne	20
9	Fazit	21
10	Literatur	23
11	Tabellenverzeichnis	24
12	Abbildungsverzeichnis	25

1 Einleitung

Mittlerweile leben in Deutschland über 75 % der Bevölkerung in Städten, weltweit ist es jeder zweite Mensch. Dieser Trend wird zunehmen und die Urbanisierung weiter voranschreiten. Die damit einhergehenden Umgestaltungen der natürlichen Oberflächen und ihrer Eigenschaften verändern lokal das Klima. Die Modifikation des regionalen Klimas des freien ländlichen Umfeldes hängt entscheidend ab von der Stadtstruktur und den damit verbundenen Besonderheiten (Landsberg, 1981; Kuttler, 2009; Schlünzen et al., 2010). Ein besonderes Merkmal des Stadtklimas ist die Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel, welche die Temperaturdifferenz zwischen städtischen und ländlichen Gebieten beschreibt (Oke, 1982; Stewart et al., 2012). Die Unterschiede zwischen Stadt und Land prägen sich insbesondere an wolkenlosen, sonnenreichen und windschwachen Tagen sowie in klaren, windschwachen Nächten aus. Im Jahresmittel ergeben sich für deutsche Städte mit etwa 0,5 K bis 2,0 K deutlich höhere Temperaturwerte im Vergleich zur ländlichen Region, in Einzelfällen sind Temperaturunterschiede von mehr als 8 K möglich. Auch innerhalb einer Stadt ergeben sich abhängig von den Bau- und Nutzungsstrukturen unterschiedliche Ausprägungen der Wärmeinsel. Zudem weist die städtische Wärmeinsel einen Tages- und Jahreszyklus auf, wobei die Überwärmung vor allem abends und in der Nacht vorhanden ist (Schlünzen et al., 2016).

Die Stadtklimatologie hat erheblich an Bedeutung gewonnen, da die klimatischen und lufthygienischen Änderungen in urbaner Umgebung Anpassungsmaßnahmen durch die städtischen Verantwortlichen erfordern. Durch umwelt- und klimagerechte Stadtplanung muß dieser Wärmeinseleffekt vermindert werden, um für die Bewohner ein lebenswertes, wenig belastendes Umfeld zu schaffen. Mit der zusätzlichen Erwärmung auf Grund des bestehenden Klimawandels wird das allgemeine Temperaturniveau einer Region nochmals angehoben, wobei der relative Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland allerdings keine Änderung erfährt (Schlünzen, 2012; Früh et al., 2011). Insgesamt werden sich also Wärme belastende Wettersituationen in Andauer und Ausmaß verstärken und dabei die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel weiter verschärfen.

Mit Schreiben vom 15.06.2015 bittet die Freie Hansestadt Bremen, Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr, den Deutschen Wetterdienst (DWD) im Rahmen des vorbeugenden Katastrophenschutz um Mitarbeit bei der Beurteilung von Wärme belastenden Wetterlagen bzw. deren zukünftige Entwicklung, um in Bezug auf besonders gefährdete Bevölkerungsgruppen gegebenenfalls geeignete Anpassungsstrategien zu entwickeln. Die nachfolgende Bearbeitung erfolgt auf der Grundlage der am 18.12.2011 zwischen dem Bundesland Bremen und dem Deutschen Wetterdienst abgeschlossenen Verwaltungsvereinbarung.

Wenn in den nachfolgenden Ausführungen von Wärmebelastung die Rede ist, bezieht sich die Angabe stets auf die Überschreitung bestimmter Schwellenwerte der Lufttemperatur (im vorliegenden Fall werden die klimatologischen Kenntage Sommertag, Heißer Tag und Tropennacht untersucht). Diese ist nicht zu verwechseln mit der Wärmebelastung im human-biome-

teorologischen Verständnis, die auf der Grundlage von Wärmehaushaltsmodellen des Menschen (VDI, 2008) berechnet werden kann. Mit diesen Modellen wird der Zusammenhang zwischen Mensch und Atmosphäre objektiv, qualitativ und quantitativ erfasst. Neben der Lufttemperatur sind die Windgeschwindigkeit, die Luftfeuchte und die Strahlungsgegebenheiten sowie die Aktivität und Bekleidung des Menschen zu berücksichtigen.

Von der in unmittelbarer Wesernähe gelegenen Wetterstation Bremerhaven stehen vieljährige Klimadaten zur Beschreibung der historischen Zustandsentwicklung zur Verfügung. Um einen städtischen Wärmeineffekt herauszuarbeiten, wurden im Sommer 2015 zwei temporäre Stationen im Stadtbereich von Bremerhaven eingerichtet, die von Mitte Juni bis Ende September 2015 in Betrieb waren. Zur Auflösung feinerer Stadtstrukturen werden voraussichtlich im Sommer 2016 Profilmessfahrten durch verschiedene Bremerhavener Stadtteile durchgeführt werden. Diese Fahrten konnten im Sommer 2015 auf Grund zu wenig geeigneter Wetterlagen (windschwaches Strahlungswetter) nicht erfolgen.

2 Lage der Stadt Bremerhaven

Die Stadt Bremerhaven befindet sich in der norddeutschen Tiefebene am Mündungsbereich der Weser in die Nordsee (Abb. 1). Die Stadt liegt am Ostufer der Weser und erstreckt sich in Süd-Nord-Richtung über 15 km und in West-Ost-Richtung über 11 km. Die Geeste mäandert von Osten her durch das Stadtgebiet und mündet etwa in der Mitte von Bremerhaven in die Weser. Die Weser ist hier sowohl ein fließendes, als auch ein Tidegewässer und somit auch durch die physikalischen Eigenschaften des Nordseewassers beeinflusst.

Naturräumlich gliedert sich das Stadtgebiet Bremerhavens in zwei Anteile. Der überwiegende Teil, der von der südwestlichen Stadtgrenze her über die Geestemündung hinaus und weiter nordostwärts reicht, ist der Wesermünder Geest zuzuordnen. Aus den ehemals auf zwei Geestinseln gegründeten Dörfern Lehe und Geestendorf ist der Übersee- und Fischereihafen Bremerhavens entstanden. Von Nordwesten her reicht das Moränengebiet des Hohen Lieths bis in das nordwestliche Stadtgebiet herein. Von Norden her erstreckt sich das Marschengebiet des Landes Wursten am Ostrand der Außenweser bis in das Bremerhavener Hafengebiet. Diese Marschenbereiche weisen Höhen zwischen 1 m und 3 m über NN auf, der Geestrücken sowie der Hohe Lieth erreichen örtlich 7 m bis etwas über 10 m über NN.

Die am dichtesten besiedelten Bereiche Bremerhavens erstrecken sich von der Innenstadt, die von Geeste und Weser eingerahmt wird, nordwärts über Lehe bis Leherheide sowie südwärts über Geestemünde bis nach Wulsdorf.

3 Verwendete Unterlagen

Meteorologische Messungen werden in Bremerhaven seit Anfang 1881 vorgenommen. Die Wetterstation hatte wechselnde Standorte. Von Juni 1949 an befand sie sich im Signalturmgebäude an der Nordschleuse ($53^{\circ} 34' 06''$ N / $008^{\circ} 32' 51''$ E), etwa 4 km nördlich des heutigen Standortes. Im April 1962 wurde die Wetterstation zur Doppelschleuse an der Geestemündung verlegt ($53^{\circ} 31' 59''$ N / $008^{\circ} 34' 33''$ E); im Juni 1998 erfolgte die Verlagerung des Messfeldes, auf dem u. a. die Temperatur- und Niederschlagsmessungen gemacht werden, um etwa 200 m nach Norden. Sowohl die ersten, als auch der letzte und weiterhin aktuelle Standort der Wetterstation Bremerhaven zeichnen sich durch eine unmittelbare Wassernähe aus.

Für die vorliegende Untersuchung werden die täglich kontinuierlich in der Standardmesshöhe von 2 m über Grund (entsprechend WMO-Richtlinien) gemessenen Höchst- und Tiefsttemperaturen in Bezug auf das Erreichen eines Wertes von mindestens 25°C (Sommertag) bzw. 30°C (Heißer Tag) sowie des Nicht-Unterschreitens einer nächtlichen Temperatur von 20°C (Tropennacht) ausgewertet. Betrachtet werden Daten aus dem Zeitraum 1949 bzw. 1961 bis 2015. Die aktuellen Standorte der Wetterstation Bremerhaven sowie der zum Vergleich herangezogenen umliegenden DWD-Stationen Steinau, Bremervörde, Bremen und Worswede sind in Abbildung 1 wiedergegeben.

In Kapitel 5 werden die Klimadaten für unterschiedlich lange Bezugsperioden dargestellt. Die meteorologischen Daten von Bremerhaven werden für den Zeitraum 1949 bis 2015 (67 Jahre), für Bremen die Klimadaten ab 1961 verwendet. Die Klimadaten der anderen drei Vergleichsstationen stehen teilweise lediglich für kürzere Zeiträume zur Verfügung: Worswede seit dem 01.09.1963 (Höchsttemperatur, Tagesmitteltemperatur) bzw. 01.07.2004 (Minimumtemperatur), Bremervörde seit dem 01.01.1998 (Höchsttemperatur, Tagesmitteltemperatur) bzw. 05.04.1990 (Minimumtemperatur) und Steinau seit dem 01.10.1998 (Höchsttemperatur, Tagesmitteltemperatur) bzw. 01.07.2004 (Minimumtemperatur). Die lange Reihe Bremerhavener Klimadaten ist darüber hinaus für verschiedene 30jährige Perioden ausgewertet worden. Zum einen für den Zeitraum 1961 – 1990, welches die von der WMO festgelegte, im Zusammenhang mit Fragen zum Klimawandel, aktuelle Klimanormalperiode ist. Weiterhin wurde die angrenzende Periode 1971 – 2000 verwendet, auf die sich bereits einige Klimaprojektionsrechnungen beziehen. Zusätzlich wurden noch die jüngsten 30jährigen Perioden 1981 – 2010 sowie 1986 – 2015 betrachtet.

Im vergangenen Sommer sind von der Mobilen Messeinheit des Deutschen Wetterdienstes für dreieinhalb Monate, und zwar vom 17. Juni bis 30. September 2015, im Bremerhavener Stadtgebiet zusätzlich zwei temporäre Klimastationen errichtet worden (Abb. 2), die zum einen den Effekt einer städtische Wärmeinsel zeigen sollten und zum anderen ländliche Umlandgegebenheiten am östlichen Stadtrand. Die „Stadtstation“ wurde im Stadtteil Lehe auf dem Park-

platz des „Theo“, in der Lutherstrasse 11, installiert (Abb. 3), die „Umlandstation“ in den Schiffdorfer Wiesen, wenige hundert Meter östlich der Autobahn A 27 (Abb. 4). Die Stationen zeichneten die Lufttemperatur und –feuchte und die Globalstrahlung in 2 m über Grund sowie den Wind in 2 m (Theo) bzw. 10 m (Wiese) Höhe über Grund als 10-Minuten-Mittelwerte auf.

Zudem sollten ursprünglich während der temporären Messkampagne Profilmessfahrten durch das Stadtgebiet von Bremerhaven durchgeführt werden. Dieses war im Sommer 2015 nicht möglich, u. a. auch, weil es keine geeignete mehrtägige schwachwindige sommerliche Hochdrucklage gab, an der das Profilmessfahrzeug verfügbar war. Diese Messfahrten sind nun für den Sommer 2016 geplant.

An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass in der vorliegenden Untersuchung meteorologische Daten verwendet werden, die sich auf unterschiedliche Messintervalle beziehen. So sind z. B. die klimatologischen Zeitreihen (Kapitel 4) auf der Basis von Jahresmittelwerten erstellt. Die Darstellung der klimatologischen Kenntage (Kapitel 5) hat Tages- bzw. Nachtwerte zur Grundlage. Lediglich für eine ergänzende Analyse der Wärmebelastung an Sommertagen und Heißen Tagen (Kapitel 5) wurden die Stundenmittelwerte der Lufttemperatur der Wetterstation Bremerhaven verwendet.

Die Messwerte der temporären Messkampagne im Sommer 2015 standen als 10-Minuten-Mittelwerte zur Verfügung und wurden auch in dieser Form statistisch aufbereitet (Kapitel 7). Von einer Verdichtung der 10-Minuten-Mittelwerte zu Stundenmittelwerten wurde abgesehen. Zum einen würde dadurch die Datenbasis deutlich geringer und zum anderen führt diese Mittelung insbesondere bei den Messwerten von Windrichtung und Windgeschwindigkeit zur Maskierung oder gar Auslöschung markanter Effekte.

4 Klimatologische Zeitreihen der Lufttemperatur an der Wetterstation Bremerhaven

Die Region Bremerhaven gehört zum Klimabezirk „Niedersächsisches Flachland“. Damit ist das Klima überwiegend von atlantischen Luftmassen beeinflusst, die für einen wechselhaften Witterungsverlauf sorgen. Dabei äußert sich die im Raum Bremerhaven vorherrschende maritime Klimakomponente z. B. in der Dämpfung der jahreszeitlichen Temperaturamplitude. Die Sommer sind kühler und reicher an Niederschlagstagen und die Winter milder im Vergleich zur Mitte und zum Süden Deutschlands. Es können sich aber auch kontinentale Klimaausprägungen bei anhaltend antizyklonal geprägter Luftzufuhr aus östlichen Richtungen und bei mitteleuropäischen Hochdruckwetterlagen durchsetzen. Dann kommt es im Sommer zu sonnenscheinreichem und warmem Wetter, im Winter vielfach zu Dauerfrost, der je nach Wetterlage mit geringer Bewölkung oder anhaltendem Nebel oder Hochnebel verbunden ist. Der in der norddeutschen Tiefebene häufig lebhaft Wind führt darüber hinaus zu einer guten Durchlüftung der bodennahen Luftschicht, was sich in einer Verminderung von Wärme belastenden Wettersituationen niederschlägt.

Die Lage der Wetterstation Bremerhaven auf einer Landzunge an der Geestemündung repräsentiert ein maritim geprägtes Umfeld, siehe Abbildung 5. Das Messfeld ist auf zwei Seiten von Wasserflächen umgeben, die Entfernung zum Wasser beträgt ostwärts etwa 20 m, westwärts etwa 50 m. Der Windmast befindet sich an der Spitze der Landzunge. Die unmittelbare Stationsumgebung ist teils versiegelt, teils unversiegelt und kaum bebaut. Die Wetterstation Bremerhaven ist zwar, wie erwähnt, im April 1962 verlegt worden, aber auch der ehemalige Standort war durch unmittelbare Wassernähe gekennzeichnet. Die Verlegung hatte keine Inhomogenitäten in den meteorologischen Zeitreihen der Lufttemperatur hervorgerufen (Rixecker, 1974).

Der Verlauf der Jahresmitteltemperaturen an den Wetterstationen Bremerhaven und Bremen im Zeitraum von 1961 bis 2015 zeigt Abbildung 6. Wie zu erwarten, ist der Verlauf der Jahresgänge an beiden Orten ähnlich. Die Jahresmitteltemperaturen in Bremerhaven waren vor 1978 meist etwas niedriger als im Bremen, nach 1978 allerdings immer mindestens leicht, in einigen Jahren sogar deutlich höher als in Bremen (z. B. 2001 – 2007). Hier spiegelt sich die Verlegung der Wetterstation Bremen auf dem Gelände des Flughafens wider. Bis Mitte 1978 befand sich die Wetterstation Bremen in bebauter Umgebung, danach auf dem ‚freien Feld‘ nahe der Landebahn und damit in mehr ländlicher Umgebung.

Werden die Jahresmittel der täglichen Minimumtemperatur betrachtet, siehe Abb. 7, so fällt der Unterschied zwischen den beiden Stationen weitaus markanter aus. Bremerhaven wies im Zeitraum 1961 – 2015 immer höhere Jahresmittel der Tagestiefsttemperaturen als Bremen auf. Vor 1978 lag die Differenz unter 1 K, danach deutlich darüber. In einigen Jahren differierten die Jahresmittelwerte der Tiefsttemperaturen um 2 K oder mehr (1981, 2003 – 2007).

Auch beim Vergleich der Jahresmittelwerte der Tageshöchsttemperaturen (Abb. 8) zeigt sich im Jahr 1978 eine Änderung. Die Jahresmittel der Maximumtemperaturen waren im betrachteten Zeitraum in Bremen immer höher als in Bremerhaven: vor 1978 lagen die Differenzen meist bei mindestens 1 K, in einzelnen Jahren sogar noch darüber. Nach der Verlagerung der Bremer Station betragen die Differenzen nur noch 0,5 – 1 K.

Die Maximumtemperaturen treten meist am Nachmittag auf und sind zwischen Stadt und Umland aufgrund der am Tage vorherrschenden besseren Durchmischung der Atmosphäre nur geringfügig unterschiedlich. Nachts gibt die städtische Bebauung die von ihr tagsüber gespeicherte Wärme durch langwellige Wärmestrahlung langsam nach außen hin ab. Zudem „schlafen“ die Winde in den Nachtstunden häufig ein und die Stabilität der unteren Atmosphäre nimmt zu, so dass in den frühen Morgenstunden, in denen in der Regel die Tagestiefsttemperatur auftritt, die größten Temperaturdifferenzen zwischen Stadt und Umland erreicht werden. Die Wetterstation Bremerhaven ist allerdings keiner der beiden Kategorien zuzuordnen, sondern ist durch die Wesernähe maritim geprägt. Der – besonders im Spätfrühling, Sommer und Frühherbst – tagsüber kühlende, nachts wärmende Einfluss des Wassers führt im Mittel zu niedrigeren Höchsttemperaturen und höheren Tiefsttemperaturen als in der Stadt oder im Um-

land. Dabei sind auch hier wegen der turbulenten Durchmischung der Atmosphäre die Differenzen tagsüber geringer als nachts.

Abbildung 9 zeigt die Jahresmittelwerte der täglichen Maximumtemperatur an der Wetterstation Bremerhaven sowohl für das Gesamtjahr als auch für die Monate des meteorologischen Sommers (Juni – August). Zusätzlich ist für beide Zeitreihen jeweils der lineare Trend eingezeichnet. Neben einer ausgeprägten jährlichen Variabilität und den mehrere Jahre überspannenden Schwingungen zeigen über den Betrachtungszeitraum 1961 bis 2015 beide Kurven einen deutlichen Anstieg der jährlich gemittelten täglichen Höchsttemperaturen. Die gestrichelten Trendlinien deuten sowohl für das Gesamtjahresmittel als auch für das Sommermittel einen Anstieg um knapp 2 K (Kelvin) an.

Die Kurven der Tagesmitteltemperaturen für das Jahr bzw. den Sommer gibt Abbildung 10 wieder. Die linearen Trends beider Datensätze lassen sowohl für das Gesamtjahr als auch für die Sommermonate eine Zunahme um 1,5 bis 2,0 K erkennen. Der Mittelwert der Lufttemperatur an der Wetterstation Bremerhaven betrug 9,5 °C (Zeitraum 1961 – 2015). Auch aus den Verläufen der jährlichen bzw. sommerlichen Tagestiefsttemperaturen (siehe Abb. 11) zeigt sich eine Zunahme von 1,5 bis 2,0 K in den vergangenen 55 Jahren.

Damit ergibt sich für die Region Bremerhaven eine Zunahme der jährlichen Mitteltemperaturen im Zeitraum 1961 - 2015, die in ihrem Verlauf gut in das Muster der deutschlandweit gemittelten Jahresmitteltemperaturen passt, siehe Abbildung 12. Im Zeitraum 1961 - 2015 waren die deutschlandweiten Jahresmitteltemperaturen um etwa 1,5 K angestiegen, der Mittelwert für Deutschland lag bei 8,6 °C.

Anmerkung zum Einfluss der Weser auf die Lufttemperatur an der Wetterstation

Die Wetterstation Bremerhaven liegt, wie bereits ausgeführt, auf einer Landzunge nahe der Doppelschleuse, an der Mündung der Geeste in die Weser. Die Wetterstation ist in unmittelbarer Nähe von größeren Wasserflächen umgeben. Wasserflächen sind sowohl Feuchte- als auch Wärmequellen und dämpfen den Tagesgang der Lufttemperaturen. In der Nähe von Gewässern ist im Sommer tagsüber eine Kühlung, nachts eine verminderte Abkühlung wirksam. Allerdings ist eine Kühlung nur gegeben, wenn die Wassertemperaturen geringer sind, als die Lufttemperaturen. Bei industrieller Nutzung von Flusswasser können die Wassertemperaturen durch die Einleitung warmer Abwässer ganzjährig erhöht werden, insbesondere in einem Tidebereich, in dem das Wasser mehrfach genutzt werden könnte. Ein Fluss wirkt quasi als Heizungssystem in der Stadt, vor allem in der Nacht. Im Winter kann das vorteilhaft sein, im Sommer kann es aber die gewünschte Abkühlung tagsüber und nachts vermindern. Der Einfluss der Wassertemperaturen größerer Wasserflächen auf das Klima in der Stadt ist zusätzlich auch von der Windgeschwindigkeit abhängig. Die Erwärmung und Befeuchtung der Luft wird also durch die Wassertemperatur, die Lufttemperatur und die Windgeschwindigkeit gesteuert. Sobald die Luft bewegt ist, verdriftet die vom Wasser angewärmte und befeuchtete Luftmasse mit dem Wind in die Umgebung. Daher ist auch im Luv von Wasserflächen noch die wärmende Wirkung zu spüren. Bei hohen Windgeschwindigkeiten kann die Luftmasse

kaum, bei niedrigen Windgeschwindigkeiten aufgrund der längeren Verweildauer über der Wasseroberfläche optimal erwärmt und befeuchtet werden.

Am deutlichsten bilden sich Unterschiede zwischen Stadt und Umland bei schwachwindigen Wetterlagen heraus. Dabei werden Windgeschwindigkeiten bis zu 3 m/s als schwachwindig angesehen. Bezogen auf Bremerhaven bedeutet das, dass bei westlichen Windrichtungen die bodennahen Luftmassen über der Wasserfläche der Weser einige Minuten erwärmt und befeuchtet und anschließend in Richtung Innenstadtbereiche verdriftet werden. Dabei wird die Luftmasse durch die neue Unterlage modifiziert und verliert so langsam ihren „Wasserflächencharakter“. Bei Windgeschwindigkeiten von 2 bis 3 m/s kann eine Luftmasse in 10 min 1,2 bis 1,8 km zurücklegen. Zumindest die westlichen Bereiche der Stadt Bremerhaven werden also bei Windrichtungen aus SSW bis NNW von den physikalischen Eigenschaften der Weser beeinflusst.

Bei Rixecker (1974) findet sich der Vergleich einer 10-jährigen Reihe der Wassertemperatur der Weser mit den Lufttemperaturen des gleichen Zeitraums (1959 – 1968). Die Wassertemperaturen wurden täglich mittags vom Personal der Wetterwarte gemessen. Der Zehnjahresmittelwert der Wassertemperatur betrug 10,2 °C, der der Lufttemperatur 8,8 °C. Die höchsten Monatsmittelwerte gab es im Juli und August: die der Wassertemperaturen lagen bei 18 °C, die der Luft bei 16,3 °C. Die tiefsten Mittelwerte lieferte der Januar: Wassertemperatur 2 °C und Lufttemperatur 0,5 °C. Im Mittel über alle Monate betrug die Temperaturdifferenz 1,4 K. Von Mai bis Dezember waren die gemittelten Temperaturdifferenzen etwas höher, von Februar bis April deutlich niedriger. Die im Zeitraum 1990 bis 2009 an der Wetterstation Bremerhaven täglich erhobenen Wassertemperaturen der Weser weisen einen leichten Trend nach unten auf, der Mittelwert betrug nun 11,9 °C (Mittelwert der Lufttemperatur: 10,1 °C).

5 Die klimatologischen Kenntage in Bremerhaven und Umgebung

Für die Beschreibung der Wärmebelastung in Bremerhaven werden als Indikatoren die Klimakenngrößen „Sommertag“ (Tageshöchsttemperaturen ≥ 25 °C) und „Heißer Tag“ (Tageshöchsttemperaturen ≥ 30 °C) sowie die „Tropennacht“ (Nächtliches Temperaturminimum ≥ 20 °C) herangezogen. Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, ist der Begriff „Wärmebelastung“ dabei nicht im human-biometeorologischen Sinne zu verstehen. Dennoch geben diese Kenntage Hinweise auf sommerlich belastende Wärmeereignisse und ihre zeitliche Entwicklung in der Stadt Bremerhaven.

Die beiden Kenntage Sommertag und Heißer Tag beziehen sich auf den Kalendertag, also die Zeit zwischen 0 und 24 Uhr. Dagegen hat die Tropennacht das 12-stündige Zeitintervall 18 Uhr des Vortages bis 6 Uhr des Tages als Bezugszeitraum.

5.1 Anzahl der Kenntage

Die Tabelle 1 gibt die Anzahl der klimatologischen Kenntage sowie die mittlere jährliche Häufigkeit des Auftretens an den Wetterstationen Bremerhaven und Bremen sowie den drei weiteren Vergleichsstationen an. Ebenfalls angegeben sind die jeweiligen höchsten Jahressummen mit den zugehörigen Jahren des Auftretens. Leider stehen lediglich für den Vergleichszeitraum 1999 – 2015 die Kenntage aller fünf Stationen zur Verfügung, ein aus klimatologischer Sicht relativ kurzer Zeitraum von 17 Jahren. Für Bremerhaven und Bremen sowie Worpsswede gibt es, wie bereits erwähnt, längere Messreihen. Für diese Stationen sind daher zusätzlich die Daten der längeren Zeiträume 1961 (bzw. 1964) bis 2015 in Tab. 1 angegeben (Ausnahme: TN in Worpsswede nur für 2004 – 2015). Die meisten Sommertage und Heißen Tage im Vergleichszeitraum 1999 – 2015, im Folgenden auch mit ST und HT abgekürzt, wiesen die Stationen Bremen, Bremervörde und Worpsswede auf mit im Durchschnitt 27,6 – 30,9 ST und 4,5 – 5,5 HT pro Jahr. Bremerhaven erreichte mit jährlich durchschnittlich 21 ST und 3,5 HT deutlich geringere Anzahlen.

Die Abbildungen 13 und 14 geben einen Überblick über die zeitliche Entwicklung der Anzahl der Sommertage bzw. der Heißen Tage an den Wetterstationen Bremerhaven und Bremen im Zeitraum 1961 – 2015. An beiden Stationen weisen die beiden Kenntage große jährliche Schwankungen auf. Die Trendlinien zeigen sowohl bei den Sommertagen als auch bei den Heißen Tagen ganz deutlich eine Zunahmen der Anzahlen seit 1961.

Bei der absoluten und durchschnittlichen Anzahl der Tropennächte (abgekürzt mit TN) ergibt sich ein anderes Bild: Bremerhaven wies im Zeitraum 1999 - 2015 die höchste Anzahl auf mit 20 TN, die anderen Stationen nur zwischen 2 und 6 TN (wobei sich die 4 TN in Worpsswede allerdings nur auf den Zeitraum 2004 –2015 beziehen). In Bremerhaven gab es im Zeitraum 1961 - 2015 im Durchschnitt jährlich 1,02 Tropennächte. Die meisten Tropennächte wurden in den Jahren 1994 (10 TN), 2006 (5 TN) und 2010 (4 TN) beobachtet. An den vier Vergleichsstationen gab es jeweils nur einzelne Tropennächte. In Bremen wurden im Mittel 0,3 TN pro Jahr beobachtet, an den anderen Stationen unter 0,1 TN pro Jahr.

5.2 Andauer der Kenntage

Nicht nur die absolute bzw. mittlere Anzahl an wärmebelastenden Tagen ist von besonderer Bedeutung, sondern auch die Andauer dieser Perioden und die Kombinationen der Kenntage. So traten Sommertage häufig in Folgen mehrerer Tage auf. Auch Heiße Tage waren häufig keine solitären Ereignisse, sondern sie sind fast immer umrahmt von Sommertagen, in manchen Jahren gab es sogar mehrere Heiße Tage in Folge. Besondere Beachtung verdienen auch die Tropennächte: sie waren fast immer flankiert von Sommertagen, häufig auch von Heißen Tagen, siehe Kap. 5.3. Die Tabelle 2 gibt die Werte von Bremerhaven, Bremen und Worpsswede im Überblick. Da für Steinau und Bremervörde die Klimadaten nur für den kürzeren Zeitraum 1999 – 2015 vorlagen, werden diese beiden Stationen hier nicht betrachtet.

In Bremerhaven betrug während der vergangenen 55 Jahre die maximale Andauer von Sommertagen 12 Tage. Am häufigsten wurden allerdings kurze Andauern bis zu 3 Tagen beobachtet.

tet (87 %). Die mittlere Andauer lag bei 2,1 Tagen. In Worpsswede und Bremen wurden mit bis zu 18 bzw. 21 Tagen deutlich längere maximale Andauern beobachtet, ebenso war die durchschnittliche Andauer mit rund 2,5 Sommertagen etwas länger als in Bremerhaven.

Die Auswertung der Andauer der Heißen Tage zeigt nur geringe Unterschiede zwischen den drei Orten auf. Die maximale Andauer von Heißen Tagen in Bremerhaven betrug 6 Tage, in Bremen und Worpsswede 9 Tage. Die durchschnittliche Andauer betrug an allen drei Stationen 1,5 bis 1,7 Tage.

Tropennächte kamen im Zeitraum 1961 – 2015, wie bereits erwähnt, nur in Bremerhaven in nennenswerter Anzahl vor. Sie dauerten in den vergangenen 55 Jahren meist nur 1, selten bis zu 3 Nächte, die durchschnittliche Ereignisandauer war 1,3 Nächte. In Bremen gab es bislang maximal 2 Tropennächte pro Jahr; die durchschnittliche Andauer betrug hier 1,1 Nacht.

5.3 Tropennächte sind flankiert von Sommertagen

Tropennächte in Bremerhaven wurden in den vergangenen 55 Jahren häufig während kürzerer (z. B. 2006 und 2010) oder längerer (1994) Hitzeperioden beobachtet. Dabei gab es in den Jahren 1994 und 2006 auch mal 2 – 3 Tropennächte in Folge. Die Tabelle 3 gibt für die o. g. drei Jahre mit den meisten Tropennächten die Häufigkeit an, mit der ein Sommertag (ST) bzw. ein Heißer Tag (HT) jeweils direkt einer Tropennacht (TN) vorausgeht oder ihr folgt.

Tropennächte in Bremerhaven wurden in der Regel begleitet von Sommertagen oder Heißen Tagen, die ‚tropischen Nächte‘ waren also keine Einzelereignisse. Auch in Norddeutschland dauern sommerliche Hitzeperioden häufig mehrere Tage, manchmal sogar über Wochen an. In diesen Zeiten ergibt sich eine besonders große Wärmebelastung, wenn es nachts nicht abkühlt. Für die Regeneration der Menschen ist die nächtliche Erholungsphase mit absinkenden Temperaturen von besonderer Bedeutung.

5.4 Kenntage in Bremerhaven bezogen auf unterschiedliche klimatische Zeiträume

Die Tabellen 4 - 9 geben eine Übersicht über die monatliche Verteilung der Kenntage Sommertage, Heiße Tage und Tropennächte bezogen auf unterschiedliche Zeiträume. Bei der Untersuchung der klimatologischen Kenntage ist es erforderlich, möglichst lange Zeitreihen zu betrachten, da insbesondere HT und TN in Norddeutschland seltene Ereignisse sind und nicht in jedem Sommer auftreten. Zudem ist es angezeigt, die international festgelegten Klimanormalperioden zu verwenden, um Vergleiche mit Daten anderer Orte durchführen zu können. In dieser Untersuchung werden die Bremerhavener Daten sowohl für die längst mögliche Zeitreihe 1949 - 2015 (67 Jahre) als auch für den Zeitraum 1961 - 2015 dargestellt, sowie für vier 30jährige Zeiträume. Die derzeit gültige Klimanormalperiode im Zusammenhang mit Klimamodellfragen ist der Zeitraum 1961 - 1990, die daran anschließenden Zeiträume 1971 - 2000 und 1981 - 2010 sind die weiteren Bezugszeiträume. Zum Vergleich finden sich in den Tabellen noch die Auswertungen für die jüngste 30jährige Zeitreihe von 1986 - 2015.

5.4.1 Sommertage in Bremerhaven

Die Häufigkeit von Sommertagen hat in den vergangenen 55 Jahren in Bremerhaven kontinuierlich zugenommen, wie der Vergleich aller Perioden zeigt. Tabelle 4 gibt die Jahres- bzw. Monatssummen der Sommertage, bezogen auf die ausgewiesenen Zeiträume, an. Während der Klimanormalperiode 1961 – 1990 gab es insgesamt 402 ST in Bremerhaven, während der letzten 30 Jahre (1986 – 2015) waren es schon 580 ST.

Tabelle 5 zeigt die durchschnittliche Anzahl an Sommertagen pro Jahr bzw. Monat für die unterschiedlichen Perioden. Der Zeitraum 1961 - 1990 wies 13,4 ST pro Jahr auf, die anschließenden Perioden bereits 16,5 bzw. 18,9 ST pro Jahr. Ein ebenso deutlicher Anstieg zeigt sich bei den drei Zeitreihen, die bis 2015 reichen: von 16,0 Sommertagen pro Jahr (1949 - 2015) über 16,9 (1961 - 2015) bis 19,3 ST pro Jahr (1986 - 2015).

Sommertage gab es in Bremerhaven bisher ausschließlich von April bis Oktober, am häufigsten sind sie im Juli, am zweithäufigsten im August. Mit etwa 83 % entfällt der weitaus überwiegende Anteil der Tage mit einer Tageshöchsttemperatur von $\geq 25^{\circ}\text{C}$ auf den meteorologischen Sommer (Juni, Juli, August). Im Frühjahr (April und Mai) kommen Sommertage etwas häufiger vor (knapp 10 %) als im Herbst (September und Oktober, ca. 7 %). In Bremerhaven ist keine Tendenz zu einer zeitlichen Änderung des ersten Auftretens eines Sommertages zu erkennen, siehe Abbildung 15. Allerdings zeigt sich eine leichte Tendenz zu einer Verlängerung des Sommers in den Herbst hinein.

An der Wetterstation Bremerhaven wurden in jedem Jahr Sommertage beobachtet, die Jahressummen lagen im Zeitraum 1949 – 2015 zwischen 3 und 36 Tagen. Werden die 67 Jahressummen in eine Rangfolge gestellt, sind unter den ersten 10 Plätzen (welche jährlich 36 bis 25 ST entsprechen), alleine acht Jahre seit 1992 vertreten und nur zwei Jahre vor 1986.

In dieser Untersuchung wurden bislang ausschließlich Kenntage auf der Basis von Tagesmaxima bzw. -minima betrachtet. Weitergehende Information können aus stündlich erhobenen Daten gezogen werden. Für den Zeitraum 1986 – 2015 wurden daher die stündlichen Temperatur- und Windmessungen der Wetterstation Bremerhaven zusätzlich ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass es sommerliche Temperaturen von mindestens 25°C in den vergangenen 30 Jahren an insgesamt 1,3 % der Jahresstunden gab. Das bedeutet: im Mittel erreichten oder überschritten die Lufttemperaturen an etwa 114 Std pro Jahr die Marke von 25°C . Diese hohen Temperaturen waren zu 2/3 mit Windrichtungen aus 60° bis 150° (Ostnordost bis Südsüdost) gekoppelt.

5.4.2 Heiße Tage in Bremerhaven

Heiße Tage traten bislang fast ausschließlich im meteorologischen Sommer auf, am häufigsten waren sie im Juli, am zweithäufigsten im August, siehe Tabelle 6. In den vergangenen 67 Jahren gab es lediglich zwei Ausnahmen davon: die jeweils einzigen Heißen Tage des Jahres gab es 1949 im September und 2005 im Mai. Tabelle 7 gibt die durchschnittlichen Werte als

Tage pro Jahr bzw. Monat an. Die Klimanormalperiode zeigte im Mittel 1,6 HT pro Jahr, die nachfolgenden Perioden 2,4 bzw. 3,4 HT pro Jahr. Die drei bis ins Jahr 2015 reichenden langjährigen Reihen wiesen 2,2 (67 Jahre), 2,5 (55 Jahre) bzw. 3,2 (1986 -2015) Heiße Tage pro Jahr auf.

Auch bei diesem Kenntag zeigt sich eine Zunahme in Bremerhaven seit 1949. Werden die Jahressummen der Heißen Tage in eine Rangfolge gebracht, ergibt sich Folgendes: unter den ersten 9 Plätzen (11 bis 5 HT pro Jahr) sind nur 2 Jahre vor 1986. Allerdings wurden Heiße Tage in Bremerhaven nur in 48 der 67 Jahre beobachtet.

Wie bereits für die Sommertage wurden auch für diesen Parameter die stündlichen Temperatur- und Windmessungen der Wetterstation Bremerhaven für den Zeitraum 1986 – 2015 zusätzlich ausgewertet. Hohe Temperaturen von mindestens 30 °C gab es in den vergangenen 30 Jahren an 0,13 % der Jahresstunden. Im Mittel erreichten oder überschritten die Lufttemperaturen an insgesamt 11,4 Std pro Jahr die Marke von 30 °C. Diese hohen Temperaturen waren zu 2/3 mit Windrichtungen aus 120° bis 180° (Ostsüdost bis Süd) gekoppelt.

5.4.3 Tropennächte in Bremerhaven

Tropennächte gab es seit 1949 in Bremerhaven ausschließlich in den drei Sommermonaten, am häufigsten im Juli, am zweithäufigsten im August, siehe Tabellen 8 und 9. Die Klimanormalperiode 1961 - 1990 wies nur 7 Tropennächte auf. Die beiden anschließenden Perioden zeigten 28 TN, entsprechend 0,9 TN pro Jahr im Durchschnitt sowie 47 TN, entsprechend durchschnittlich 1,6 TN pro Jahr. Die beiden über 50jährigen Zeitreihen wiesen jeweils insgesamt 56 TN auf. Davon stammen alleine 51 aus den vergangenen 30 Jahren! Die Zahl der Tropennächte hat in Bremerhaven also besonders in den vergangenen Jahrzehnten markant zugenommen. Allerdings sind Tropennächte in Bremerhaven seltene Ereignisse und wurden lediglich in 24 der 67 Jahre beobachtet. Meist waren es nur 1 bis 3 TN jährlich; lediglich im Jahr 2006 gab es 4, im Jahr 2010 insgesamt 5, im Jahr 1994 waren es sogar mal 10 Tropennächte.

Ebenfalls für die Tropennächte wurden die stündlichen Temperatur- und Windmessungen der Wetterstation Bremerhaven für den Zeitraum 1986 – 2015 ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass es in den vergangenen 30 Jahren in insgesamt in 1,2 % aller Stunden zwischen 0 und 6 Uhr tropische Nachttemperaturen von mindestens 20 °C gab. Im Durchschnitt sanken die Temperaturen an 30,7 Std pro Jahr zwischen 0 und 6 Uhr nicht unter die Marke von 20 °C. Diese hohen nächtlichen Temperaturen waren zu 2/3 mit Windrichtungen aus 60° (Ostnordost) bis 150° (Südsüdost) gekoppelt. Verglichen mit der durchschnittlichen Anzahl an Tropennächten, die für den Zeitraum 1986 – 2015 bei 1,7 TN pro Jahr lag (siehe Tab. 9), ist die mittlere Anzahl an tropischen Nachtstunden deutlich größer. Es gibt also deutlich mehr warme Nachtstunden, als die geringe Zahl an Tropennächten vorgibt.

6 Zukünftige Entwicklung der klimatologischen Kenntage bis 2100

Die zukünftig zu erwartenden globalen Klimaänderungen werden in regelmäßigen Sachstandsberichten des Weltklimarates (Intergovernmental Panel of Climate Change IPCC) zusammengefasst. Die Klimaänderungssignale für Zeiträume bis Ende dieses Jahrhunderts werden hierbei durch ein großes Ensemble von Projektionsrechnungen mit verschiedenen gekoppelten globalen Klimamodellen und verschiedenen Emissionsszenarien für klimarelevante Spurenstoffe abgeschätzt. Da diese Simulationsrechnungen eine horizontale Auflösung in der Größenordnung von 200 km und mehr aufweisen, müssen für regionale Fragestellungen die Ergebnisse auf eine deutlich höhere Auflösung transformiert werden. Dabei werden die globalen Klimaprojektionsrechnungen mit Hilfe dynamischer und statistischer Methoden auf eine regionale Skala mit einer typischen Auflösung von 10 bis 20 km herunter gerechnet. Die auf diese Weise erhaltenen regionalen Klimaprojektionen für Deutschland stehen allen Interessierten in verschiedenen Datenbanken zur Nutzung bereit. Sie erlauben, die in Deutschland regional unterschiedlich ausfallenden Klimaänderungen abzuschätzen. Grundlage für alle hier aufgeführten Aussagen bilden die Ergebnisse der Modellrechnungen nach dem Emissionsszenarium A1B.

Bei den folgenden Betrachtungen zur zukünftigen Entwicklung der Sommertage, Heißen Tage und der Tropennächte für die Projektionszeiträume 2021 bis 2050 bzw. 2071 bis 2100 bezogen auf den Bezugszeitraum 1971 bis 2000 wurden für den zeitlich nahen Projektionszeitraum die Ergebnisse von 16 regionalen Modelle berücksichtigt, hinsichtlich der späten Zeitspanne 13 Modellergebnisse. In den weiteren Darstellungen werden so genannte Perzentile (15. und 85.) betrachtet. Zunächst werden für jeden Berechnungspunkt die Modellergebnisse aufsteigend sortiert. Das 15. Perzentil ist der obere Grenzwert der untersten 15 % aller betrachteten Modellsimulationen. Das heißt, 15 % aller Modellergebnisse liegen unterhalb dieses Wertes oder erreichen diesen genau. Die übrigen 85 % der Modellsimulationen zeigen dagegen größere Änderungen. Entsprechend umgekehrt verhält es sich mit dem 85. Perzentil. Für diesen Wert zeigen lediglich 15 % eine noch größere Änderung. Dagegen liegen 85 % unterhalb dieses Wertes oder erreichen diesen genau. Somit liegen 70 % der Modellergebnisse zwischen dem 15. und dem 85. Perzentil. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Betrachtung statistisch belegter Änderungsraten, ohne dass mit unwahrscheinlicheren extremen Änderungsspannen umgegangen werden muss.

Tabelle 10 fasst die entsprechenden Änderungsraten zusammen. Hinsichtlich des Projektionszeitraumes 2021 bis 2050 fallen die Änderung sowohl für die Anzahl der Sommertage als auch der Tropennächte vergleichsweise moderat aus. Nach dem 15. Perzentil aller Modellergebnisse ergeben sich keine Veränderungen. Nach dem 85. Perzentil ist bei den Sommertagen mit einer Zunahme von insgesamt 11 Tagen im Jahr zu rechnen, wobei 8 Tage auf die Sommermonate Juni bis August entfallen. Für die Heißen Tage wird eine Erhöhung um 5 Tage berechnet, die ausschließlich im Sommer erwartet werden. Die Anzahl der Tropennächte steigt um 3 Nächte pro Jahr, ausschließlich innerhalb der meteorologischen Sommerzeit.

Anmerkung: die in Tabelle 10 angegebenen Änderungsraten entsprechen den Werten, die Riecke (2013) für Bremen angegeben hat. Das liegt daran, dass sich die Ergebnisse von Klimaprojektionsrechnungen immer auf einen größeren Bereich beziehen. Die damals für Bremen angegebenen Werte beziehen den Raum Bremerhaven mit ein.

Ausgehend von den Auswertungen der Bremerhavener Messreihe 1971 – 2000 (siehe Tab. 5) ergibt sich für den 30jährigen Zeitraum 2021 bis 2050 unter Betrachtung des 85. Perzentils eine mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen von 27,5. Wird auch der städtische Wärmeinseleffekt noch mit einbezogen, führte eine städtische Erwärmung von 1 K zu jährlich 33 Sommertagen, eine innerstädtische Temperaturerhöhung von 2 K sogar zu 39 Sommertagen. Für die Heißen Tage bedeutet eine Temperaturerhöhung von 1 K einen Anstieg auf jährlich 9 HT, bei einer innerstädtischen Erwärmung von 2 K sogar auf jährlich knapp 11 Heiße Tage.

Für den Projektionszeitraum 2071 bis 2100 zeigen sich deutlich ausgeprägtere Änderungsraten für die 85. Perzentilwerte, siehe Tabelle 10. Demnach wird im Sommer ein Anstieg um 23 Sommertage, über das Jahr um 35 Tage ermittelt. Der Anstieg auf jährlich 51 - 52 Sommertage entspricht dem 3fachen des Wertes von 1971 – 2000 (siehe Tab. 5). Bezieht man wieder den Wärmeinseleffekt mit ein, belaufen sich die Sommertage für 1 K (bzw. 2 K) städtische Temperaturerhöhung auf 57 (bzw. 63) Tage im Jahr. Noch markanter sind die Änderungsraten bei den Heißen Tagen: Tab. 10 gibt für den Sommer einen Anstieg um 15 Tage, für das Gesamtjahr um 20 Tage. Das entspricht dann etwa 22 Heißen Tagen pro Jahr und damit einem nahezu 10fachen Anstieg bezogen auf die Vergleichswerte (1971 – 2000). Die Berücksichtigung eines städtischen Wärmeinseleffektes von 1 K (bzw. 2 K) führt zu einer weiteren Erhöhung auf jährlich ca. 24 (bzw. knapp 26) Heiße Tage im Projektionszeitraum 2071 bis 2100. Hinsichtlich der Tropennächte ergeben die Klimaprojektionen 13 zusätzliche Nächte. Im Vergleichszeitraum (1971 – 2000) lag die durchschnittliche jährliche Anzahl der Tropennächte in Bremerhaven bei 0,9 Nächten. Die Berücksichtigung eines städtischen Wärmeinseleffektes von 1 K (bzw. 2 K) ergibt dann eine Erhöhung auf 15 (bzw. knapp 18) Tropennächte im Projektionszeitraum 2071 bis 2100.

7 Die Ergebnisse der Messkampagne in Bremerhaven

Im Zeitraum 17.06. bis 30.09.2015 waren im Stadtgebiet von Bremerhaven zwei temporäre Messstellen eingerichtet, an denen die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und die Globalstrahlung (in 2 m Höhe) sowie Windgeschwindigkeit und Windrichtung (in 2 m bzw. 10 m Höhe) gemessen wurde. Als Referenz wurden die Messungen der Wetterstation Bremerhaven verwendet. Die eine temporäre Station befand sich in städtischer Umgebung im Stadtteil Lehe auf dem Gelände des Kulturzentrums Theo, die zweite in ländlicher Umgebung in den Schiffdorfer Wiesen. Die Wetterstation Bremerhaven liegt direkt an der Geestemündung in die Weser und weist eine maritim geprägte Umgebung auf. Es standen von allen Stationen die 10-Minuten-Mittelwerte der meteorologischen Messwerte zur Verfügung, insgesamt etwa 13.000 Datensätze. Im gesamten Zeitraum hat es lediglich an der Stadtstation einen mehrtägigen Datenausfall im Juni gegeben.

7.1 Die Witterung während der Messkampagne

In Norddeutschland herrschten in der zweiten Junihälfte antizyklonale West- und Nordwestlagen, wobei immer wieder Tiefausläufer den Küstenbereich überquerten. Am 29.06. 2015 konnte sich ein Hoch über Mitteleuropa entwickeln. Subtropische Luftmassen gelangten bis nach Norddeutschland und führten Anfang Juli zu der ersten Hitzeperiode des Jahres. Ab dem 6. Juli stellte sich wieder eine antizyklonale West- bis Nordwestlage ein. Kurzzeitige skandinavische Kaltluftausbrüche führten immer wieder zu wechselhaftem Wetter mit teils kräftigen Niederschlägen. Die Mitteltemperatur an der Wetterstation Bremerhaven im Juli betrug 18 °C, und lag damit nur 0,1 K unter dem langjährigen Julimittelwert (Bezugszeitraum: 1981 – 2010). Die höchsten Temperaturen lagen deutlich über 30 °C. Mit 7 Sommertagen und 2 Heißen Tagen entsprach der Monat Juli dem Durchschnitt. Die Sonnenscheindauer lag bei 92 %, die Monatssumme des Niederschlags bei 169 % des langjährigen Mittels (1981 – 2010). Anfang August waren zunächst antizyklonale West- bis Südwestlagen wetterbestimmend für Norddeutschland, bevor sich ab dem 08.08. eine Hochdruckbrücke über Mitteleuropa, später dann ein Hoch über Fennoskandien einstellte. Die Mitteltemperaturen lagen mit 19,1 °C um 1,2 K über dem langjährigen Mittelwert (1981 – 2010); es gab 107 % der durchschnittlichen Sonnenstunden sowie 92 % des langjährigen Niederschlags. Im August wurden 7 Sommertage (+ 2 ST) und 2 Heiße Tage (+ 1 HT) registriert, die höchsten Temperaturen lagen knapp über 30 °C. Während des September 2015 waren überwiegend zyklonale Nordlagen und Troglagen über West- und Mitteleuropa wetterbestimmend. Die Mitteltemperatur im September 2015 betrug 14,2 °C und lag damit 0,5 K unter dem langjährigen Mittelwert, es wurden 92 % der Sonnenstunden und 104 % des üblichen Niederschlags gemessen (Bezugszeitraum: 1981 – 2010). Die Höchsttemperaturen in Bremerhaven erreichten kaum einmal 20 °C.

7.2 Die Messungen an den drei Stationen im Vergleich

Die über den gesamten Zeitraum gemittelten 10minütigen Temperaturmessungen ergaben an der Wetterstation 16,8 °C, am Theo 16,9 °C und in den Schiffdorfer Wiesen 16,0 °C, siehe Tabelle 11. Die gemittelte relative Feuchte lag bei 78 bzw. 83 %. Die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten finden sich an der Wetterstation mit 5,1 m/s; an der Wiesenstation wurden 2,5 m/s, an der Stadtstation lediglich 0,6 m/s gemessen.

Die 10-Minuten-Messwerte wurden nach Temperaturunterschieden zwischen den drei Stationen untersucht. Dazu werden aus den Messungen sonnige, windschwache Tage und windschwache Nächte ausgewählt. Ergänzend wird zudem einer Windrichtungsabhängigkeit nachgegangen. Dabei stand die Herausarbeitung der städtischen Wärmeinsel im Vordergrund.

Die über alle Tage gemittelten Tageshöchsttemperaturen betragen an der städtischen Station „Theo“ 21,4 °C, an der ländlich geprägten Messstation „Schiffdorfer Wiesen“ 21,1 °C, an der Wetterstation Bremerhaven 20,6 °C. Die absolut höchsten Tageshöchsttemperaturen während des Sommers wurden am 04.07.2015 registriert: die Temperaturen waren an der Stadtstation auf 35,1 °C gestiegen, auf der Wiese auf 34,9 °C, an der Wetterstation auf 34,8 °C. In Bremen und Bremervörde wurden an dem Tag Höchsttemperaturen von über 36 °C gemessen.

Beispielhaft für eine Strahlungswetterlage und dabei gleichzeitig für die beiden heißesten Tage des Jahres zeigt die Abbildung 16 die Tagesgänge der Lufttemperatur sowie der anderen gemessenen Parameter Relative Feuchte, Wind und Globalstrahlung an den drei Stationen „Theo“ (Bremerhaven 2 m), „Schiffdorfer Wiesen“ (Bremerhaven 10 m) und Wetterstation (Wst) am 02.-04.07.2015. An den beiden Heißen Tagen 02. und 04.Juli zeigten alle drei Stationen ab den frühen Morgenstunden einen übereinstimmenden Temperaturanstieg am Vormittag, die Höchsttemperaturen wurden gegen 15 Uhr erreicht. Lediglich die Vergleichsstation Steinau weist einen verzögerten Temperaturanstieg auf. Unterschiede zwischen den drei Bremerhavener Stationen ergaben sich erst ab dem Nachmittag: An der Umlandstation kühlte es schneller und tiefer ab; der Rückgang an Stadtstation und Wetterstation lief nahezu parallel auf leicht höherem Temperaturniveau. Die relative Luftfeuchtigkeit ist meist an der Umlandstation am höchsten, außer bei westlichen Windrichtungen: dann gelangt feuchte Nordseeluft zur Wetterstation, wie die Registrierungen am 03.07.2015 zeigen. Der Tagesgang der Windgeschwindigkeiten veranschaulicht das höhere Niveau der Werte an der Wetterstation, und zwar unabhängig von der Windrichtung. Die Aufzeichnungen der Globalstrahlung lassen deutlich den durch städtische Bebauung und Bewuchs eingeschränkten Horizontbereich der Stadtstation erkennen: Am Vormittag und am späten Nachmittag verschatten Hindernisse den Standort. Währenddessen zeigen Wiesen- und Wetterstation nahezu parallele Tagesgänge mit kurzzeitigen, teils versetzten Einbußen, was auf den Durchzug von Wolken hinweist.

Werden die täglichen Differenzen der Höchsttemperaturen zwischen den drei Stationen betrachtet, ergibt sich, dass es am Theo im Mittel 0,8 K wärmer war als an der Wetterstation und 0,4 K wärmer als auf den Wiesen. Allerdings war es an der Wiesenstation auch 0,5 K wärmer als an der Wetterstation, siehe Tabelle 12. Betrachtet man lediglich die 21 Sommertage der Messperiode, ist die durchschnittliche Differenz der Tageshöchsttemperaturen noch etwas größer: zwischen Theo und Wetterstation bei 1,0 K, zwischen Theo und Wiese bei 0,6 K. An allen 21 Sommertagen war es an der Stadtstation immer wärmer als an der Wetterstation und an der Umlandstation.

Der Mittelwert der täglichen Tiefsttemperaturen betrug an der Stadtstation 13,6 °C, an der Umlandstation 11,9 °C, an der wassernahen Wetterstation aber 13,9 °C. Die Minimumtemperaturen lagen an der Stadtstation zwischen 7,3 und 20,3 °C, an der Umlandstation zwischen 1,7 und 19 °C, an der Wetterstation zwischen 7,9 und 20,9 °C.

Die Mittelung der täglichen Differenzen der Tiefsttemperaturen zwischen den drei Stationen ergibt, dass es an der Wetterstation nachts im Mittel 0,3 K wärmer ist als am Theo und sogar 2,0 K wärmer als auf den Wiesen (Tab. 12). Am Theo war es nachts im Mittel 1,7 K wärmer als an der Wiesenstation. Die maximalen Unterschiede in den täglichen Minimumtemperaturen betragen bis zu 6,5 K (Schiffdorfer Wiesen) sowie 1,7 K (Wetterstation) zur Stadtstation. Die größten Differenzen von mehr als 3 K wurden allerdings meist bei Tiefstwerten unter 15 °C beobachtet. In den Wiesen wurden fast immer die niedrigsten Nachttemperaturen gemessen,

nie war es an einer der beiden anderen Stationen kälter. Übrigens: Warme Nächte mit Tiefstwerten von 18 °C oder höher traten meist an allen drei Stationen gleichzeitig auf.

7.3 Die Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Temperaturdifferenzen zwischen verschiedenen Untergründen (z. B. versiegelte und unversiegelte Oberflächen) prägen sich insbesondere bei einer geringen Durchmischung der bodennahen Luftschicht aus, also bei niedrigen Windgeschwindigkeiten. Insofern ist von besonderem Interesse, wie sich die Temperaturunterschiede zwischen den drei Stationen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit verhalten. Zum einen werden Starkwind-, zum anderen Schwachwindlagen betrachtet: Bei Windgeschwindigkeiten von mindestens 8 m/s (entsprechend Bft 5) ist die Durchmischung so groß, dass Unterschiede zwischen den Messorten minimiert sind, bei schwachwindigen Bedingungen können sich lokale Besonderheiten stärker auf die Temperaturen auswirken.

Der Schwellenwert für die Windgeschwindigkeit bei der Betrachtung von schwachwindigen Strahlungswetterlagen ist mit ≤ 3 m/s definiert. Die Windgeschwindigkeiten an der Wetterstation waren über die gesamte Messkampagne deutlich höher als an der Umlandstation, unabhängig von der Stärke des Windes. Die gesuchten schwachwindigen Bedingungen mit Windgeschwindigkeiten ≤ 3 m/s wurden an der durch wenig Bodenrauigkeit im westlichen Vorfeld geprägten Wetterstation fast nie beobachtet, aber an der Umlandstation durchaus. Aus diesem Grund wurden in dieser Untersuchung die Windgeschwindigkeitsmessungen der Umlandstation Schiffdorfer Wiesen für die Auswahl schwachwindiger Bedingungen herangezogen, ansonsten wurden immer die Windmessungen der Wetterstation verwendet. Beide Windmessungen stammen aus einer Höhe von 10 m über Grund. An der Stadtstation wurde übrigens während der gesamten Messkampagne ausschließlich Schwachwind registriert. Allerdings stammen die Windmessungen dort aus einer Höhe von 2 m. Sie sind durch das städtische Umfeld beeinflusst und nur für diesen Standort repräsentativ. Die Windmessungen der Stadtstation können nicht als Referenz für andere Messorte verwendet werden.

Starkwindbedingungen mit Windgeschwindigkeiten von 8 m/s (entsprechend Bft 5) oder mehr waren im Messzeitraum nicht sehr häufig (ca. 1900 Fälle) und dabei fast immer gekoppelt mit Windrichtungen zwischen 210 und 330°, am häufigsten kam der Starkwind aus Richtung 330°. Die Temperaturunterschiede bei Starkwind von der Stadtstation zur Wiesenstation betragen +0,5 K, zur Wetterstation +0,1 K; von der Station Wiese zur Wetterstation -0,4 K.

7.4 Windrichtungsabhängigkeit bei Schwachwind

Wie bereits erwähnt, hat die Weser einen prägenden Einfluß auf das räumliche Temperaturgefüge in der Region Bremerhaven. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang auch, woher der Wind weht. Aus diesem Grund wurden die Differenzen in den 10-Min-Messwerten der Lufttemperaturen zwischen den drei Stationen in 12 Windrichtungsklassen eingeteilt. Dabei gibt der Klassenwert den Mittelwert der jeweiligen Klasse an: die Klasse „90°“ (Wind aus Richtung Ost) z. B. enthält alle Datensätze, die Windrichtungen zwischen 75° und 104,9° aufweisen.

Für jeden der drei Vergleiche der drei Stationen miteinander sind in den Tabellen 13 und 14 die Mittelwerte der Temperaturdifferenzen (Spalte 0° - 330°) angegeben, die Windrichtungsklassen mit den höchsten bzw. niedrigsten Differenzen (blau unterlegt) sowie die 5 bzw. 95 Perzentile. Die Schraffierungen bzw. die Strichelungen markieren die Blickrichtungen der jeweiligen beiden Vergleichsstationen zueinander (Die Lage der Stationen zeigt Abb. 2). Die Tabelle 13 gibt die windrichtungsabhängigen Temperaturdifferenzen während nachmittäglicher Strahlungswetterlagen (zwischen 12 und 20 Uhr), die Tabelle 14 die Differenzen während der zweiten Nachthälfte (zwischen 0 und 6 Uhr) an.

Während Strahlungswetterlagen war es nachmittags (genauer gesagt: zwischen 12 und 20 Uhr) an der Stadtstation im Mittel 0,7 K wärmer als an der Wetterstation, bei Windrichtungen aus West bis Westnordwest (Klassen 270° - 300°) sogar 1,3 K, siehe Tabelle 13. Bei diesen Windrichtungen kommt die Luft von der Nordsee her und dämpft den Temperaturanstieg an der Wetterstation unmittelbar. Anders ist es an der Stadtstation: Bis die Nordseeluft dorthin gelangt ist, hat sie schon den weitgehend versiegelten Hafengebiet und Teile der Stadt überquert und dadurch einen großen Teil ihres maritimen Charakters verloren. Bei östlichen bis südlichen Windrichtungen (90° - 210°) sind die Unterschiede zwischen Stadt- und Wetterstation mit 0,4 K deutlich geringer. Bei diesen Windrichtungen liegt die Wetterstation im Lee der Stadt und erhält die durch die städtische Überwärmung modifizierte Luft. Dieses zeigt sich auch bei dem Vergleich der Umland- mit der Wetterstation: bei Wind aus Ost bis Südost (90° - 150°) ist es an der Wiesenstation 0,3 K kälter als an der Wetterstation. Anders ist es dann wieder bei Windrichtungen 270° bis 0°, dann liegt die Umlandstation im Lee der Stadt und weist um 1,1 K höhere Temperaturen auf als die Wetterstation. Zusätzlich zu den windrichtungsabhängigen Minimum- und Maximumwerten der Temperaturdifferenzen sind jeweils noch die Perzentile 5 und 95 angegeben. Damit kann abgeschätzt werden, wie groß die Schwankungen in der jeweiligen Gruppe sind.

Tabelle 14 gibt die Temperaturdifferenzen zwischen den drei Stationen in windschwachen Nächten zwischen 0 und 6 Uhr wieder. Große Unterschiede zeigen sich zwischen der Wiesen- und der Wetterstation. Bei West- bis Nordnordwestwind (270° - 330°) ist es um 1 K, bei Ost- bis Ostnordostwind um 2,2 K wärmer an der Wetterstation. Eine ähnliche Größenordnung weisen die Unterschiede zwischen Stadt und Umland auf: die Windrichtungsklassen 0° bis 60° (Nord bis Ostnordost) zeigen um 2,1 K, die Klassen 240° - 270° (Westnordwest bis West) um 0,8 K höhere Temperaturen in der Stadt (bei westlichen Winden liegt die Umlandstation im Lee der Stadt). Der wärmende Einfluß der Weser auf die Nachttemperaturen kommt beim Vergleich Stadt- zu Wetterstation zu Tage. Bei südlichen bis westlichen Windrichtungen zeigt sich kaum ein Temperaturunterschied. Aber bei östlichen Winden (Klasse 90° - 120°) ist es an der Wetterstation um 0,6 K wärmer als in der Stadt. Hier scheinen sich mehrere Effekte zu überlagern: zum einen wird aus dem östlichen Umland kühlere Luft in die Stadt geführt und auf dem Weg allmählich angewärmt, anschließend wird die über der Stadt erwärmte Luft zur Wetterstation verdriftet, und dort ist ja der nächtliche Temperaturrückgang durch die Wesernähe sowieso schon vermindert, ganz unabhängig von der Windrichtung.

7.5 Die Wassertemperaturen der Weser im Zeitraum Juni bis September 2015

Die Wassertemperaturen der Weser in Höhe Bremerhaven betragen Mitte bis Ende Juni 2015 16 - 18 °C. Im Zeitraum 02. bis 28. Juli lagen sie dann dauerhaft zwischen 19 und 21 °C. Dabei zeigten sich die höchsten Werte zwischen dem 5. und 8.07. Genau dann wurden an der Wetterstation auch die höchsten Nachttemperaturen (um 20 °C) sowie die höchsten Tagestemperaturen (bis 35 °C) beobachtet, siehe Kap. 7. Anfang August betragen die Wassertemperaturen vorübergehend nur 18 °C, um dann in der 2. und 3. Augustdekade wieder konstant über 20 °C zu liegen. Die beiden heißen Tage waren am 03. und 06.08. aufgetreten, eine Tropennacht gab es im August nicht. Lediglich am 04. und am 15.08. wurden tiefste Nachttemperaturen von über 19 °C beobachtet, allerdings waren in 2/3 der Augustnächte die Tiefstwerte nicht unter 15 °C gesunken. Erst nach dem 3. September ging die Wassertemperatur wieder auf Werte unter 19 °C zurück, am Monatsende war sie auf unter 16 °C gefallen. Die Weser bei Bremerhaven ist sowohl ein Fließgewässer als auch ein Tidegewässer, damit ist das Wasser immer in Bewegung. Anders als in stehenden und flachen Gewässern ist dadurch auch bei anhaltend sommerlichen Bedingungen der Anstieg der Wassertemperaturen begrenzt.

8 Anwendung der Ergebnisse der Messkampagne

Die Auswertung der temporären Messungen in Bremerhaven im Sommer 2015 hat gezeigt, dass die Temperaturen an der Wetterstation im Mittel um 0,7 Kelvin unter den Temperaturen der Stadtstation Theo lagen (siehe Kapitel 7). Mittels einer Erhöhung der langjährig an der Wetterstation gemessenen Maximumtemperaturen um 0,7 K können damit für den Stadtbereich die Anzahlen für Sommertage und heiße Tage angepasst werden. Dieses Vorgehen ermöglicht eine Abschätzung der Häufigkeit und Andauer der zu erwartenden Wärmebelastung.

Mittels der Tabelle 15 kann überschlagen werden, wie hoch die zusätzliche Anzahl der Sommertage und heißen Tage unter Einfluss des gemessenen städtischen Wärmeinseleffektes bei unterschiedlichen mittleren Temperaturdifferenzen ist. Die Tabelle gibt darüber hinaus auch die Möglichkeit, auch für höhere Temperaturunterschiede eine Vorstellung über die Größenordnung von Veränderungen zu erlangen. Hierzu bedarf es aber noch weiterer Untersuchungen über die Temperaturverhältnisse in der Stadt. Entsprechend der während der Messkampagne ermittelten durchschnittlichen Temperaturdifferenz von 0,7 K zwischen Wetterstation und Stadtstation ergibt sich für die Innenstadtbereiche eine Anzahl von jährlich 21 Sommertagen, das entspricht einer Erhöhung um 25 % gegenüber der Anzahl an der Wetterstation. Eine angenommene Temperaturerhöhung um 2 K auf die an der Wetterstation im Zeitraum 1961 – 2015 gemessenen Höchsttemperaturen ergäbe jährlich 29,7 Sommertage in der Stadt. Noch deutlicher ändert sich die Häufigkeit der heißen Tage. Ein Zuschlag von 0,7 K auf die im o. g. Zeitraum an der Wetterstation gemessenen Maximumtemperaturen ergibt jährlich 3,5 heiße Tage in der Stadt; eine angenommene Temperaturerhöhung um 2 K führt sogar zu jährlich 5,9 heißen Tagen in der Stadt; das entspricht einem Anstieg um 132 %.

9 Fazit

Über den Siedlungsflächen einer Stadt bildet sich eine so genannte Wärmeinsel aus. Diese ist besonders ausgeprägt bei windschwachen Strahlungswetterlagen. Dabei liegen die Temperaturen im Mittel im Vergleich zum freien Umland meist um 0,5 K bis 2 K höher. In der Regel fällt der Temperaturunterschied über Tag nicht so deutlich aus wie nachts.

Während der 3 1/2monatigen Messkampagne, die von Juni bis September 2015 in Bremerhaven durchgeführt wurde, konnten mit einer stationären Stadtstation und einer festen, freien Umlandstation für die Tageshöchsttemperaturen in der Stadt im Mittel um 0,8 K höhere Werte im Vergleich zur Wetterstation und um 0,4 K höhere Werte im Vergleich zur Wiesenstation ermittelt werden. Die Differenz der täglichen Minimumtemperaturen zwischen Stadt und Umland beträgt im Mittel 1,7 K. Die besondere wassernahe Lage der Wetterstation bedingt, dass es nachts dort immer wärmer ist als in der Stadt (+ 0,3 K) und im Umland (+ 2,0 K), siehe Tabelle 12. Die Auswertung der 10-Min-Messwerte ermöglichte eine Berücksichtigung unterschiedlicher Windgeschwindigkeiten, wobei insbesondere schwachwindige Strahlungswetterlagen von Interesse sind. Während der zweiten Nachthälfte ist es in der Stadt bis zu 1,4 K wärmer als im Umland; an der Wetterstation – unabhängig von der Windgeschwindigkeit – um 0,3 K wärmer als in der Stadt, siehe Tabelle 16. Darüber hinaus hat sich auch eine Windrichtungsabhängigkeit der Temperaturunterschiede gezeigt, siehe Tabellen 13 und 14.

Die mittlere jährliche Anzahl von Sommertagen (bzw. Heiße Tage) bezogen auf den Bezugszeitraum 1971 – 2000 beträgt für die Wetterstation Bremerhaven 16,5 Tage (2,4 HT). Während dieser 30 Jahre traten insgesamt 494 Sommertage (72 HT) auf. Die mittlere Andauerzeit von Perioden mit Sommertagen betrug 2,7 Tage (1,5 Tage bei Heißen Tagen).

Wird ein städtischer Wärmeinseleffekt von 0,7 K im Vergleich zur Wetterstation angesetzt, steigt die mittlere Anzahl der Sommertage auf 20 Tage, bei 2 K Temperaturdifferenz sind es 28 Tage, was einer Zunahme von 21 % bzw. 70 % entspricht (Werte bezogen auf den Zeitraum 1971 – 2000). Die jährliche Anzahl der Heißen Tage erhöht sich bei einem Temperaturanstieg um 0,7 K auf 3,2 Tage, bei 2 K innerstädtischem Temperaturanstieg schon auf jährlich 5,7 Heiße Tage.

Der Klimawandel hebt das allgemeine Temperaturniveau an, die relative Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Umland bleibt dabei erhalten. Nach dem 85. Perzentil von 16 Ensemblemitgliedern an berücksichtigten Klimaprojektionsrechnungen nimmt die Anzahl von Sommertagen im Bezugszeitraum 2021 bis 2050 um 11 Tage, im Bezugszeitraum 2071 bis 2100 um 35 Tage zu (siehe Tab. 10). Bremerhaven erreicht damit eine durchschnittliche jährliche Anzahl von 27,5 bzw. 51,5 Sommertagen und damit bis zum Ende des Jahrhunderts das 3fache des 1971-2000-Standards. Der städtische Wärmeinseleffekt führt dazu, dass die Anzahl der Sommertage entsprechend des 85. Perzentils bis zum Jahrhundertende 55 Tage (bei 0,7 K

Temperaturerhöhung) bzw. 63 Tage (bei 2 K Temperaturerhöhung) annimmt. Im letzten Drittel dieses Jahrhunderts wäre demnach in manchen Stadtteilen nahezu das 4fache an Sommertagen im Vergleich zur Wetterstation im Zeitraum 1971 - 2000 möglich, siehe Abbildung 17. Die Tropennächte werden in Bremerhaven bis zur Zeitspanne 2021 bis 2050 nach dem 85. Perzentil von 13 Regionalen Klimamodellen auf jährlich 4 Nächte ansteigen, bis zum Zeitraum 2071 bis 2100 wird sich die Anzahl nahezu vervierfachen, siehe Abbildung 18. Die Messkampagne im Sommer 2015 hatte gezeigt, dass das nächtliche Temperaturniveau in der Stadt etwa 0,3 K niedriger ist als an der wassernahen Wetterstation. In der Innenstadt ist die Anzahl der Tropennächte also etwas geringer als an der Wetterstation. Aber dennoch muss auch in Bremerhaven damit gerechnet werden, dass ein angenommener Wärmeinseleffekt von + 1 K im letzten Drittel dieses Jahrhunderts innerstädtisch zu jährlich 15 Tropennächten führen kann.

Trotz der - im Vergleich zu anderen Gegenden in Deutschland - sehr guten Belüftung in der norddeutschen Tiefebene ist auch in Bremerhaven ein Wärmeinseleffekt zu erkennen. Es zeigt sich darüber hinaus, dass auch der Bremerhavener Raum entsprechend des globalen Temperaturgeschehens im Rahmen des Klimawandels einen Temperaturanstieg zu verzeichnen hat. Beide Effekte führen in den städtischen Siedlungsräumen sowohl tagsüber als auch nachts zu einem markanten Anstieg Wärme belastender Situationen.

Obwohl eine zunehmende Anzahl regionaler Klimamodelle bei der Abschätzung zukünftiger Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigt wird, bleiben große Unsicherheiten. Es zeigt sich aber, dass mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit die Wärmebelastung in den Städten deutlich zunehmen wird, so dass Anpassungsmaßnahmen zur Minderung derartiger belastender Situationen deutlich an Wichtigkeit gewinnen.

10 Literatur

Früh, B., Koßmann, M., Roos, M., 2011: Frankfurt am Main im Klimawandel – eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung, Berichte des Deutschen Wetterdienstes 237, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main 2011

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

Landsberg, H. E., 1981: The urban climate, International Geophysics Series, Volume 28, Academic Press, New York

Meyers kleines Lexikon, 1987: Meteorologie, Meyers Lexikonverlag

Oke, T. R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. Q.J.R. Meteor. Soc. 108, 1-24.

Riecke, W., 2013: Untersuchung zur Entwicklung der Anzahl der Sommertage und Tropenächte in der Freien und Hansestadt Bremen von 1971 – 2100

Rixecker, O., 1974: Das Klima des Wirtschaftsraumes Bremerhaven, DWD Einzelveröffentlichungen Nr. 85

Schlünzen, K. H., Hoffmann, P., Rosenhagen, G., Riecke, W., 2010: Long-term changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg. Int. J. Climatol., 30

Schlünzen, K. H., 2012: Im Rahmen der 2. Regionalkonferenz des Bundes und der Norddeutschen Küstenländer in Bremerhaven

Schlünzen, K. H., Riecke, W., 2016: Klimabericht für die Metropolregion Hamburg (im Druck)

Stewart, I. D., Oke, T. R., 2012: ‚Local climate zones‘ for urban temperatures studies, Bulletin of the American Meteorological Society, 2012

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

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die klimatologischen Kenntage in Bremerhaven und Umgebung.....	26
Tabelle 2: Durchschnittliche und maximale Andauer der Kenntage in Bremerhaven und Bremen sowie Worpsswede	26
Tabelle 3: Tropennächte in Bremerhaven flankiert von Sommertagen oder Heißen Tagen	26
Tabelle 4: Jahrgang der Sommertage in Bremerhaven für unterschiedliche Zeiträume	27
Tabelle 5: Durchschnittliche Anzahl der Sommertage pro Jahr und pro Monat	27
Tabelle 6: Jahrgang der Heißen Tage in Bremerhaven für unterschiedliche Zeiträume	27
Tabelle 7: Durchschnittliche Anzahl der Heißen Tage pro Jahr und pro Monat	27
Tabelle 8: Jahrgang der Tropennächte in Bremerhaven für unterschiedliche Zeiträume	28
Tabelle 9: Durchschnittliche Anzahl der Tropennächte pro Jahr und pro Monat.....	28
Tabelle 10: Entwicklung der Kenntage in der Zukunft, bezogen auf 1971 – 2000.....	28
Tabelle 11: Übersicht über die Ergebnisse der Messkampagne (18.06.-30.09.2015)	28
Tabelle 12: Temperaturdifferenzen zwischen den Stationen, bezogen auf die Tageswerte der Lufttemperatur	29
Tabelle 13: Temperaturdifferenzen zwischen den Stationen bei schwachwindigen Strahlungswetterlagen am Nachmittag.....	29
Tabelle 14: Temperaturdifferenzen in windschwachen Nächten	29
Tabelle 15: Änderung der Kenntage durch den Wärmeinseleffekt, abgeschätzt aus den Tageswerten der Lufttemperatur an der Wetterstation.....	30
Tabelle 16: Vergleich der Temperaturdifferenzen zwischen den drei Stationen in Bremerhaven	30

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Lage von Bremerhaven und den Vergleichsstationen Bremen, Steinau, Bremervörde und Worswede.....	31
Abbildung 2: Die Lage der temporären Messstationen in Bremerhaven.....	32
Abbildung 3: Die Stadtstation in der Lutherstraße 11, auf dem Parkplatz des „Theo“ ...	33
Abbildung 4: Die Umlandstation in den Schiffdorfer Wiesen.....	33
Abbildung 5: Die Wetterstation Bremerhaven mit der Lage des Messfeldes und des Windmastes aus der Vogelperspektive	34
Abbildung 6: Die Jahresmitteltemperaturen an den Wetterstationen Bremerhaven und Bremen im Vergleich.....	35
Abbildung 7: Die Jahresmittelwerte der Tagestiefsttemperaturen an den Wetterstationen Bremerhaven und Bremen im Vergleich.....	35
Abbildung 8: Die Jahresmittelwerte der Tageshöchsttemperaturen an den Wetterstationen Bremerhaven und Bremen im Vergleich	36
Abbildung 9: Tageshöchsttemperaturen im Vergleich: Jahresmittelwerte und Sommermittelwerte an der Wetterstation Bremerhaven	36
Abbildung 10: Vergleich der Jahresmitteltemperaturen und der Sommermitteltemperaturen an der Wetterstation Bremerhaven	37
Abbildung 11: Tagestiefsttemperaturen im Vergleich: Jahresmittelwerte und Sommermittelwerte an der Wetterstation Bremerhaven	37
Abbildung 12: Jahresmitteltemperaturen für Deutschland im Zeitraum 1881 – 2015.....	38
Abbildung 13: Jährliche Anzahl der Sommertage an den Wetterstationen Bremerhaven und Bremen	38
Abbildung 14: Jährliche Anzahl der Heißen Tage an den Wetterstationen Bremerhaven und Bremen	39
Abbildung 15: Erster und Letzter Sommertag des Jahres an der Wetterstation Bremerhaven	39
Abbildung 16: Tagesgänge der meteorologischen Parameter vom 02. bis 04.07.2015 ..	40
Abbildung 17: Entwicklung der Anzahl der Sommertage in Bremerhaven	41
Abbildung 18: Entwicklung der Anzahl der Tropennächte in Bremerhaven	41

Tabelle 1: Die klimatologischen Kenntage in Bremerhaven und Umgebung für unterschiedliche Bezugszeiträume

Sommertage	Bremerhaven		Bremen		Steinau	Bremervörde	Worpswede	
	1961-2015	1999-2015	1961-2015	1999-2015	1999-2015	1999-2015	1964-2015	1999-2015
Anzahl	927	359	1463	562	417	497	1316	503
Mittel (d/a)	16,9	21,1	26,6	30,9	24,5	27,6	25,3	29,6
Maximum (N a)	36 2006	36 2006	51 1976	48 '03,'06	39 '03,'06	49 1999	51 2006	51 2006
Heiße Tage	Bremerhaven		Bremen		Steinau	Bremervörde	Worpswede	
	1961-2015	1999-2015	1961-2015	1999-2015	1999-2015	1999-2015	1964-2015	1999-2015
Anzahl	139	59	244	93	68	81	215	93
Mittel (d/a)	2,5	3,5	4,4	5,5	4	4,5	4,1	5,5
Maximum (N a)	11 1994	9 2003	15 '76,'94	12 2006	10 2003	12 1999	15 1994	12 2010
Tropennächte	Bremerhaven		Bremen		Steinau	Bremervörde	Worpswede	
	1961-2015	1999-2015	1961-2015	1999-2015	1999-2015	1999-2015		2004-2015
Anzahl	56	20	16	4	2	6		4
Mittel (d/a)	1,02	1,2	0,3	0,2	0,1	0,4		0,3
Maximum (N a)	10 1994	5 2010	2 diverse	2 2010	1 '10,'13	3 2010		2 '10,'13

(Maximum (N | a): '03, '06 lies 2003, 2006; '76, '94 lies 1976, 1994)

Tabelle 2: Durchschnittliche und maximale Andauer der Kenntage in Bremerhaven und Bremen (1961-2015) sowie Worpswede (1964-2015, Achtung: TN aus 2004-2015)

Kenntag	Bremerhaven		Bremen		Worpswede	
	Mittel	Max	Mittel	Max	Mittel	Max
ST	2,1	12	2,6	21	2,5	18
HT	1,5	6	1,7	9	1,7	9
TN	1,3	3	1,1	2	(1,3)	(2)

(ST: Sommertag; HT: Heißer Tag; TN: Tropennacht)

Tabelle 3: Tropennächte in Bremerhaven flankiert von Sommertagen oder Heißen Tagen

Jahr	Gesamt	ST vor TN	ST nach TN	HT vor TN	HT nach TN
1994	10	10	8	7	4
2010	5	5	5	3	4
2006	4	4	3	3	1

(ST: Sommertag; HT: Heißer Tag; TN: Tropennacht)

Tabelle 4: Jahresgang der Sommertage in Bremerhaven für unterschiedliche Zeiträume

Zeitraum	Jahre	Anzahl	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
1961-1990	30	402	2	38	93	128	119	22	0
1971-2000	30	494	7	56	89	168	150	24	0
1981-2010	30	566	10	49	92	214	160	41	0
1986-2015	30	580	10	46	90	220	167	46	1
1949-2015	67	1073	12	84	213	372	312	79	1
1961-2015	55	927	11	76	178	329	266	66	1

(Tabellenwerte: Jahres- bzw. Monatssummen, jeweils bezogen auf die unterschiedlichen Zeiträume)

Tabelle 5: Durchschnittliche Anzahl der Sommertage pro Jahr und pro Monat des Auftretens

Zeitraum	Jahre	gesamt	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
1961-1990	30	13,40	0,07	1,27	3,10	4,27	3,97	0,73	-
1971-2000	30	16,47	0,23	1,87	2,97	5,60	5,00	0,80	-
1981-2010	30	18,87	0,33	1,63	3,07	7,13	5,33	1,37	-
1986-2015	30	19,33	0,33	1,53	3,00	7,33	5,57	1,53	0,03
1949-2015	67	16,01	0,18	1,25	3,18	5,55	4,66	1,18	0,01
1961-2015	55	16,85	0,20	1,38	3,24	5,98	4,84	1,20	0,02

(Tabellenwerte: Tage/Jahr bzw. Tage/Monat)

Tabelle 6: Jahresgang der Heißen Tage in Bremerhaven für unterschiedliche Zeiträume

Zeitraum	Jahre	Anzahl	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
1961-1990	30	48	0	8	21	19	0
1971-2000	30	72	0	13	30	29	0
1981-2010	30	102	1	16	48	37	0
1986-2015	30	97	1	14	48	34	0
1949-2015	67	146	1	22	70	52	1
1961-2015	55	139	1	21	66	51	0

(Tabellenwerte: Jahres- bzw. Monatssummen bezogen auf die unterschiedlichen Zeiträume)

Tabelle 7: Durchschnittliche Anzahl der Heißen Tage pro Jahr und pro Monat des Auftretens

Zeitraum	Jahre	gesamt	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
1961-1990	30	1,60	-	0,27	0,70	0,63	-
1971-2000	30	2,40	-	0,43	1,00	0,97	-
1981-2010	30	3,40	0,03	0,53	1,60	1,23	-
1986-2015	30	3,23	0,03	0,47	1,60	1,13	-
1949-2015	67	2,18	0,01	0,33	1,04	0,78	0,01
1961-2015	55	2,53	0,02	0,38	1,20	0,93	-

(Tabellenwerte: Tage/Jahr bzw. Tage/Monat)

Tabelle 8: Jahrgang der Tropennächte in Bremerhaven für unterschiedliche Zeiträume

Zeitraum	Jahre	Anzahl	Jun	Jul	Aug
1961-1990	30	7	1	4	2
1971-2000	30	28	5	13	10
1981-2010	30	47	9	22	16
1986-2015	30	51	10	22	19
1949-2015	67	56	10	26	20
1961-2015	55	56	10	26	20

(Tabellenwerte: Jahres- bzw. Monatssummen, bezogen auf die unterschiedlichen Zeiträume)

Tabelle 9: Durchschnittliche Anzahl der Tropennächte pro Jahr und pro Monat des Auftretens

Zeitraum	Jahre	gesamt	Jun	Jul	Aug
1961-1990	30	0,23	0,03	0,13	0,07
1971-2000	30	0,93	0,17	0,43	0,33
1981-2010	30	1,57	0,30	0,73	0,53
1986-2015	30	1,70	0,33	0,73	0,63
1949-2015	67	0,84	0,15	0,39	0,30
1961-2015	55	1,02	0,18	0,47	0,36

(Tabellenwerte: Tage/Jahr bzw. Tage/Monat)

Tabelle 10: Entwicklung der Kenntage in der Zukunft, bezogen auf den Zeitraum 1971 – 2000

Kenn-Tag	Perzentil	2021 - 2050			2071 - 2100		
		Frühjahr	Sommer	Herbst	Frühjahr	Sommer	Herbst
ST	15.		0			5	
	85.	1	8	2	2	23	10
HT	15.		0			1	
	85.	0	5	0		15	5
TN	15.		0			1	
	85.	0	3	0	0	11	2

(ST: Sommertag; HT: Heißer Tag, TN: Tropennacht, Tabellenwerte: Tage/Quartal)

Tabelle 11: Übersicht über die Ergebnisse der Messkampagne vom 18.06.-30.09.2015

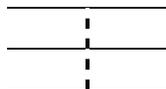
	Temperatur			Relative Feuchte (%)	Windgeschw.		Sommer-tag (N)	Heißer Tag (N)	Tropen-nacht (N)
	Mittel (° C)	Minimum (° C)	Maximum (° C)		Mittel (m/s)	Maximum (m/s)			
Wetterstation	16,7	7,5	34,8	78,0	5,1	21,0	14	4	1
Stadtstation	16,8	6,2	35,1	77,5	0,6	2,7	21	4	0
Umlandstation	16,0	0,9	34,9	83,1	2,5	13,3	17	4	1
Bremen	16,7	2,7	36,8	-	3,8	13,0	24	6	0
Steinau	16,0	2,1	34,1	-	-	-	17	3	0
Bremervörde	16,0	0,9	35,3	-	3,0	10,3	16	4	0
Worpswede	16,3	1,9	36,0	-	-	-	19	5	0

Tabelle 12: Temperaturdifferenzen zwischen den Stationen (angegeben in K), bezogen auf die Tageswerte der Lufttemperatur

Temperatur	Theo - Wst		Theo - Wiese		Wiese - Wst	
	Mittelwert	Spanne	Mittelwert	Spanne	Mittelwert	Spanne
Minimum	- 0,3	- 1,7 ... + 1,0	+ 1,7	+ 0,1 ... + 5,6	- 2,0	- 6,5 ... 0,0
Mittelwert	+ 0,1	- 0,7...+ 3,7	+ 0,9	- 0,1 ...+ 4,4	- 0,8	- 2,8 ... + 0,4
Maximum	+ 0,8	- 0,7 ... + 3,0	+ 0,4	- 1,1 ... + 1,5	+ 0,5	- 1,2 ... + 3,8

Tabelle 13: Temperaturdifferenzen (angegeben in K) zwischen den Stationen bei schwachwindigen Strahlungswetterlagen am Nachmittag (zwischen 12 und 20 Uhr)

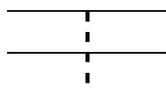
Tageszeit	Stationen		0° - 330°	Windrichtungsklassen												
				0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	0°
12 - 20 h	Theo - Wiese	Mittelwert	+ 0,6			+ 0,7								+ 0,2		
		5 <-> 95 Perzentil				+ 0,1 <-> + 1,5								- 1,6 <-> + 1,3		
	Theo - Wst	Mittelwert	+ 0,7						+ 0,4					+ 1,3		
		5 <-> 95 Perzentil							- 1,0 <-> + 1,6					- 0,6 <-> + 3,8		
	Wiese - Wst	Mittelwert	+ 0,2						- 0,3							+ 1,1
		5 <-> 95 Perzentil							- 1,2 <-> + 0,7							- 0,9 <-> + 3,7



Markiert die Blickrichtungen der beiden Stationen zueinander

Tabelle 14: Temperaturdifferenzen (angegeben in K) zwischen den Stationen in wind-schwachen Nächten (zwischen 0 und 6 Uhr)

Tageszeit	Stationen		0° - 330°	Windrichtungsklassen												
				0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	0°
0 - 6 h	Theo - Wiese	Mittelwert	+ 1,4			+ 2,1								+ 0,8		
		5 <-> 95 Perzentil				+ 0,3 <-> + 5,0								0,1 <-> + 4,2		
	Theo - Wst	Mittelwert	- 0,3						- 0,6					- 0,1		
		5 <-> 95 Perzentil							- 1,5 <-> 0,0					- 1,1 <-> + 0,8		
	Wiese - Wst	Mittelwert	- 1,7			- 2,2										- 1,0
		5 <-> 95 Perzentil				- 6,2 <-> - 0,4										- 5,8 <-> - 0,1



Markiert die Blickrichtungen der beiden Stationen zueinander

Tabelle 15: Änderung der Kenntage durch den Wärmeinseleffekt, abgeschätzt aus den Tageswerten der Lufttemperatur an der Wetterstation

Zuschlag auf T	ST/Jahr	%	HT/Jahr	%	Zuschlag auf T	TN/Jahr	%
0 K	16,9	100	2,5	100	0 K	1,02	100
+ 0,7 K	21,0	125	3,5	140	- 0,3 K	0,64	63
+ 1,0 K	23,0	137	4,1	162	+ 1,0 K	2,76	271
+ 2,0 K	29,7	176	5,9	232	+ 2,0 K	6,00	588

(ST: Sommertag; HT: Heißer Tag; TN: Tropennacht;

Zuschlag auf T: 0 K -> Werte der Wetterstation (1961-2015);

+ 0,7 K -> gemessener Wärmeinseleffekt;

- 0,3 K -> gemessener nächtlicher Stadteffekt

+1,0 / + 2,0 K -> angenommener Wärmeinseleffekt)

Tabelle 16: Vergleich der Temperaturdifferenzen (angegeben in K) zwischen den drei Stationen in Bremerhaven, für alle Windgeschwindigkeiten sowie für Schwachwind

Windgeschw.	Zeit (UTC)	Theo - Wst	Theo - Wiese	Wiese - Wst	Wetter
bis 21 m/s	0 - 24	+ 0,5	+ 0,5	+ 0,1	Sonnig
bis 21 m/s	12 - 20	+ 0,7	+ 0,6	+ 0,2	Sonnig
bis 21 m/s	0 - 6	- 0,3	+ 1,2	- 1,6	-
bis 3,0 m/s	0 - 24	+ 0,4	+ 0,5	0,0	Sonnig
bis 3,0 m/s	12 - 20	+ 0,7	+ 0,6	+ 0,2	Sonnig
bis 3,0 m/s	0 - 6	- 0,3	+ 1,4	- 1,7	-



Abbildung 1: Die Lage von Bremerhaven und den Vergleichsstationen Bremen, Steinau, Bremervörde und Worpswede.

(Auszug a. d. Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, © <2011> Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Niedersachsen (LGLN)

 LGLN | (www.lgln.niedersachsen.de)



Abbildung 2: Die Lage der temporären Messstationen in Bremerhaven
(Auszug a. d. Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung,
© <2011> Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Niedersachsen (LGLN)

 **LGLN** (www.lgln.niedersachsen.de)



Abbildung 3: Die Stadtstation in der Lutherstraße 11, auf dem Parkplatz des „Theo“

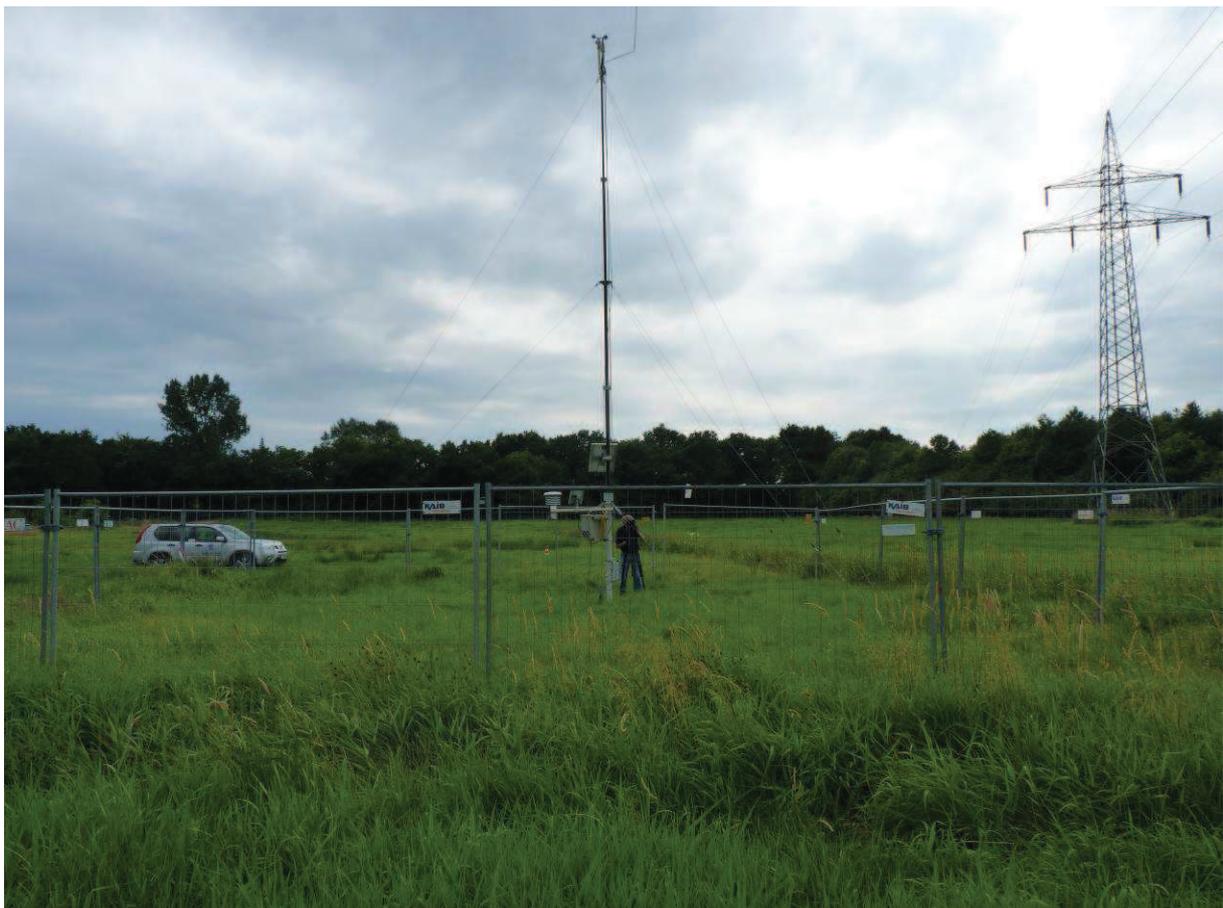


Abbildung 4: Die Umlandstation in den Schiffdorfer Wiesen

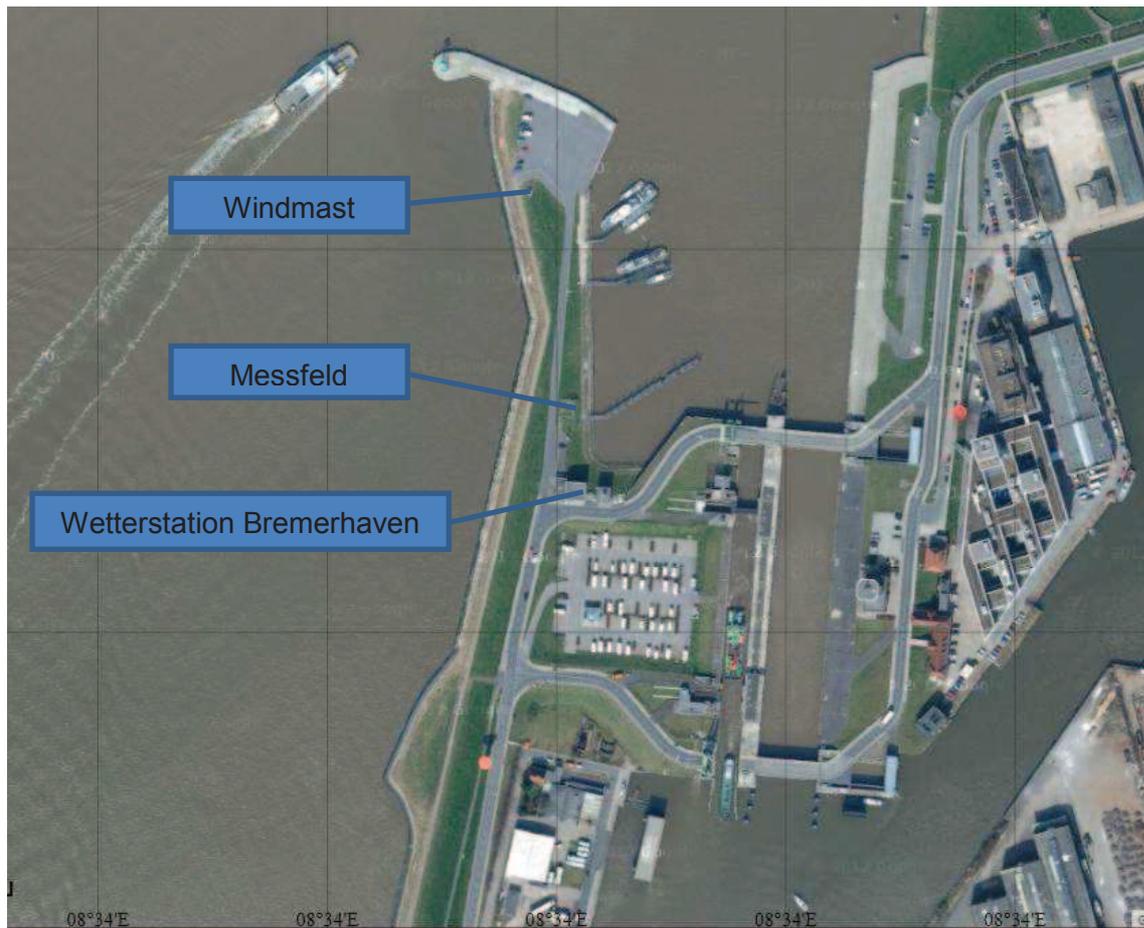


Abbildung 5: Die Wetterstation Bremerhaven mit der Lage des Messfeldes und des Windmastes aus der Vogelperspektive zum aktuellen Zeitpunkt

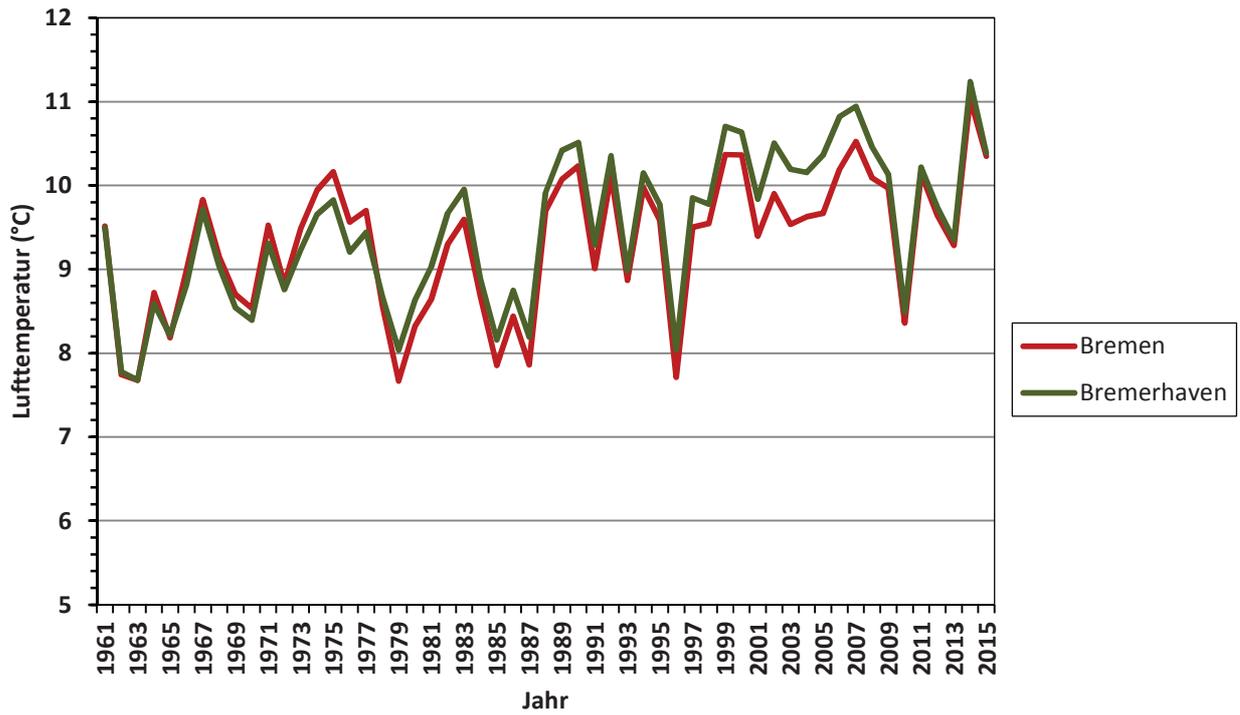


Abbildung 6: Die Jahresmitteltemperaturen an den Wetterstationen Bremerhaven und Bremen im Vergleich

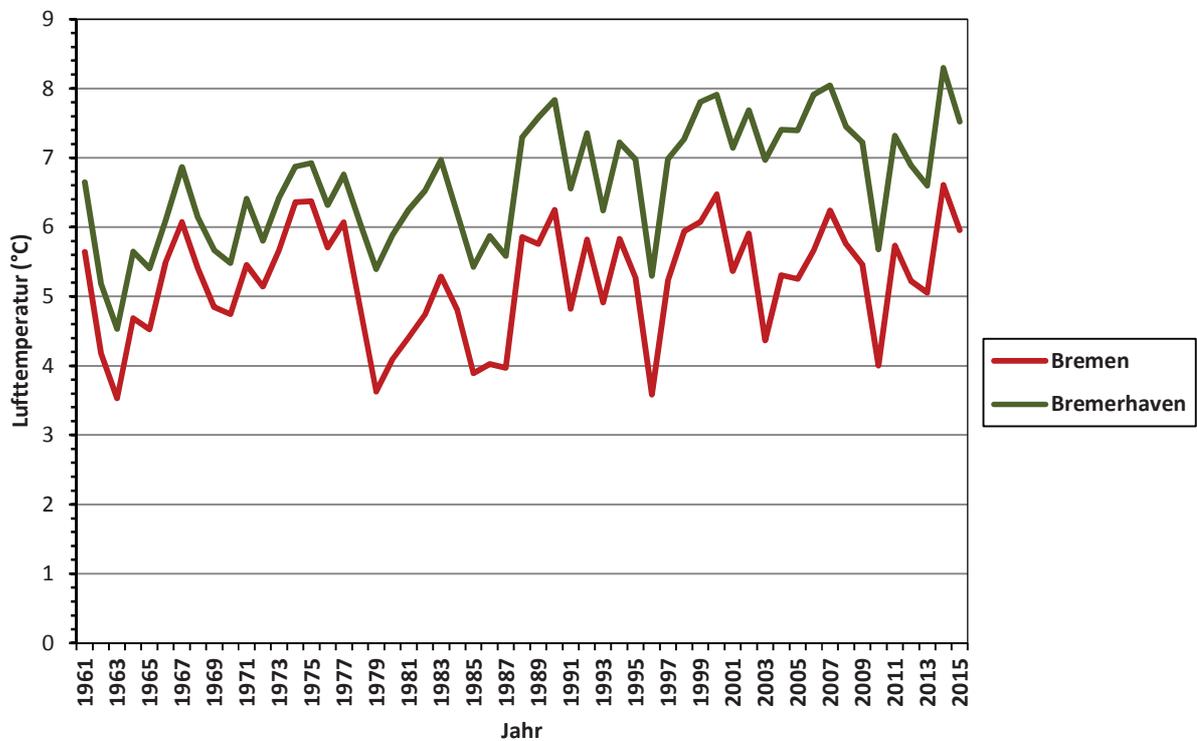


Abbildung 7: Die Jahresmittelwerte der Tagestiefsttemperaturen an den Wetterstationen Bremerhaven und Bremen im Vergleich

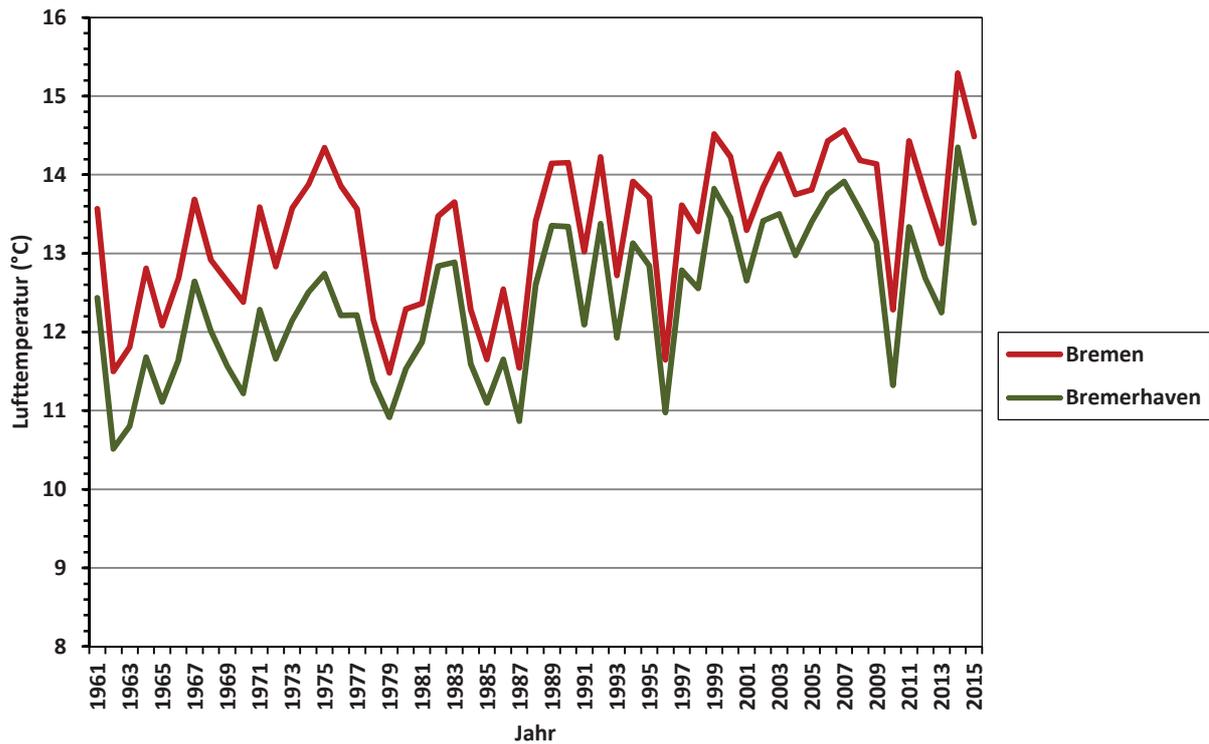


Abbildung 8: Die Jahresmittelwerte der Tageshöchsttemperaturen an den Wetterstationen Bremerhaven und Bremen im Vergleich

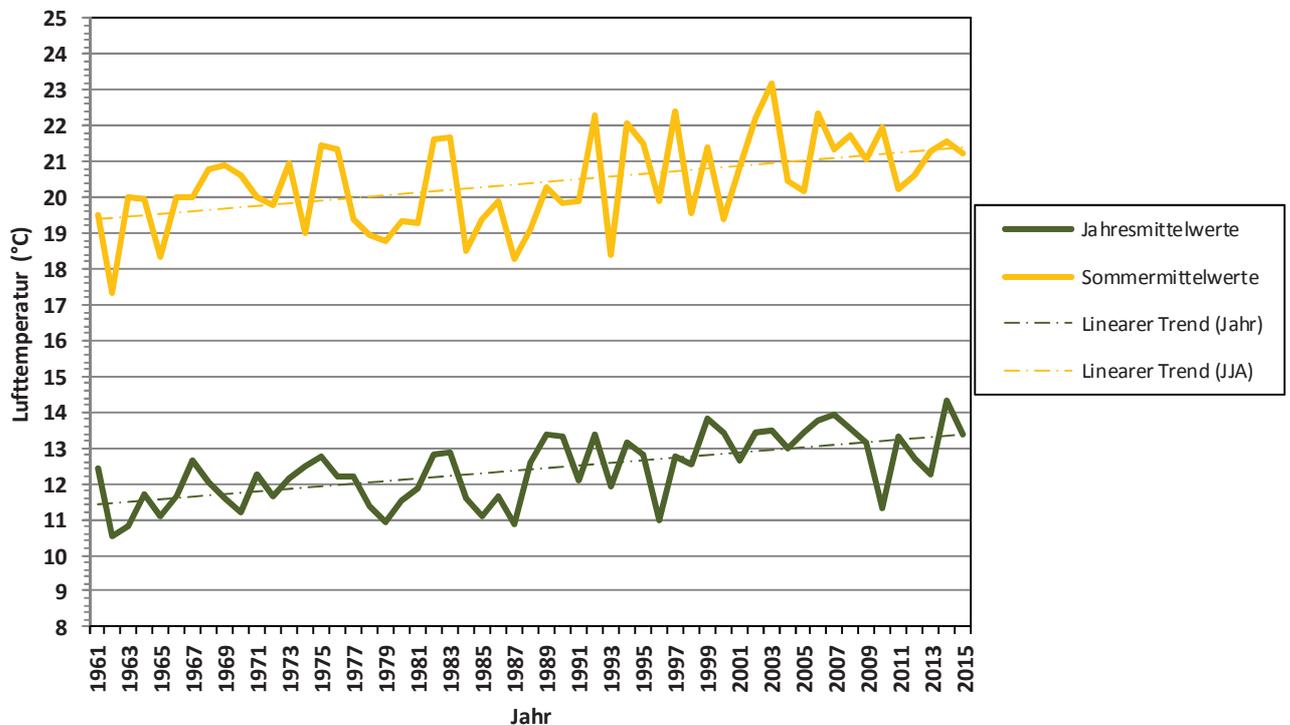


Abbildung 9: Tageshöchsttemperaturen im Vergleich: Jahresmittelwerte und Sommermittelwerte an der Wetterstation Bremerhaven (Sommermonate: Juni, Juli, August)

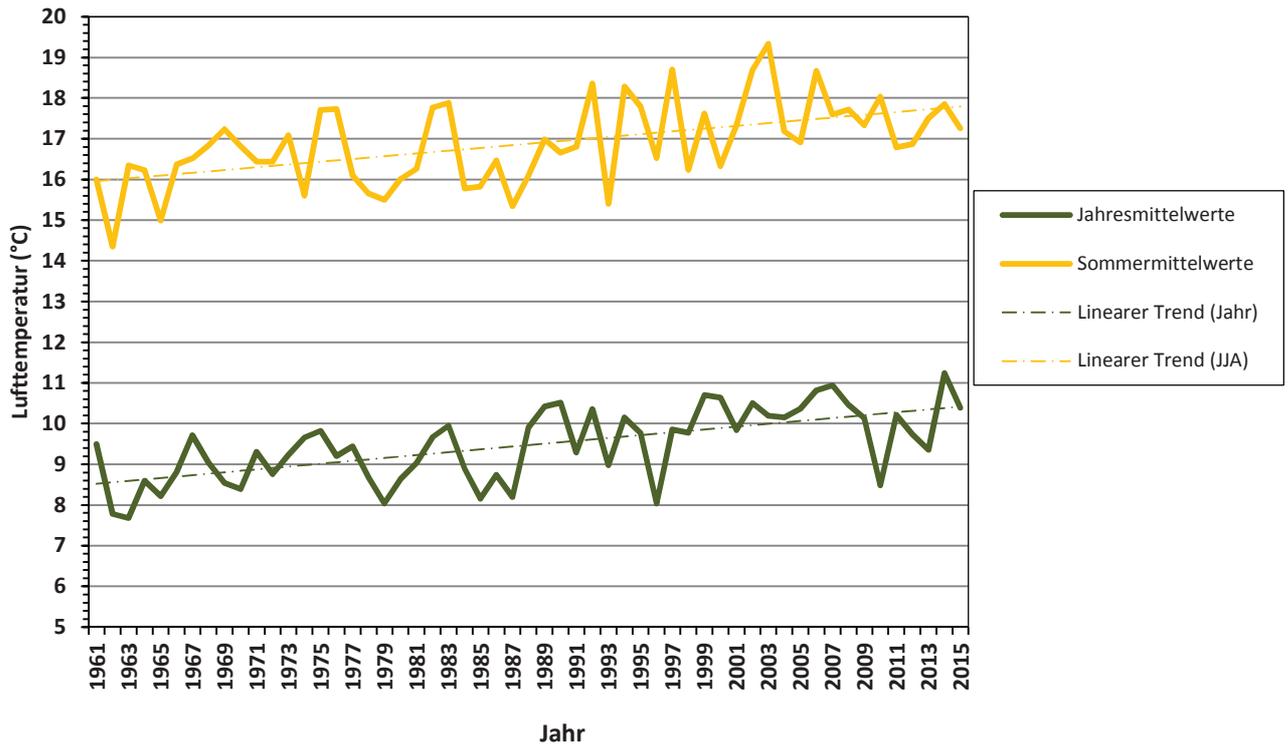


Abbildung 10: Vergleich der Jahresmitteltemperaturen und der Sommermitteltemperaturen an der Wetterstation Bremerhaven (Sommermonate: Juni, Juli, August)

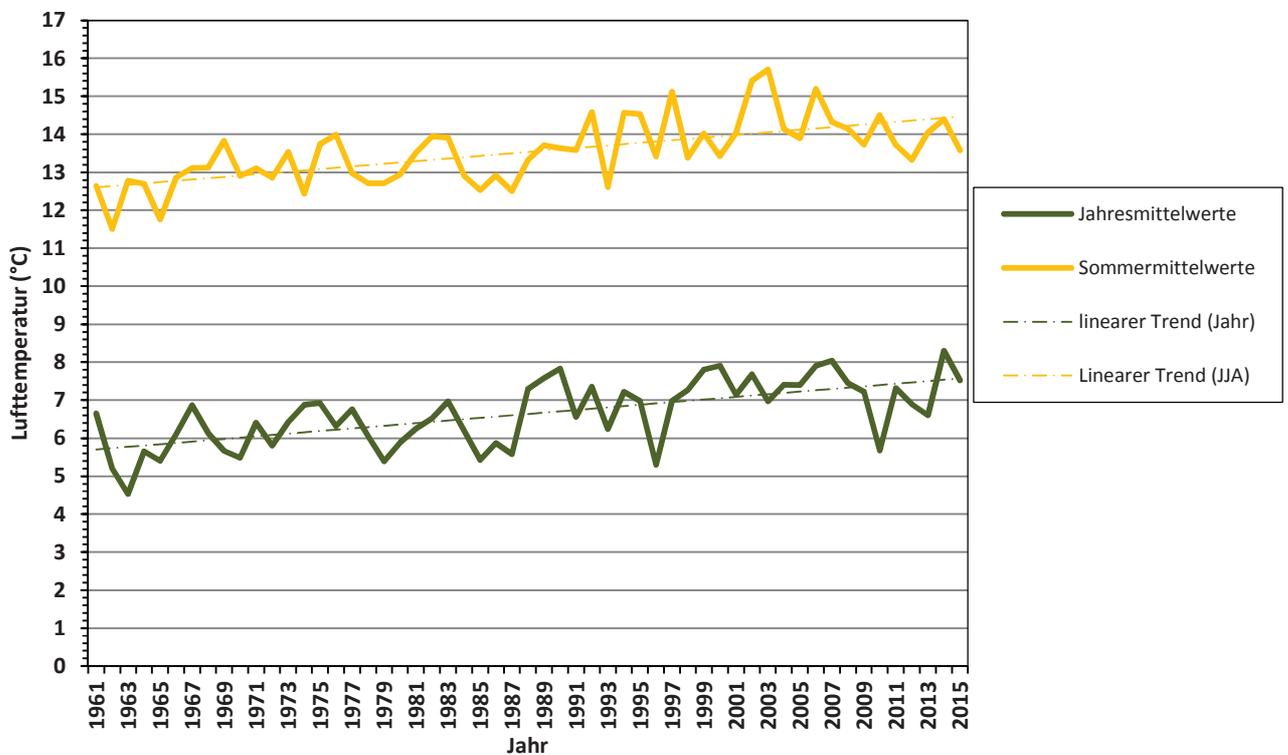


Abbildung 11: Tagestiefsttemperaturen im Vergleich: Jahresmittelwerte und Sommermittelwerte an der Wetterstation Bremerhaven (Sommermonate: Juni, Juli, August)

**Jahresmittelwerte der Tagesmitteltemperatur für Deutschland
1881 - 2015**

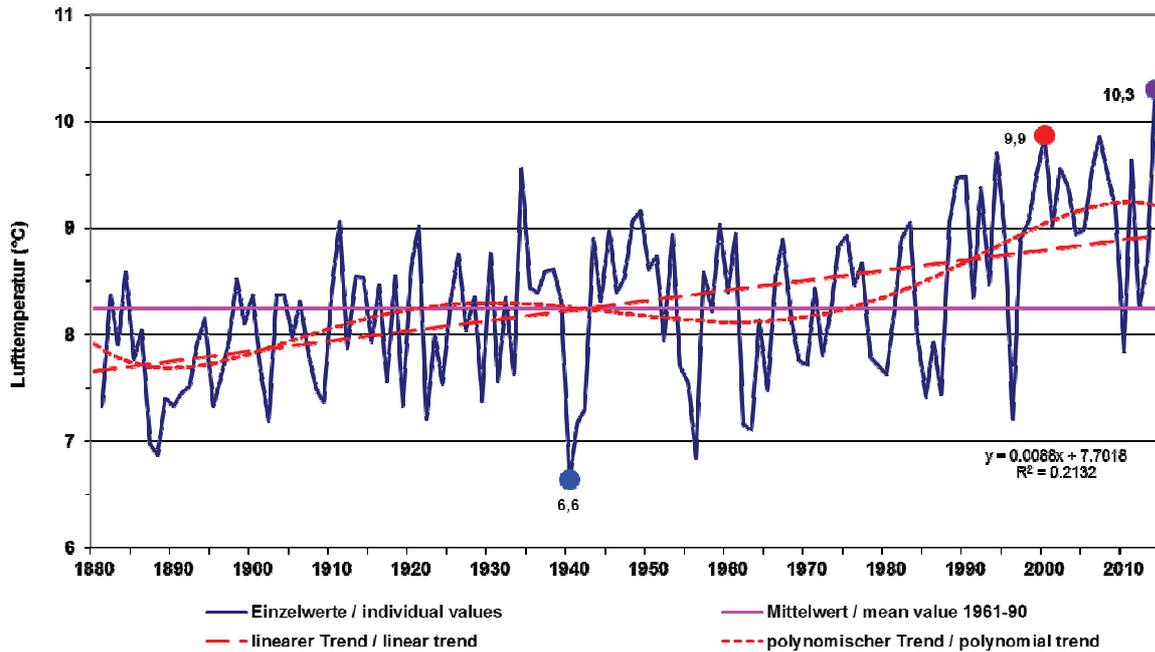


Abbildung 12: Jahresmitteltemperaturen für Deutschland im Zeitraum 1881 – 2015

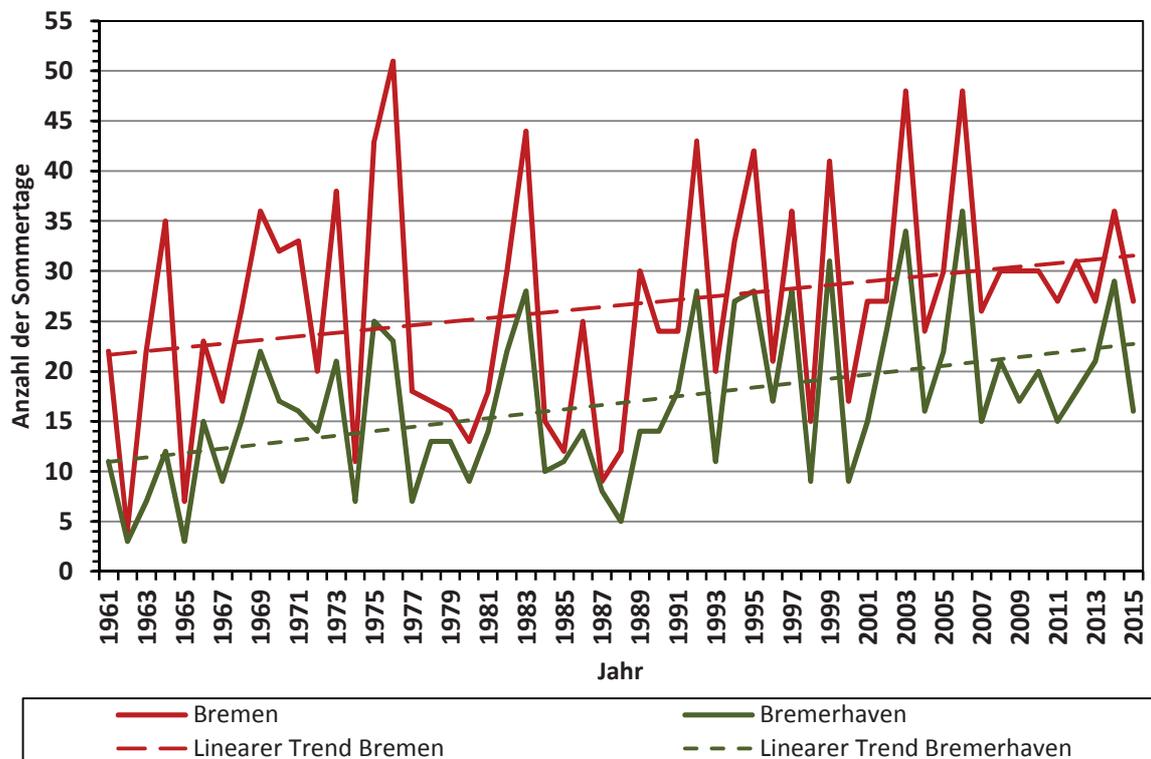


Abbildung 13: Jährliche Anzahl der Sommertage an den Wetterstationen Bremerhaven und Bremen

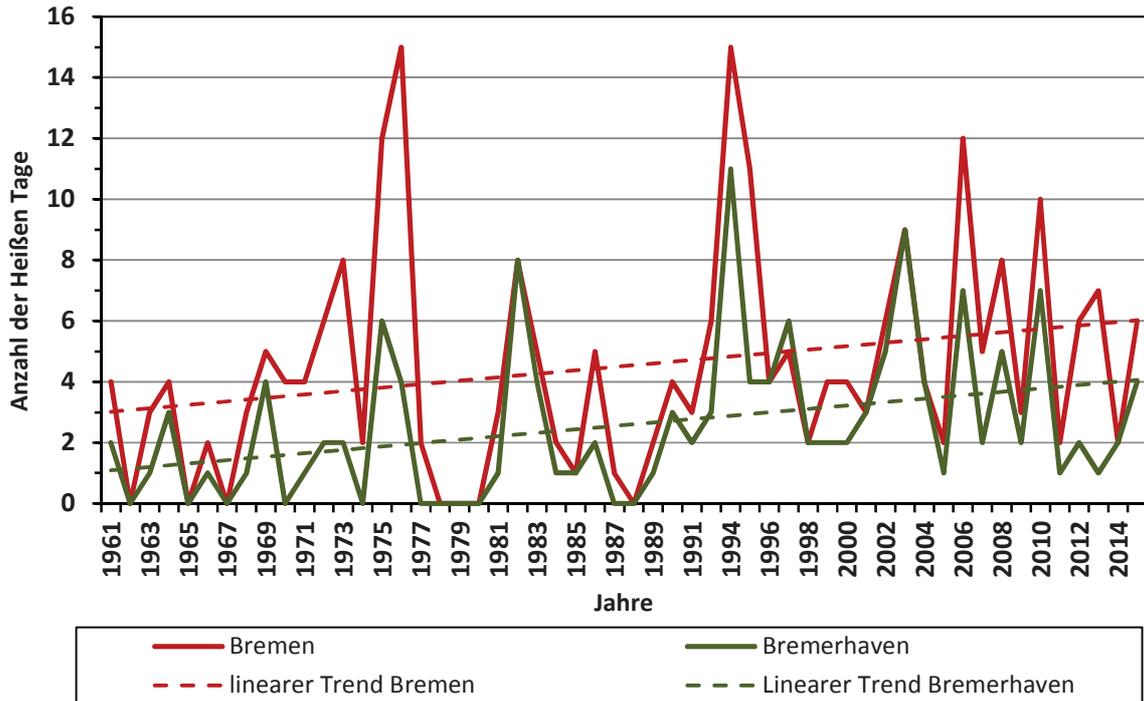


Abbildung 14: Jährliche Anzahl der Heißen Tage an den Wetterstationen Bremerhaven und Bremen

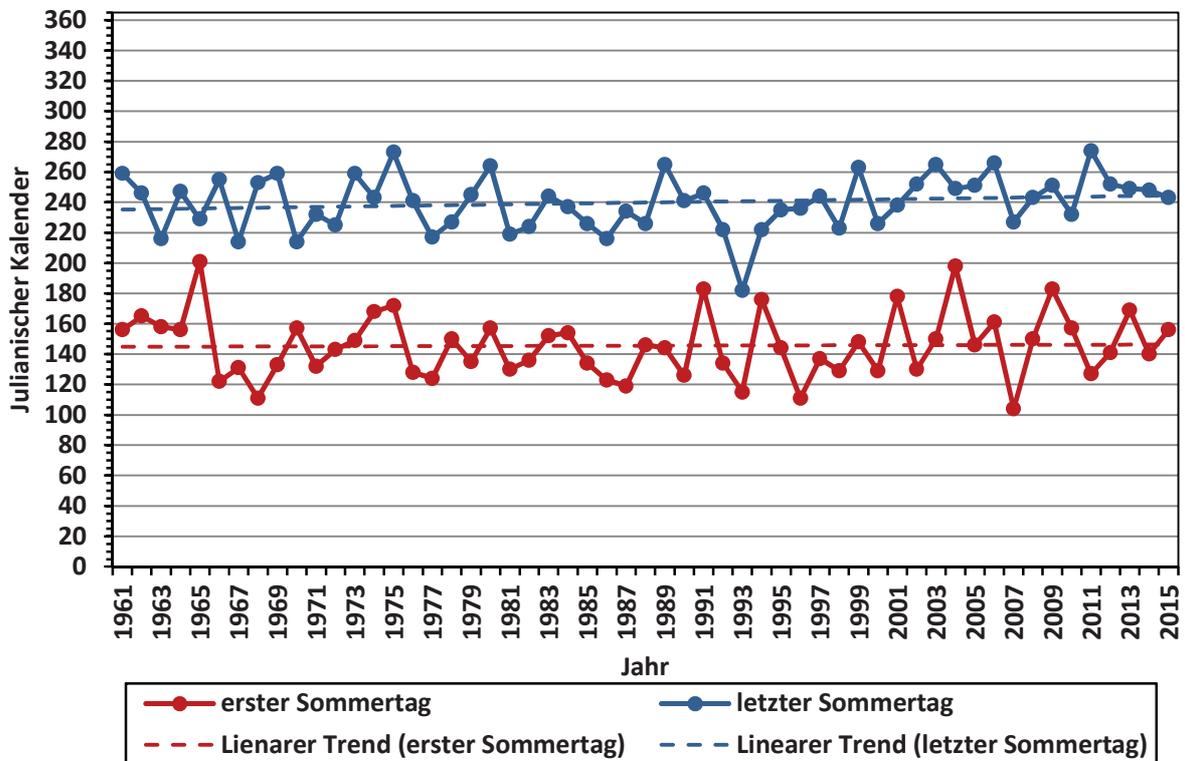


Abbildung 15: Erster und Letzter Sommertag des Jahres an der Wetterstation Bremerhaven

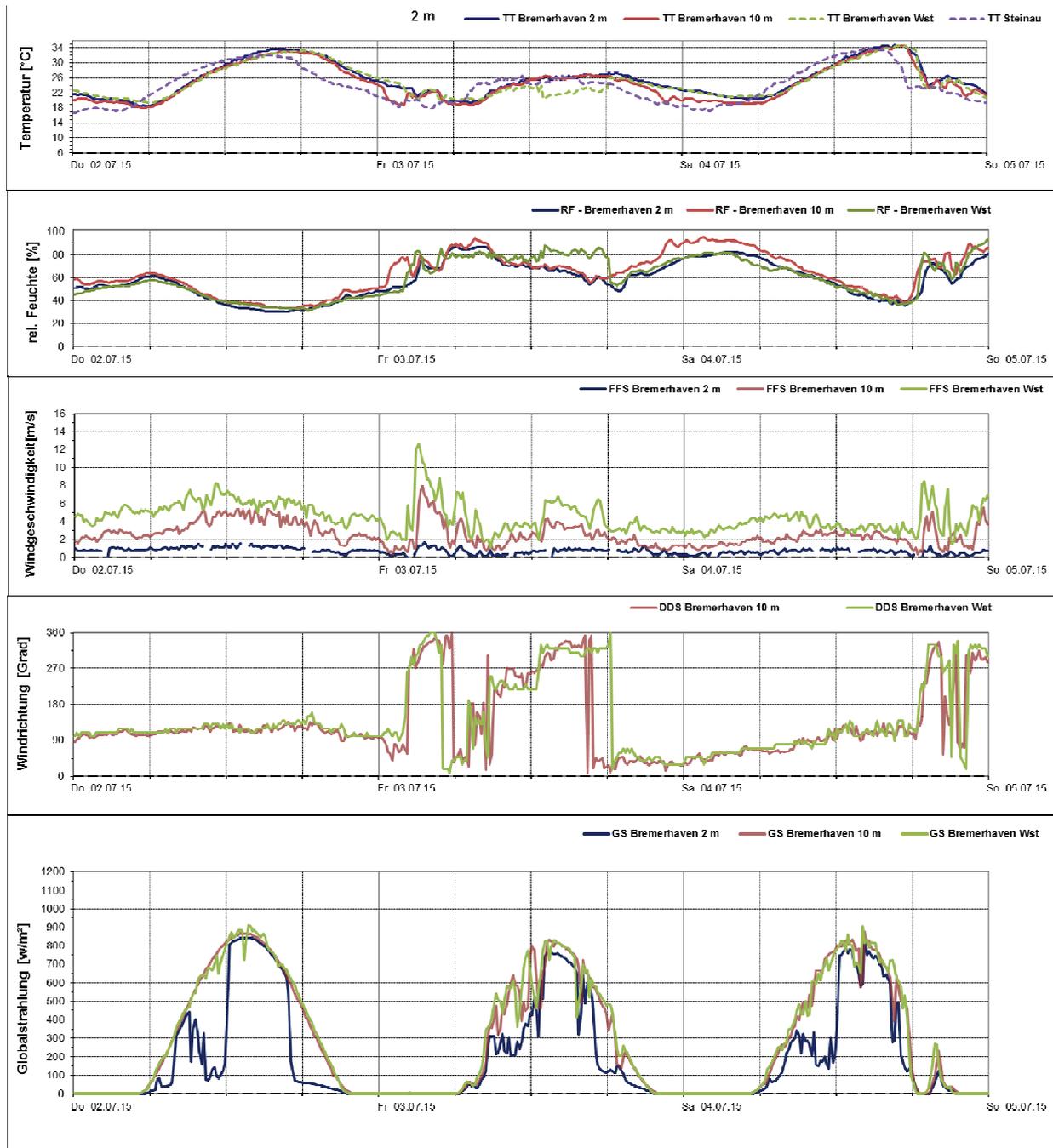


Abbildung 16: Tagesgänge der meteorologischen Parameter (Temperatur, Rel. Feuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Globalstrahlung) vom 02. bis 04.07.2015 in Bremerhaven

(Stadtstation (— Bhv 2m), Umlandstation (— Bhv 10 m), Wetterstation (— Bhv WSt);
zum Vergleich: Temperaturmessungen der Station Steinau - - -)

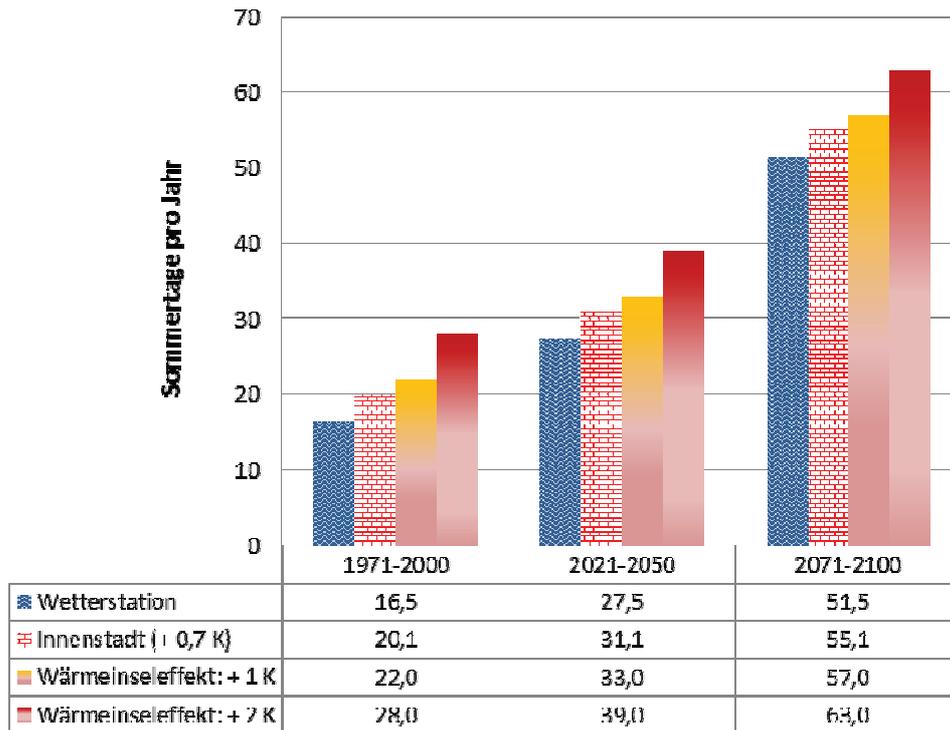


Abbildung 17: Entwicklung der Anzahl der Sommertage in Bremerhaven bezogen auf den Zeitraum 1971 - 2000: Anwendung des gemessenen (+ 0,7 K) und angenommenen (+ 1 K, + 2 K) städtischen Wärmeinseleffektes sowie der Klimaprojektionsrechnungen

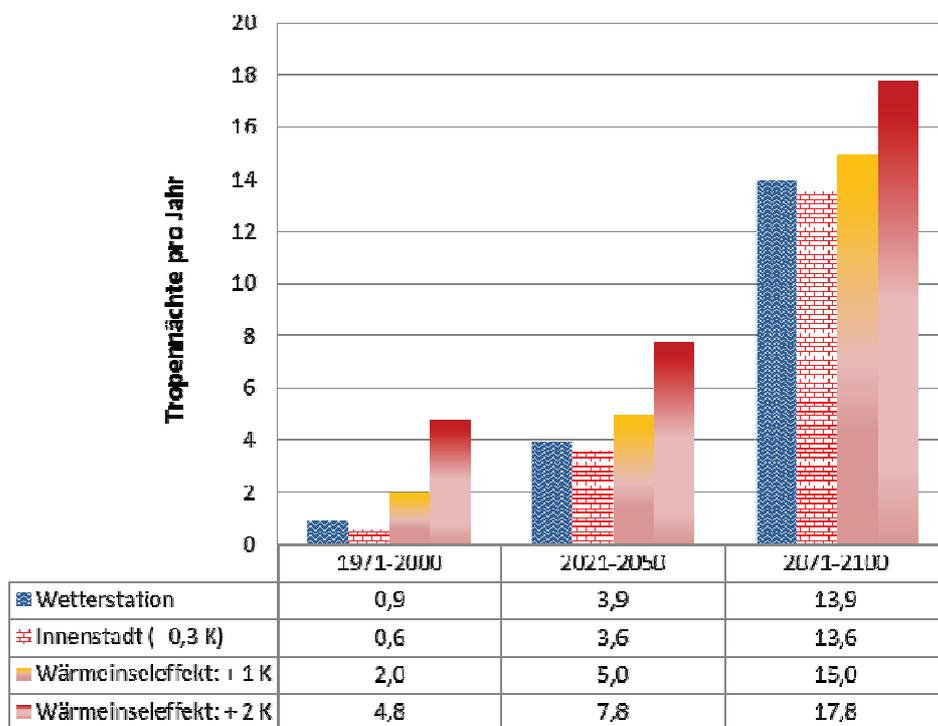


Abbildung 18: Entwicklung der Anzahl der Tropennächte in Bremerhaven bezogen auf den Zeitraum 1971 - 2000: Anwendung des gemessenen (- 0,3 K) und angenommenen (+ 1 K, + 2 K) städtischen Wärmeinseleffektes sowie der Klimaprojektionsrechnungen