

Klimauntersuchung für die Metropolregion Hamburg zur Entwicklung verschiedener meteorologischer Parameter bis zum Jahr 2050

von Kristina Trusilova und Wolfgang Riecke



Berichte des Deutschen Wetterdienstes

Klimauntersuchung für die Metropolregion Hamburg zur Entwicklung verschiedener meteorologischer Parameter bis zum Jahr 2050

von Kristina Trusilova und Wolfgang Riecke

Zitationsvorschlag:

Trusilova, Kristina; Riecke, Wolfgang (Hrsg.: Deutscher Wetterdienst): Klimauntersuchung für die Metropolregion Hamburg zur Entwicklung verschiedener meteorologischer Parameter bis zum Jahr 2050. - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 2015.

(Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 247)

ISSN der Online-Ausgabe: 2194-5969

ISBN: 978-3-88148-486-2

Nutzungsbedingungen:

Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz:



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

Die in den DWD-Berichten veröffentlichten Texte werden allein von ihren jeweiligen Autoren verantwortet; die darin zum Ausdruck gebrachte Meinung entspricht nicht notwendig der Meinung des Herausgebers (Deutscher Wetterdienst).

Fachliche Durchsicht: Dipl.-Met. Marita Roos

Herausgeber und Verlag:

Deutscher Wetterdienst
Fachinformationsstelle und
Deutsche Meteorologische Bibliothek
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach
bibliothek@dwd.de
www.dwd.de

Korrespondenzadresse:

Dr. Kristina Trusilova
Deutscher Wetterdienst
Abt. Klima- und Umweltberatung
Frankfurter Str. 135
63067 Offenbach
Kristina.Trusilova@dwd.de

Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung wurde in Zusammenarbeit mit der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg auf Grundlage der zwischen dem Land Hamburg und dem Deutschen Wetterdienst abgeschlossenen Verwaltungsvereinbarung erstellt. Das Klima und seine zukünftige Entwicklung sind in den letzten Jahren für die Gestaltung eines weiterhin lebenswerten Umfeldes und vor allem auch in Hinsicht eines vorbeugenden Katastrophenschutzes zu einem nachhaltigen Thema geworden. Die Stadt Hamburg hat sich den damit verbundenen Herausforderungen gestellt und der Deutsche Wetterdienst unterstützt sie dabei mit diesem Bericht.

Mit dem Regionalklimamodell COSMO-CLM erfolgten Simulationen für die Stadt Hamburg und seine Umgebung bis zum Jahr 2050. Dabei wurden individuelle Stadtstrukturen in das Modell eingepflegt. Die klimatologischen Auswertungen basieren auf einem Rechengitter von 2,8 km Seitenlänge. In zusätzlichen Episodenrechnungen, die einen besonderen Witterungscharakter berücksichtigen, wurde die Gitterweite auf ca. 140 m verfeinert.

Historisch hat sich in Hamburg das Jahresmittel der Lufttemperatur in den letzten gut hundert Jahren um mehr als 1 Grad erhöht und die Erwärmung wird nach den vorliegenden Simulationen weiter fortschreiten. Mit bis zu 1,2 Grad bis 2050 wird besonders im Herbst eine deutliche Temperaturzunahme erwartet, im Sommer fällt der Anstieg mit bis 0,6 Grad moderater aus. Die Anzahl der Sommertage, der heißen Tage und die der Tropennächte nehmen zu. Umwidmungen von städtischen Freiflächen in versiegelte Flächen können in trockenheißen Sommermonaten zusätzlich zu einem deutlichen Temperaturanstieg führen. Die Aufforstung von Gras- zu Waldflächen lässt die Lufttemperatur in den Sommermonaten unabhängig von den Witterungsbedingungen moderat abnehmen.

In den vergangenen Jahren war vor allem im Winter und im Frühjahr eine Niederschlagszunahme festzustellen. Im Winter setzt sich der Trend fort. Das späte Frühjahr als auch der Herbst werden nach den Modellberechnungen künftig regenreicher. Auch die Anzahl der Starkregentage steigt an.

Die Globalstrahlung (Summe aus direkter und diffuser Sonneneinstrahlung am Boden) hat in den letzten Jahrzehnten vergleichsweise ein hohes Niveau erreicht. Nach den Modellläufen zeigen das Frühjahr, der Sommer und auch der Herbst eine eher abnehmende Tendenz für die Zukunft.

Hinsichtlich der mittleren Windverhältnisse werden sich im Bereich Hamburg kaum Änderungen ergeben. Die Anzahl der Stunden mit Starkwinden über der Deutschen Bucht aus dem für Sturmfluten in Hamburg wichtigen Richtungssektor Nordwest nimmt in der Zeit vom Oktober bis März im Mittel leicht ab, wobei im November eine steigende Häufigkeit der Starkwinde besonders im Küstenbereich möglich ist.

Hamburg wird sich weiterhin auf in Andauer und Intensität zunehmende Hitzeperioden sowie schadenintensive Starkregenfälle einstellen und die Auswirkungen in stadtplanerischer Hinsicht berücksichtigen müssen.

Abstract

The present study was carried out based on an administrative agreement between the Administration for urban development and environment of the Free and Hanseatic City of Hamburg and the German Meteorological Service. Over the last years the future climate change became a persistent issue for designing of the comfortable living environment especially in regard to preventive disaster control. Thereby the city of Hamburg has faced the climate-relevant challenges and the German Meteorological Service supports it with the present report.

Model simulations with the regional climate model COSMO-CLM were carried out for the city of Hamburg and its surroundings till 2050. In doing so individual city structures were included into the model. The climatological analysis is based on a calculation grid of 2.8 km. In additional simulations of selected episodes, which account for particular weather situations, the calculation grid was refined down to 140 m.

Over past hundred years the mean annual temperature in Hamburg increased by more than 1 degree and, according to the performed model simulations, will continue to increase in the future. The temperature is expected to increase by up to 1.2 degree in autumn and by 0.6 degree in summer till 2050. The number of summer days, of hot days and of tropical nights will rise. Conversions of urban free spaces to sealed areas can lead to an additional temperature rise in dry hot summer months. The reforestation provides a moderate cooling in summer under various weather conditions.

An increase in winter and spring precipitation was registered in the past years. In the future, precipitation continues to increase in winter. The model simulations indicate a further precipitation increase in spring, winter and autumn. A number of days with excessive rainfall will rise till 2050.

The total radiation (sum of direct and diffuse solar radiation at the surface) has reached a higher level over the past years. For the future the model simulations show a reduction of total radiation in spring, summer and autumn.

With regard to mean wind in the area of Hamburg, there is barely any change observed in the past. Strong winds from the Northwest direction cause storm floods in the German Bay. The average frequency of these winds from October to March reduces slightly, whereas in November an increased frequency of strong winds in the coastal zone is possible.

Furthermore, intensifying heat waves and strong rain falls will occur in Hamburg; these factors will have to be considered in the conception of city planning.

Inhalt

Zusammenfassung	3
Abstract	4
Inhalt.....	5
1 Einleitung	7
2 Geografische Gliederung der Metropolregion Hamburg.....	8
3 Das Klima in der Metropolregion Hamburg.....	10
4 Änderungen der Wetterlagen.....	11
5 Messnetz des Deutschen Wetterdienstes	12
6 Methodik und Daten	13
6.1 Darstellung der historischen Entwicklung.....	13
6.2 Klimaprojektionen.....	13
6.3 Modellkette (global - regional - lokal)	14
6.4 Modellrechnungen.....	16
6.4.1 Zeitperioden.....	16
6.4.2 Modellgebiete.....	17
7 Ergebnisse.....	19
7.1 Darstellung	19
7.2 Temperatur	20
7.2.1 Historische Entwicklung	20
7.2.2 Analyse der Modellsimulationen für „Norddeutschland“	22
7.2.3 Sommertage, heiße Tage, Tropennächte	27
7.2.4 Episodenrechnungen für „Hamburg“	30
7.2.5 Kurzfassung der Ergebnisse für die Klimavariablen Lufttemperatur.....	35
7.3 Niederschlag.....	36
7.3.1 Historische Entwicklung.....	36
7.3.2 Analyse der Modellsimulationen für „Norddeutschland“	38
7.3.3 Starkniederschlag.....	43
7.3.4 Kurzfassung der Ergebnisse für die Klimavariablen Niederschlag	47
7.4 Strahlung (Globalstrahlung)	48
7.4.1 Historische Entwicklung.....	48
7.4.2 Analyse der Modellsimulationen für „Norddeutschland“	50
7.4.3 Kurzfassung der Ergebnisse für die Klimavariablen Globalstrahlung	54
7.5 Wind	55
7.5.1 Historische Entwicklung.....	55
7.5.2 Analyse der Modellsimulationen für „Norddeutschland“	56
7.5.3 Kurzfassung der Ergebnisse für die Klimavariablen Wind	61
8 Interpretation	62
8.1 Grenzen der Modellierung.....	62

9 Schlussbemerkung	63
Anhang A. Das regionale Klimamodell COSMO-CLM	64
Anhang B. Physikalische Parametrisierungen in Klimamodellen auf unterschiedlichen Gitterweiten	65
Anhang C. Die Stadtparametrisierung	66
Literaturverzeichnis	68

1 Einleitung

Das Klima einer Stadt unterscheidet sich merklich von dem des freien ländlichen Umfeldes (KUTLER, W. 2009, LANDSBERG, H. E. 1981, SCHLÜNZEN, K. H. et al. 2009). In diesem Zusammenhang ist u.a. die Bildung einer städtischen Wärmeinsel bekannt, die durch die dichte Bebauung und den gegenüber dem Umland höheren Energieumsatz von Verkehr, Wirtschaft und Haushalten verursacht wird. Neben der damit verbundenen verstärkten Wärmebelastung für die Bevölkerung haben erhöhte Lufttemperaturen ebenfalls Einfluss auf konvektive Niederschlagsereignisse. Aber auch die Windverhältnisse werden durch eine geänderte Bodenrauigkeit nachhaltig modifiziert.

Es ist seit langen Jahren Ziel der Städte diese stadtklimatischen Besonderheiten bei ihren Bauplanungen mit zu berücksichtigen. Unter dem Aspekt des bestehenden Klimawandels gewinnt deren Berücksichtigung für eine lebenswerte Umgebung nochmals an Wichtigkeit. Die Freie und Hansestadt stellt sich dieser Herausforderung. Mit dem 2013 von der Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg verabschiedeten Aktionsplan Anpassung an den Klimawandel wird u.a. mit dem Handlungsfeld „Stadt- und Landschaftsplanung“ der Bedeutung Rechnung getragen (HAMBURG, B. D. F. U. H. 2013). Das niedergelegte Ziel ist neben anderen „...eine klimagerechte Stadtentwicklung, Flächensicherung sowie Erhalt, Sicherung und Entwicklung von Grün- und Freiflächen, Erhalt eines vitalen Baumbestandes sowie Stärkung des Leitbildes „Grüne Metropole“. ...“

Mit der vorliegenden Untersuchung unterstützt der Deutsche Wetterdienst (DWD) die Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg in der Quantifizierung der bisherigen klimawandelbedingten Änderungssignale sowie der zukünftigen Klimaentwicklung bis 2050. Grundlage zu dieser Zusammenarbeit bildet die im September 2011 zwischen der Freien und Hansestadt Hamburg und dem Deutschen Wetterdienst geschlossene Verwaltungsvereinbarung. Die Modellsimulationen wurden vom Zentralen Klimabüro des DWD in Offenbach durchgeführt, Projektbetreuung und Darstellung der historischen Klimaentwicklung oblagen dem Regionalen Klimabüro Hamburg.

Die Simulation des Klimas in Hamburg und seiner Umgebung erfolgt mit dem Regionalklimamodell COSMO-CLM (engl.: Consortium for Small-scale Modeling - Climate Limited-area Model, siehe „Anhang A. Das regionale Klimamodell COSMO-CLM“). Dieses Modell ist ursprünglich ein Wettervorhersagemodell des DWD, das für spezielle Klimaanwendungen von verschiedenen Nutzern der CLM-Community (engl.: Climate Limited-area Modelling-Community, www.clm-community.eu) entsprechend angepasst wurde. Im Rahmen dieser Kooperation wird eine neuartige Stadtparametrisierung in das Modell implementiert und für Hamburg angewandt. Es ist damit u.a. in der Lage dynamische Prozesse in der Wechselwirkung zwischen Stadt und Umland einschließlich der konvektiven Prozesse abzubilden. Um die Aussagen zum Klimawandel für die Metropolregion Hamburg zu erzielen, müssen mehrere Modellläufe durchgeführt werden, einerseits in unterschiedlichen Skalen und andererseits für verschiedene Zeiträume. Nach einem Modelllauf auf einem 12 km Gitter für den Ausschnitt Europa und angrenzende Gebiete werden die Ergebnisse für Norddeutschland auf eine Maschenweite von 2,8 km verfeinert. Es erfolgt eine Evaluierung des Modells anhand aktueller Stationsmessungen für den Zeitraum 1989-2008. Nachdem auf die Zeitspanne 1971-2000 bezogenen Kontrolllauf erfolgt die Projektionsrechnung für die Zeitscheibe 2021-2050. Die Ergebnisse werden nach Jahreszeiten aufgeschlüsselt. Zum Ende werden sogenannte Episodenrechnungen vorgenommen, in denen für eine Gittermaschenweite von 140 m für die Eingangsdaten eines heißen und eines regenreichen Sommermonats die Änderungen durch sich ändernde Landnutzungsstrukturen abgebildet werden.

In den nachfolgenden Kapiteln wird zunächst auf grundlegende Informationen wie die Metropolregion Hamburg, auf das Stationsnetz des Deutschen Wetterdienstes und die verwendeten Modelle und Methoden eingegangen. Im Anschluss werden die meteorologischen Parameter Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung und Wind abschnittsweise näher betrachtet, wobei die historische als auch die zukünftig projizierte Entwicklung zusammenhängend dargestellt werden. In den Darstellungen wird zwischen „Metropolregion Hamburg“, auch Teile der an Hamburg angrenzenden Bundesländer berücksichtigend, und „Hamburg“, lediglich das Stadtgebiet betrachtend, unterschieden.

2 Geografische Gliederung der Metropolregion Hamburg

Bei einer Metropolregion handelt es sich um einen stark verdichteten Großstadtraum, der als Motor der sozialen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklung eines Landes angesehen werden kann. Sie umfasst auch große ländliche Bereiche, die mit dem Oberzentrum durch Wirtschaft, Pendlerströme etc. eng verflochten ist.

Die Metropolregion Hamburg (Abb. 1) gehört naturräumlich dem norddeutschen Tiefland an. Sie erstreckt sich beidseitig der Unterelbe von der Wesermarsch im Westen bis zur Mecklenburgischen Seenplatte im Osten. Flache, fruchtbare Marschen und sandige, wellige mit Seen durchsetzte Geestgebiete bestimmen das Bild. Die Landschaft entstand in der Abfolge von Eis- und Warmzeiten der jüngsten Erdgeschichte, während des Tertiärs und Quartärs. Wasser und Eis formten durch Erosion, Transport und Ablagerung die Oberfläche. Doch auch der Wind hinterließ sichtbare Spuren. Auf der Leeseite des Elbtales, also im Osten und Südosten wehte er den Sand zu Dünen vor dem Geestrand auf.



Abb. 1. Metropolregion Hamburg.

Schmelzwasser des eiszeitlichen Inlandeises wurde am Gletscherrand zur Nordsee geführt und bildete das Urstromtal der Elbe. Während die Elbe oberhalb von Geesthacht im Bereich der Elbtalniederung tideunabhängig ist, ist sie in der stromabwärts anschließenden Unterelbeniederung dem Wechsel der Gezeiten ausgesetzt. Zwischen Geesthacht und Hamburg-Bergedorf sowie von Hamburg St. Pauli bis nach Rissen hat das Elbufer mit einem ca. 50 m hohen Geestrand auch heute noch den ursprünglichen Verlauf. Im Hamburger Stadtbereich teilt sich die Elbe in Norder- und Süderelbe, die den größten Teil des Hafengebietes sowie die auf den Inseln entstandenen Stadtteile Wilhelmsburg und Veddel umschließen und sich nach ca. 15 km beim Köhlbrand wieder vereinigen. Das hafentechnisch ausgebaute Stromspaltungsgebiet ist ein sogenanntes Binnendelta. Hier teilt sich der Fluss früher im Gezeitenstau zwischen unzähligen Inseln und Sänden vielarmig auf, um sich dann im breiten Trichter (Ästuar) wieder zu sammeln und der Nordsee

zuzufließen. Das Ästuar ist von Blankenese bis Brunsbüttel zwischen 1 und 2,5 km breit und weitet sich zwischen Brunsbüttel und Cuxhaven auf zuletzt etwa 15 km.

Im Bereich des Urstromtals der Elbe befinden sich die Elbmarschen. Dieses flache, sehr fruchtbare Gebiet wird außerhalb der Stadt von Grünland geprägt. Die „Vier- und Marschlande“ bei Hamburg gehören zu den bedeutendsten Anbaugebieten für Gemüse und Blumen; das sich stromabwärts an das Hamburger Hafengebiet anschließende „Alte Land“ ist eines der größten Obstanbaugebiete Mitteleuropas. Im Elbmündungsbereich grenzt die Metropolregion an die Schleswig-Holsteinischen Marschen und die Wesermarschen sowie an den Nationalpark Wattenmeer mit den Inseln Scharhörn und Neuwerk, die politisch zur Stadt Hamburg gehören.

Im Norden schließt sich an die Elbmarschen die Schleswig Holsteinische Geest an. Die Oberflächengestalt dieser Altmoränenlandschaft ist deutlich verwittert und nivelliert. Wiesen- und Weideland, aber auch Moore prägen die Landschaft. Sehr viel bewegter ist das Gelände in der sich ostwärts anschließenden Jungmoränenlandschaft des Schleswig Holsteinischen Hügellandes und der Mecklenburgischen Seenplatte mit ausgedehnten Weide- und Waldflächen sowie zahlreichen Seen. Durch den Naturpark Lauenburgische Seen verläuft die Wasserscheide von Nord- und Ostsee. Südlich des Elburstromtals erstrecken sich die Endmoränenzüge der nördlichen Lüneburger Heide mit ihrer hügeligen Wald-, Heide- und Ackerlandschaft. Sie fallen mit einem deutlich ausgeprägten Stufenrand zum Elbtal ab. Das Gebiet ist durch sämtliche nach Norden zur Elbe hin entwässernden Flüsse wie Seeve, Aue, Luhe stark zerschnitten. Die dazwischen liegenden Erhebungen sind bewaldet und nur wenig besiedelt. Mit 155 m Höhe über NN befindet sich hier der höchste Berg der Metropolregion. Nordwestlich schließt sich die Stader Geest mit Wiesen, Weiden, Getreideflächen und Mooren an.

Hamburg selbst liegt im Bereich des Stromspaltungsgebietes der Elbe mit seinen tiefliegenden Marschenflächen und angrenzenden Geestgebieten etwa 100 km südöstlich der Elbmündung in die Nordsee. Der Fluss verläuft im Osten auf etwa 3 m über NN und fällt dann bis zur westlichen Landesgrenze auf nahezu Meeresniveau ab. Der elbnahe Bereich („Altes Land“ im Südwesten und „Vierlande“ im südöstlichen Teil Hamburgs) befindet sich in einer ähnlichen Höhenlage und ist orografisch wenig gegliedert. Die Landnutzung ist durch kleinere Ortschaften sowie, wie bereits erwähnt, durch verbreiteten Gemüse- und Obstanbau geprägt und besitzt überwiegend Freiflächencharakter.

Dieser Elbmarschenbereich wird im Süden durch die Harburger Berge (Schwarze Berge und Harburger Hügelland) begrenzt, die auf einigen Kuppenlagen Geländehöhen von mehr als 100 m über NN erreichen. Auch im Nordwesten Hamburgs ist das Gelände stärker orografisch gegliedert. So erhebt sich unmittelbar am nördlichen Elbufer das Hochplateau des Falkensteins mit Höhenlagen bis zu 93 m über NN. Beide Regionen sind überwiegend bewaldet oder besiedelt, wobei die größten geschlossenen Waldflächen in den höheren Lagen der Harburger Berge zu finden sind.

Der großstädtisch geprägte Bereich Hamburgs liegt beiderseits der Binnen- und Außenalster und erstreckt sich weit nach Norden. Die zum Teil sehr dichte Stadtbebauung wird durch einzelne Freiflächen wie z.B. dem Hamburger Flughafen, dem Friedhof Ohlsdorf, dem Stadtpark, dem Niendorfer Gehege oder dem Altonaer Volkspark großflächig aufgelockert. Kleinere Waldgebiete häufen sich im Bereich des Duvenstedter Brooks und um den Stadtteil Volksdorf. Die Orografie in diesem nördlich der Elbe gelegenen Teil Hamburgs ist geprägt durch das vom Strom auf etwa 18 m über NN ansteigende Alstertal und seine Nebentäler. Sonst besitzt die Landschaft einen welligen und hügeligen Charakter, wobei westlich der Alster Geländehöhen von 40 m über NN erreicht werden, während im Osten Höhen bis zu 60 m über NN auftreten. Die Stadt Hamburg weist eine Gesamtfläche von 755 km² auf, wobei 454 (60 %) auf Siedlungs- und Verkehrsflächen einschließlich Erholungsflächen von 59 km² entfallen. Landwirtschaftlich genutzte Flächen umfassen 186 km², während Waldflächen einen Anteil von gut 6 % entsprechend 48 km² haben. Wasserflächen machen in Hamburg 8 % bzw. 61 km² der Stadtfläche aus.

3 Das Klima in der Metropolregion Hamburg

Entsprechend der Lage der Metropolregion Hamburg in den durch vorherrschende westliche Winde gekennzeichneten mittleren Breiten kommt es in diesem Gebiet - wie in ganz Norddeutschland - zu kühleren Sommern und milden Wintern sowie ausreichendem Niederschlag zu allen Jahreszeiten. Der häufige Wechsel von Tief- und Hochdruckgebieten sorgt für einen unbeständigen Charakter des Wetters. Stellt sich einmal eine längere Phase mit Hochdruckeinfluss ein, so ist im Sommerhalbjahr mit trockenen und warmen Wetter zu rechnen, während sich im Winter je nach Lage des Hochs trocken kaltes bzw. neblig trübes Wetter einstellt. Die besondere Lage der Region nahe von Nord- und Ostsee führt zu einem maritim geprägten Klima mit gedämpften Tages- und Jahresgängen vieler meteorologischer Parameter.

Die Lufttemperaturen in der Standardmesshöhe von 2 m über Grund variieren im vieljährigen Jahresmittel in der Metropolregion Hamburg zwischen etwa 8,0 und 9,5 °C. Dabei weisen im Jahresgang der Juli bzw. August die höchsten mittleren Monatswerte um 17 °C auf. Dem stehen tiefste mittlere Monatswerte im Januar und Februar von um 1 °C gegenüber. Lediglich im Küstenbereich fallen die winterlichen Werte milder aus. Mittlere Tageshöchsttemperaturen erreichen im Sommer bis gut 23 °C, im Winter gehen die mittleren Tagestiefsttemperaturen bis auf minus 2 °C zurück.

Die Niederschläge weisen in der betrachteten Region mit mittleren Jahressummen von gut 500 mm im Südosten und bis zu 1000 mm im Nordwesten eine beträchtliche Spanne auf. Generell ist im Mittel der Februar mit 30 – 45 mm der niederschlagsärmste Monat. Hohe Niederschlagssummen mit bis zum 2-fachen des Februarwertes sind in den Monaten November und Dezember sowie auch in den Sommermonaten festzustellen. Allerdings verteilen sich die Niederschläge im Sommer auf eine geringere Anzahl von Niederschlagstagen, d.h. die Niederschlagsintensität pro Regenereignis fällt im Sommer höher aus.

Die mittleren Jahressummen der Sonnenscheindauer weisen an den Küsten ihr Maximum auf. Dort werden Werte von um 1700 Stunden erreicht. Lediglich um 1500 Stunden sind es im Südwesten der Metropolregion.

Nähere Einzelheiten zum Klima in der Metropolregion Hamburg werden beschrieben im Bericht des Deutschen Wetterdienstes Nr. 234 „Das Klima in Hamburg: Entwicklung in Hamburg und in der Metropolregion“ (RIECKE, W., UND ROSENHAGEN, G. 2010) sowie im „Klimabericht für die Metropolregion Hamburg“ (VON STORCH, H., UND CLAUSSEN, M. 2011).

4 Änderungen der Wetterlagen

Die großräumige Druckverteilung ist prägend für das Wetter- und Klimageschehen in einer Region. Die räumliche Verteilung (Lage) von Tief- und Hochdruckgebieten wird in der Meteorologie über charakterisierende Wetterlagen klassifiziert. Die verschiedenen Wetterlagen sind mit einem besonderen Wettergeschehen verbunden. Beobachtungen und Klimasimulationen lassen in der Vergangenheit und auch in der Zukunft Änderungen in den Häufigkeiten der Wetterlagen erkennen. Die Kenntnis darüber ist von grundlegender Bedeutung für Aussagen zum zukünftigen Klima (RIEDIGER, U. 2013, RIEDIGER, U. UND A. GRATZKI 2014).

Derzeit lässt sich in Mitteleuropa eine Verlagerung der Hauptwindzone und der typischen Drucksysteme nach Norden erkennen. Die in unseren Breiten vorherrschende Westwindzone ist davon ein Teil. Viele Klimaprojektionen lassen den Anteil der bereits recht häufig auftretenden Südwest- und Nordwestwetterlagen weiter zunehmen. Dadurch ist mit einem Zuwachs an Westwinden sowie hohen Windgeschwindigkeiten und auch Stürmen zu rechnen. Die Winter werden milder sowie niederschlagsreicher. Gleichzeitig nimmt die Häufigkeit des Zustroms kalter Luft aus nördlichen Richtungen ab.

Von besonderem Belang für das Wettergeschehen in Mitteleuropa ist die Wetterlage mit einem Tief über dem zentralen Mitteleuropa. Sie zeichnet sich meist durch eine wolken- und niederschlagsreiche Witterung aus. Hebungsprozesse fördern die atmosphärische Labilität, zusammen mit einer sehr hohen Luftfeuchtigkeit besteht sommers wie winters eine verstärkte Neigung zu Starkniederschlägen. Für diese Wetterlagenklasse wird von den Klimaprojektionen vermehrt von einer Zunahme ausgegangen.

Insbesondere für den Winter ergeben sich für die ebenfalls niederschlagsreichen zyklonalen (Tiefdruckeinfluss) Südwestwetterlagen ein deutlicher Anstieg. In feuchtmilder Luft können sich durchaus ergiebige Niederschläge entwickeln. In den Sommermonaten ist eher von einem Rückgang dieser Wetterlage auszugehen.

Hinsichtlich sommerlicher, trockene und auch extreme Hitze verursachender Hochdruckgebiete lässt sich für die Zukunft keine klare Entwicklung erkennen. Derartige Wetterlagen bilden die Klimaprojektionen nur teilweise ab.

Tendenziell werden insbesondere die Winter milder und nasser, wobei auch Starkregenereignisse zunehmen werden. Die Sommer neigen eher zu mehr Trockenheit.

5 Messnetz des Deutschen Wetterdienstes

Ein umfangreiches, über viele Jahrzehnte betriebenes meteorologisches Messnetz ist die Voraussetzung, um das Klima, seine Entwicklung und die Variabilität zu erfassen. Es bleibt auch zukünftig von besonderer Bedeutung, um zum Beispiel im Rahmen eines Klimafolgenmonitorings getroffene Maßnahmen zum Klimaschutz oder zur Anpassung bewerten zu können. Der Deutsche Wetterdienst unterhält derzeit rund 180 hauptamtliche Wetterwarten und Wetterstationen. Davon sind 13 Stationen zu so genannten Klimareferenzstationen mit höheren Anforderungen an Kontinuität, Messsensorik etc. erhoben worden. Verdichtet wird dieses Netz durch weitere ca. 1800 ehrenamtliche Messstationen. An 9 Orten in Deutschland wird die Atmosphäre täglich zweimal vertikal sondiert. Die Aufzeichnung der Niederschlagsereignisse mittels 17 im Bundesgebiet installierter Radargeräte hat hinsichtlich der Verteilung von Starkregenereignissen eine besondere Wichtigkeit erlangt. Zunehmend gewinnen Satelliten in der Klimaüberwachung an Bedeutung. Die Bodenmessungen reichen vielfach 100 Jahre und mancherorts auch deutlich länger zurück.

Die Abb. 2 zeigt Stationen des Deutschen Wetterdienstes in der Metropolregion Hamburg, die für die weiteren Betrachtungen herangezogen wurden.

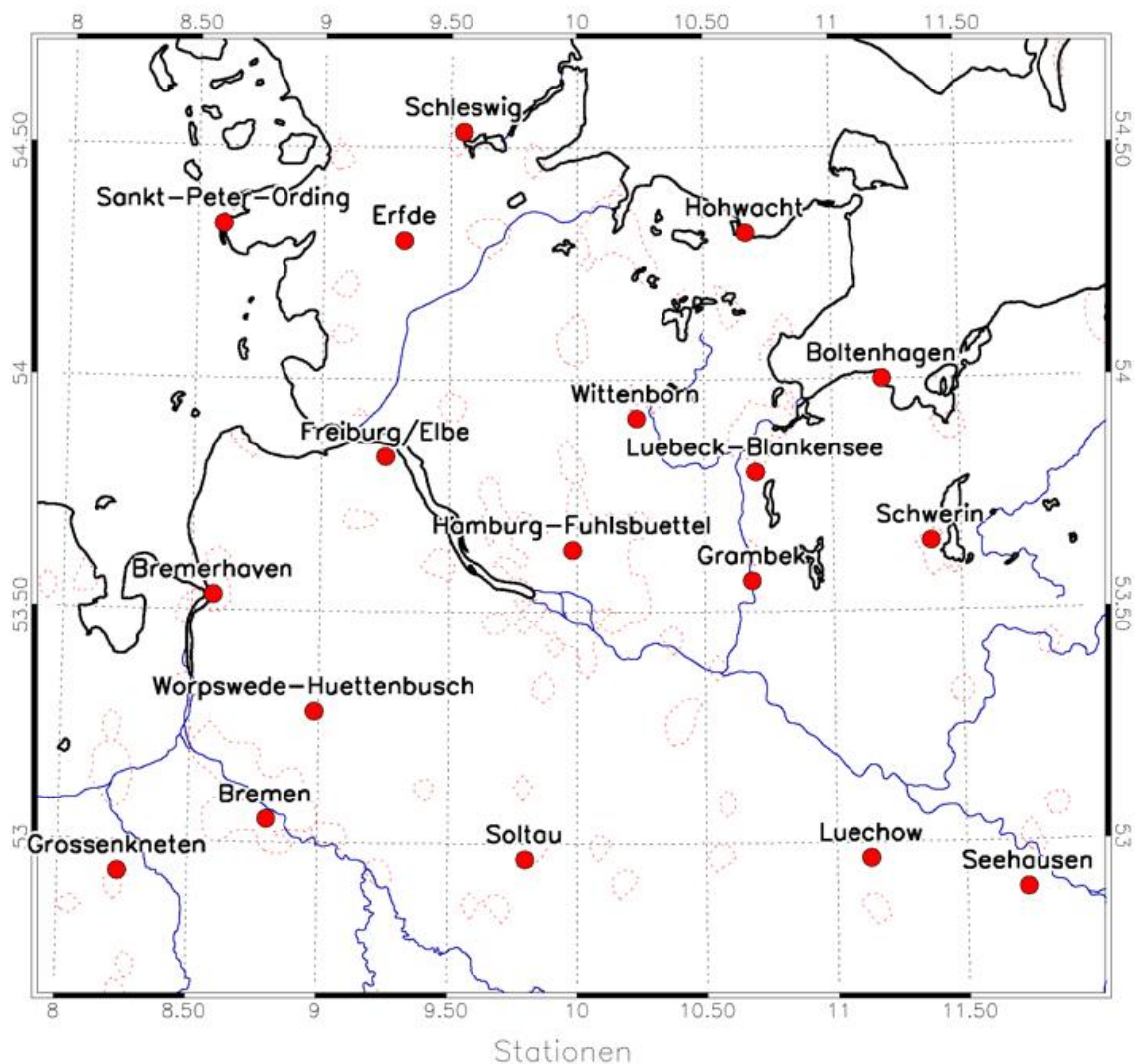


Abb. 2. Meteorologische Stationen des DWD, die für die Evaluierung der Modellergebnisse verwendet werden. Rote Strichlinien zeigen Grenzen von Siedlungen, wie sie im Modell COMSO-CLM dargestellt werden.

6 Methodik und Daten

6.1 Darstellung der historischen Entwicklung

Bei der Betrachtung langzeitiger Klimaentwicklungen ist man auf möglichst jahrzehntelange Zeitreihen der betrachteten Klimaparameter angewiesen. Einige meteorologischen Elemente weisen eine lange „Messkultur“ auf, wie z.B. die Temperatur und der Niederschlag, andere werden vergleichsweise erst kurz aufgezeichnet, so die Strahlung. Die Darstellung einer langfristigen Entwicklung setzt die Notwendigkeit voraus, eine homogene Zeitreihe zu interpretieren. Allerdings wird eine derartige lange Reihe nur in äußerst seltenen Fällen angetroffen. Andererseits reagieren die verschiedenen meteorologischen Parameter unterschiedlich deutlich auf z.B. Umgebungsänderungen bei einer Standortverlegung der Station. Der Niederschlag und die Temperatur können bereits bei geringen Änderungen markante Unstetigkeiten aufweisen, während die Globalstrahlung etwas „gutmütiger“ reagiert.

Aus diesem Grund wird bei der Darstellung der historischen Entwicklung neben der stationsbezogenen Betrachtung auf Gebietsmittel zurückgegriffen. Ein Gebietsmittel hat den Vorteil, dass bei der Betrachtung viele Stationen über eine ausgedehnte Fläche berücksichtigt werden und mögliche Veränderungen einer einzelnen Station „geglättet“ werden. So werden die punktuellen Stationswerte mittels eines geeigneten Interpolationsverfahrens auf ein Deutschland abdeckendes Rasterfeld mit 1 km Seitenlänge übertragen. Allerdings bringt eine einfache räumliche Interpolation keinen befriedigenden Erfolg, so dass darüber hinaus die Korrelation der klimatologischen Parameter mit der Topografie über Regressionsfunktionen berücksichtigt wird (MÜLLER-WESTERMEIER, G. 1995). Gemittelt wird im vorliegenden Fall über alle 1 km² Rasterzellen, die innerhalb der Verwaltungsgrenzen der Bundesländer bzw. des Bundeslandes Hamburg liegen. Diese, auf den Stationsmessungen des DWD gestützten Flächenmittelwerte werden im folgenden Text als Messdaten bezeichnet.

6.2 Klimaprojektionen

Numerische Klimamodelle wie auch Modelle der Wettervorhersage berechnen die physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre. Wegen der verschiedenen Zeitspannen, die sie umfassen, werden sie aber unterschiedlich „angetrieben“. Wettervorhersagemodelle brauchen eine sehr präzise Eingabe des Ist Zustands der Atmosphäre, um das Wetter in den kommenden Tagen vorherzusagen. Für Klimamodelle sind dagegen langfristige Veränderungen der Atmosphäre entscheidend, etwa steigende Treibhausgas-Konzentrationen. Die Entwicklung der weltweiten Treibhausgasemissionen wurde bisher in Abhängigkeit unterschiedlicher Möglichkeiten der wirtschaftlichen Entwicklung der Erde beschrieben. Wegen der Ungewissheit über die tatsächliche zukünftige Entwicklung wird bei den Modellergebnissen von Klimaprojektionen gesprochen. Neuerdings folgen die Szenarien einer festgelegten Treibhausgaskonzentration, dem so genannten repräsentativen Konzentrationspfad RCP (engl.: Representative Concentration Pathway). Im Unterschied zur alten Vorgehensweise werden erst nachträglich die sozioökonomischen Entwicklungen an die zu erreichende Konzentration angepasst.

Die zukünftigen Abschätzungen der globalen Klimaänderung werden in Sachstandsberichten (IPCC 2007, IPCC 2013) durch den Weltklimarat IPCC (engl.: Intergovernmental Panel on Climate Change, www.ipcc.ch) zusammengefasst. Die Klimaänderungssignale für die Zeiträume bis 2050 und 2100 werden hierbei durch globale Erdsystemmodelle berechnet, die die Szenarien der für den Klimawandel verantwortlichen Strahlungsantriebe und Treibhausgase sowie die langfristigen Rückkopplungen zwischen der Atmosphäre und den Ozeanen berücksichtigen.

Für die vorliegende Studie wurde das RCP4.5 Szenario (IPCC 2013) verwendet. Das Szenario RCP4.5 entspricht einer moderaten wirtschaftlichen Entwicklung, ist ressourcenschonend orientiert und weist Erfolge in der Klimapolitik aus, sodass die Erwärmung im Vergleich zu den anderen RCP Szenarien im Mittel liegt. In diesem „mittleren“ Szenario erreicht die Erwärmung im Jahr 2100 2,6 °C gegenüber dem vorindustriellen Wert.

6.3 Modellkette (global - regional - lokal)

Anhand der IPCC Emissionsszenarien berechnen globale Erdsystemmodelle die Klimaänderungssignale. Die globalen Erdsystemmodelle haben meistens eine geringe räumliche Auflösung (Rechengitterweite) von etwa 200 km und mehr. Für die städtischen Fragestellungen müssen deren Ergebnisse mit Hilfe anderer Modelle herunterskaliert werden. Aufgrund des Skalenunterschieds (von ca. 200 km hinab zu ca. 100 m) wird die Herunterskalierung in mehreren Schritten vorgenommen; dabei werden die Ergebnisse der Simulation aus der größeren Skala jeweils als Eingabedaten für die Simulation der feineren Skala benutzt (Abb. 3).

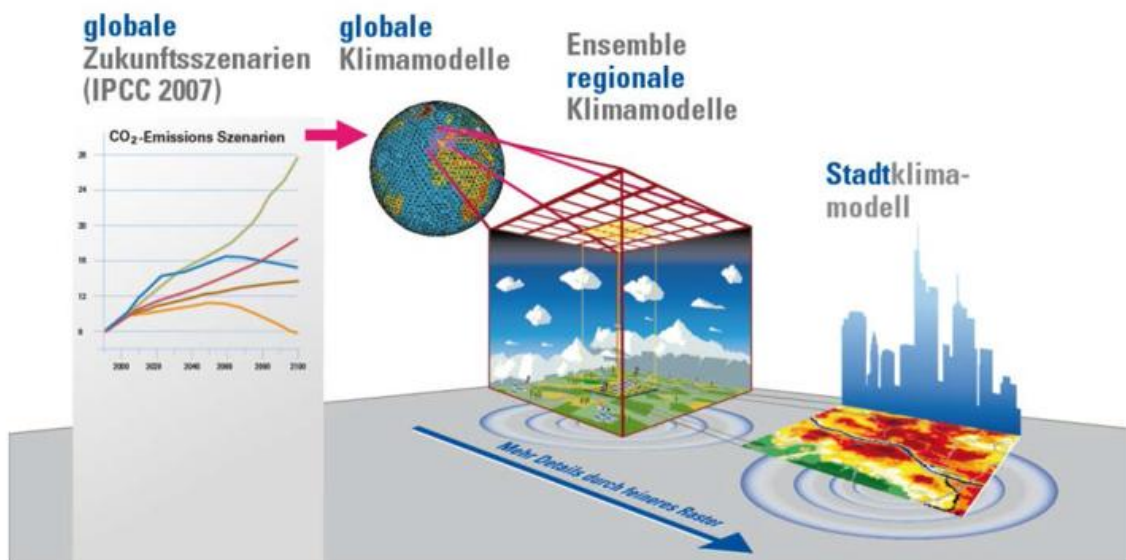


Abb. 3. Modellkette für die räumliche Verfeinerung (engl.: downscaling) der Klimarechnungen.

In der vorliegenden Untersuchung wird im ersten Skalierungsschritt die globale Klimaprojektionsrechnung mittels dynamischer und statistischer Methoden auf eine regionale Skala für die Region „Europa“ (Abb. 4a) herunter gerechnet. Im zweiten Skalierungsschritt werden die Modellergebnisse des ersten Skalierungsschrittes mit einer feineren Auflösung auf die Zielregion „Norddeutschland“ (Abb. 4b) heruntergebrochen. In dieser Studie wird für beide Skalierungsschritte das regionale Klimamodell COSMO-CLM (Siehe „Anhang A. Das regionale Klimamodell COSMO-CLM“) eingesetzt.

Die Ergebnisse des ersten Skalierungsschrittes für Europa haben mit über 10 km Rasterweite für regionale und stadtbezogene Aussagen noch eine zu geringe Auflösung. Deshalb werden in diesem Bericht nur die Modellrechnungen des zweiten Skalierungsschrittes mit einer Auflösung von 2,8 km für die Zielregion „Norddeutschland“ präsentiert und diskutiert.

Um einige extreme Wetterereignisse z.B. Hitzetage auf einer feineren städtischen Skala auflösen zu können, werden zusätzliche Modellrechnungen für die Region „Hamburg“ (Abb. 4c) mit einer Maschenweite von ca. 140 m durchgeführt. Für diese Modellsimulationen wird eine neuere Version des regionalen Klimamodells COSMO-CLM verwendet. Die neuere Modellversion ermöglicht den Modellberechnungen auf dem feinen räumlichen Gitter aber beinhaltet lediglich eine sehr vereinfachte Stadtparametrisierung. Das Modell wird für zwei ausgewählte Episoden eingesetzt – für einen heißen, trockenen und für einen regenreichen, mäßig temperierten Monat – um die räumliche Variabilität der Lufttemperatur über dem Stadtgebiet und über dem näheren Umland detailliert abzubilden.

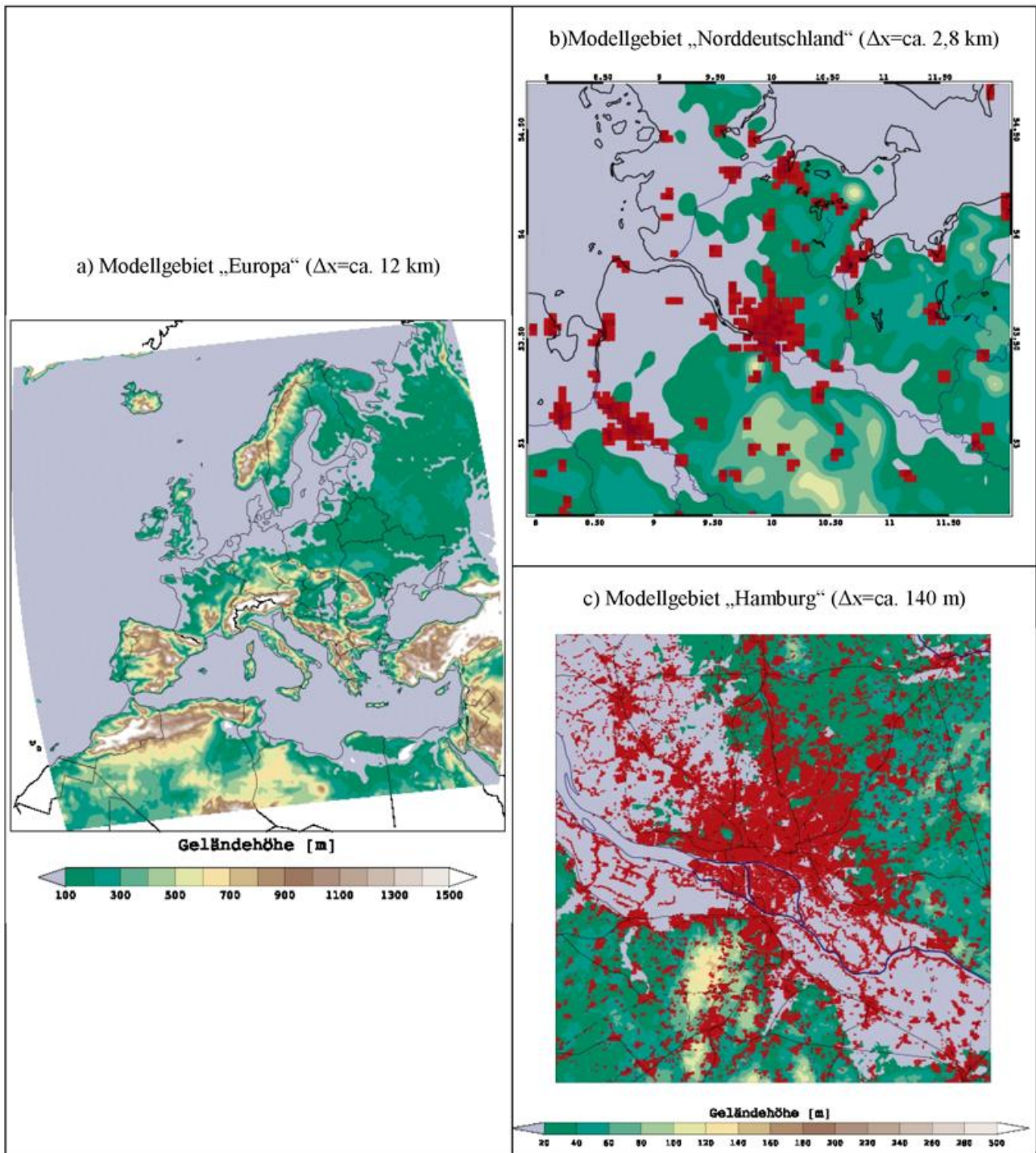


Abb. 4. Modellgebiete und ihre räumliche Auflösung (Δx in Klammern) für die Herunterskalierung der globalen Klimaprojektion: „Europa“ (a), „Norddeutschland“ (b) und „Hamburg“ (c).

6.4 Modellrechnungen

6.4.1 Zeitperioden

In dieser Studie werden Modellrechnungen der ersten beiden Skalierungsschritte für drei Zeitperioden durchgeführt:

- 1) Evaluierungssimulation für die Evaluierungsperiode 1989-2008,
- 2) Referenzsimulation für die Referenzperiode 1971-2000,
- 3) Projektionssimulation für die Projektionsperiode 2021-2050.

Dabei entspricht die Evaluierungsperiode dem „Ist“ Zustand des heutigen Klimas. Die Modellrechnungen des ersten Skalierungsschrittes werden für den Zeitraum 1989-2008 mit den Reanalyse-Daten ERA-Interim¹ (DEE, D. P. et al. 2011) des EZMW² angetrieben, d.h. mit den Daten, die den Zustand der Atmosphäre in der gegebenen Zeitperiode realitätsnah beschreiben.

Für die Klimaprojektion in die Zukunft werden Ergebnisse aus globalen Klimamodellen als Eingangsdaten genutzt. Herangezogen für diese Studie werden die Modellergebnisse des globalen Klimamodells MPI-ESM-LR³ aus dem Ensemble der Klimasimulationen für den Sachstandsbericht des Weltklimarates IPCC (IPCC 2013). Diese Modellergebnisse entsprechen dem RCP4.5 Klimaprojektionsszenario und werden im ersten Skalierungsschritt als Antriebsdaten für die Referenz- und Projektionsperiode verwendet.

Wichtig: In allen Klimamodellrechnungen wird angenommen, dass sich die Stadtausdehnung und die Bebauung nicht ändern. Ausschließlich für die Episodenrechnung mit der feinen räumlichen Auflösung wird eine Veränderung der Landnutzung berücksichtigt.

Das Modell IFS4 zur Erstellung von ERA Interim Reanalysen für die Evaluierungsperiode und das Erdsystemmodell MPI-ESM-LR, das für die Antriebsfelder für die Referenz- und Projektionsperiode liefert, unterscheiden sich stark in der Dynamik- und Physikparametrisierung. Trotz der Unterschiedlichkeiten beinhalten beide Modelle physikalische Zusammenhänge, die es erlauben, die Effekte des Klimawandels auf die wichtigen Klimavariablen wie Temperatur, Niederschlag, Wind und Strahlung abzubilden. Um die durch den Klimawandel bedingte Änderung einer Variablen abschätzen zu können, ist es wichtig dasselbe Modell sowohl für die Referenz- als auch für die Projektionssimulation anzuwenden. Damit wird sichergestellt, dass die Modellvariable lediglich auf die Klimaänderung reagiert und nicht durch den Einsatz einer anderen numerischen Approximation abgeschätzt wird. Aus dieser Überlegung heraus wird die Evaluierungssimulation zur Analyse von Modellfehlern genutzt (und eventuell zu einer entsprechenden Anpassung des Modells) und erst danach wird das Modell für die Referenz- und Projektionssimulationen eingesetzt. Die Differenz einer Klimavariablen zwischen der Referenz- und der Projektionssimulation kann dann als durch die Klimaänderung verursachtes Änderungssignal verstanden werden.

¹ <http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>

² Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (engl.: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts): <http://www.ecmwf.int>

³ MPI-ESM-LR (engl.: Max Planck Institute-Earth System Model-Low Resolution): www.mpimet.mpg.de/wissenschaft/modelle/mpi-esm.html

⁴ IFS (engl.: Integrated Forecasting System, IFS Cy31r2) ist das Modell des EZMW zur Erstellung der ERA-Interim Reanalysen.

6.4.2 Modellgebiete

Die Modellsimulationen des ersten Skalierungsschrittes werden für das Modellgebiet „Europa“ (Abb. 4a) mit der räumlichen Auflösung von $0,11^\circ$ (ca. 12 km) durchgeführt⁵. Im zweiten Schritt erfolgt für das Modellgebiet „Norddeutschland“ (Abb. 4b) eine Skalierung auf $0,025^\circ$ (ca. 2,8 km), wobei das Modellgebiet „Norddeutschland“ in das Modellgebiet „Europa“ integriert (engl.: nested) wird und mit dessen Simulationsergebnissen an den Rändern angetrieben wird. Dies ist ein übliches Verfahren, um die Modellergebnisse dynamisch, d.h. mit Hilfe einer höher aufgelösten Modellsimulation herunter zuskalieren. Für beide Modellgebiete – „Europa“ und „Norddeutschland“ – wird das mesoskalige nichthydrostatische regionale Klimamodell COSMO-CLM Version 4.8 (CCLM) verwendet (ROCKEL, B. et al. 2008), das mit einer Stadtparametrisierung (TRUSILOVA, K. et al. 2013) erweitert wurde. Die Stadtparametrisierung wird nur für die Region „Norddeutschland“ eingeschaltet. Aufgrund der vergleichsweise groben räumlichen Auflösung im Modellgebiet „Europa“ werden dort die Städte nicht repräsentativ dargestellt.

Wichtig: In dieser Studie werden die Ergebnisse des zweiten Skalierungsschrittes mit räumlicher Auflösung von 2,8 km für Temperatur, Niederschlag, Strahlung und Wind ausführlich analysiert. Diese Datenanalysen stellen die Kernergebnisse dieser Untersuchung dar.

Klimaberechnungen für die Region „Hamburg“ mit einer Auflösung von 2,8 km lassen eine Abschätzung der Änderung der projizierten Klimavariablen auf der Grundlage städtebaulicher Veränderungen kaum zu, da Stadtstrukturen eine geringere Ausdehnung als diese Maschenweite aufweisen und so durch das Gitternetz „fallen“. Um jedoch die Auswirkung der zukünftigen Stadtveränderung auf Klimavariablen angeben zu können, werden zusätzlich noch detailliertere Modellsimulationen mit einer räumlichen Auflösung von $0,00125^\circ$ (ca. 140 m) für das Modellgebiet „Hamburg“ (Abb. 4c) durchgeführt. Für diese Modellsimulationen wird das neuere Klimamodell COSMO-CLM Version 5.0 verwendet. Aufgrund der großen Rechenaufwand sind die Städte in der Modellversion 5.0 vereinfacht als Steinflächen dargestellt und nicht wie in der COSMO-CLM Version 4.8 (mit Stadtparametrisierung TEB, siehe „Anhang C. Die Stadtparametrisierung“). Diese gegenüber TEB vereinfachte Parametrisierung ermöglicht es gleichwohl die Differenzen der bodennahen Lufttemperatur aufgrund von Landnutzungsänderungen abzuschätzen. Das Modell wird für zwei ausgewählte Episoden (Tab. 1) eingesetzt, um die räumliche Variabilität der Temperatur über dem Stadtgebiet detailliert abzubilden.

Tab. 1. Zeitepisoden der Temperatur für das Modellgebiet „Hamburg“.

Datum	Beschreibung
01.08.-31.08.2003	heißer, trockener Monat
01.08.-31.08.2002	regenreicher, mäßig temperierter Monat

Diese Episoden wurden mit Hilfe statistischer Analysen der Modellergebnisse für „Norddeutschland“ ausgewählt.

Die Landnutzungsdaten mit der feinen räumlichen Auflösung von ca. 100 m wurden für die Region „Hamburg“ (persönliche Mitteilung von Herrn Dr. Roland Goetzke, BBSR⁶) aus dem Forschungsprojekt CC-LandStraD⁷ (Teilprojekt Landnutzungsszenarien 2030 – Für eine Klimawandel optimierte Siedlungsentwicklung in Deutschland) des BBSR dem DWD zur Verfügung gestellt. Diese Daten gibt es für

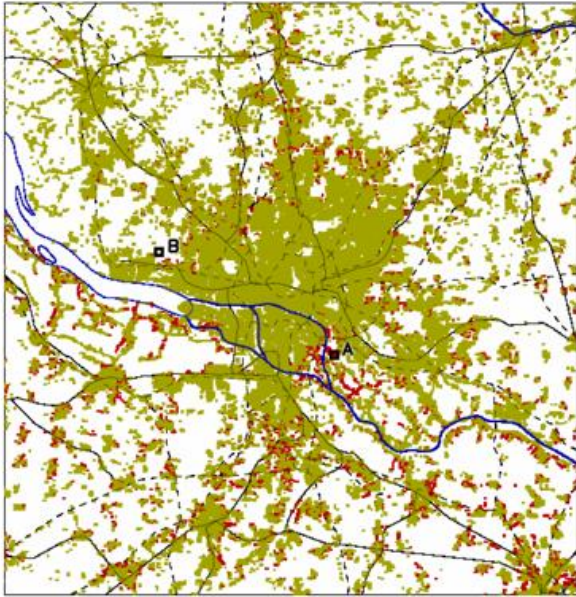
⁵ Klimaprojektion für das Modellgebiet „Europa“ (CORDEX-EU11) wurde von Dr. Klaus Keuler aus der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg für den 7. Sachstandsbericht des Weltklimarats IPCC (IPCC 2013) durchgeführt.

⁶ BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: www.bbsr.bund.de

⁷ Forschungsprojekt CC-LandStraD (Engl. Climate Change - Land Use Strategies): Strategien für eine nachhaltige Landnutzung im Zeichen des Klimawandels für Deutschland: www.cc-landstrad.de/

2009 (auf aktuellen Daten basierend) und für 2030 (als Ergebnis einer zukünftigen Projektion der Landnutzungsänderung in Deutschland). Die zwei Datensätze der Landnutzung (für 2009 und 2030) unterscheiden sich hauptsächlich im Ausmaß der Stadt- und Waldausdehnung (Abb. 5). Der Datensatz für das Jahr 2009 wird als Ist-Zustand und der für das Jahr 2030 als Planzustand der Landnutzung betrachtet. Es werden für jede der zwei ausgewählten Episoden Modellsimulationen mit beiden Landnutzungsdatensätzen durchgeführt. Aus der Differenz von Ist- und Planzustand einer Episode werden mögliche Effekte der Landnutzungsänderung auf die Klimavariablen Temperatur dargestellt.

a) Stadtanteil 2009 und 2030



b) Waldanteil (Baumbestand) 2009 und 2030

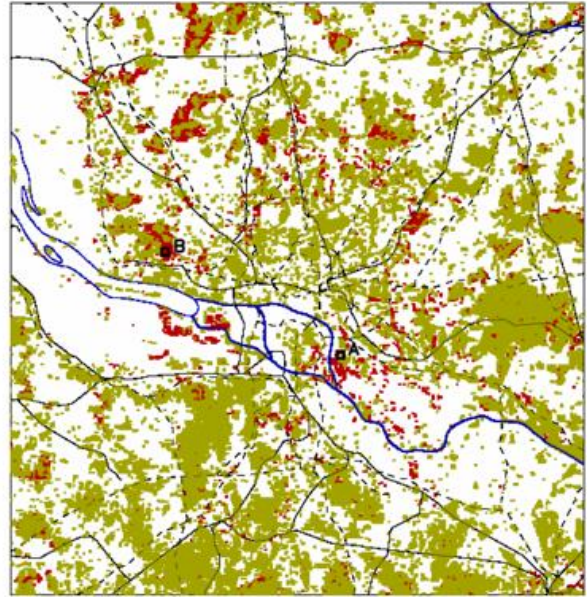


Abb. 5. Modellgebiet „Hamburg“: Änderung des Stadtanteils (a) und des Waldanteils (b) zwischen 2009 und 2030. Grün: Ist-Zustand 2009, Rot: Zuwachs der entsprechenden Landnutzungsfläche bis 2030.

7 Ergebnisse

7.1 Darstellung

Die Ergebnisse werden für jede einzelne Klimavariable (Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung und Wind) in den folgenden Abschnitten in der Reihenfolge:

- 1) Darstellung der historischen Entwicklung,
- 2) Evaluierung des Klimamodells für „Norddeutschland“,
- 3) Analyse der Referenz- und Projektionssimulationen für „Norddeutschland“,
- 4) Einzelne Episodenrechnungen für „Hamburg“ (nur für Temperatur),
- 5) Kurze Zusammenfassung der Ergebnisse für die entsprechende Klimavariable,

beschrieben.

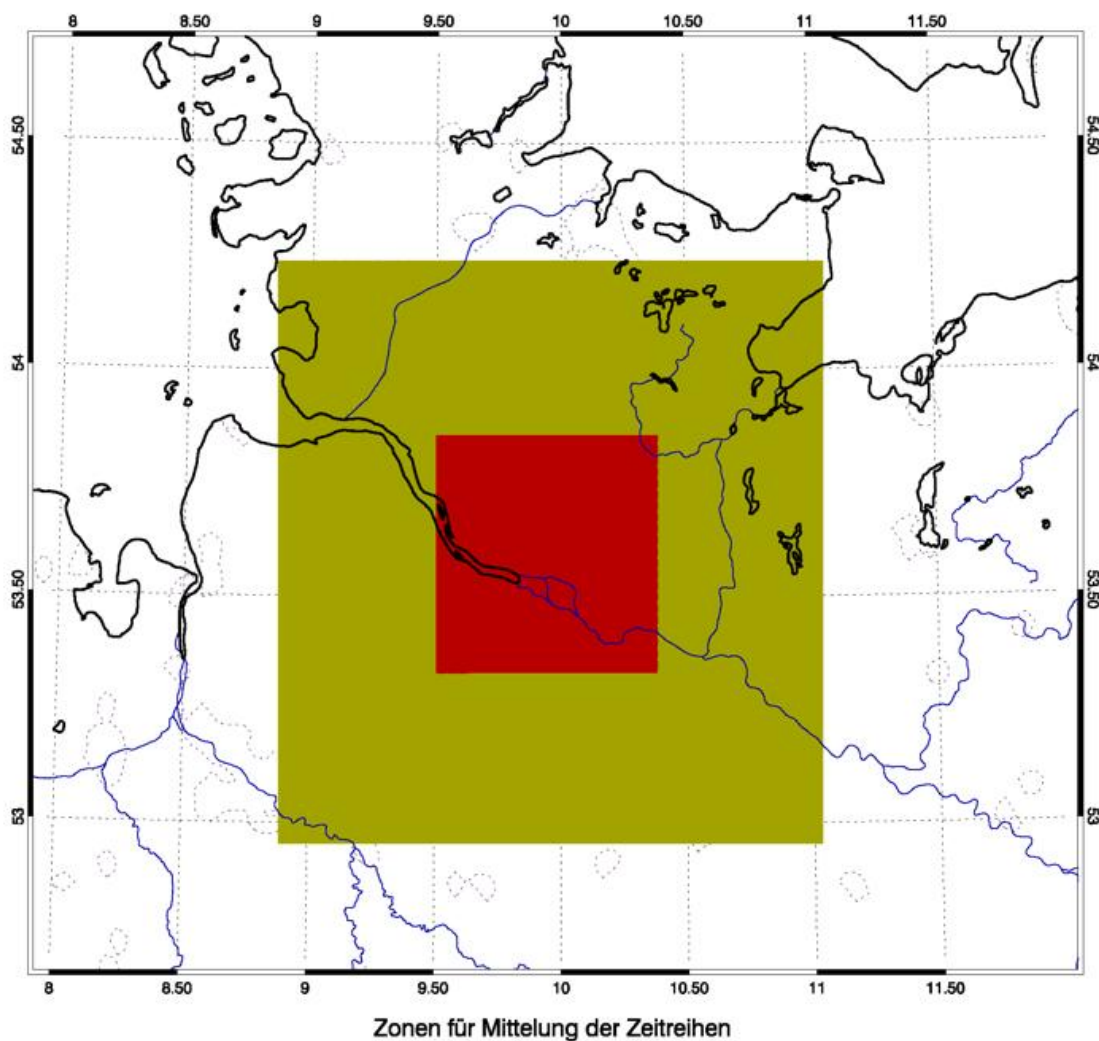


Abb. 6. Zwei Gebiete für die Mittelung der Klimavariablen: „Hamburg“ (rot) und „Umland“ (grün).

Für die Evaluierung des Klimamodells werden die Modellergebnisse mit den Messdaten der 2 m Temperatur (Standardmesshöhe der Lufttemperatur) und der täglichen Niederschlagssumme an ausgewählten Stationen (Abb. 2) des DWD verglichen. Da das Modell mit einer Gitterweite von 2,8 km nicht immer die

Gegebenheiten der Punktmessungen an den Messstationen repräsentiert, werden für jede Klimavariablen und für jede Jahreszeit Mittelwerte sowohl aus den Modelldaten als auch aus den Messungen gebildet und miteinander verglichen. Ein Vergleich dieser zeitlich gemittelten Werte hat den Vorteil, dass die wesentlichen Abweichungen gezeigt und mögliche, für die Aussage weniger interessierende, kurzzeitige Veränderungen „geglättet“ werden.

Für die Analyse der Entwicklung einer Klimavariablen im Evaluierungs-, Referenz- und Projektionszeitraum werden die Modellzeitreihen über die entsprechenden Perioden für die folgenden zwei Gebiete gemittelt: „Hamburg“ (Abb. 6, rot) und „Umland Hamburg“ (Abb. 6, grün). Der Vergleich dieser gemittelten Zeitreihen zeigt, ob sich die Klimavariablen in der Zukunft im urbanen und im nicht urbanen Raum unterschiedlich entwickeln.

7.2 Temperatur

7.2.1 Historische Entwicklung

Ähnlich wie in Gesamtdeutschland sind auch in Hamburg die Temperaturen angestiegen. Abb. 7 zeigt die von Jahr zu Jahr teils deutlich variierenden Flächenmittel der Temperatur für Hamburg seit 1881. Die kräftige rote Linie lässt den langfristigen Trend der Temperatur anhand eines 30-jährigen gleitenden Mittels gut erkennen. Im Vergleich dazu markiert die grüne Kurve die Entwicklung der deutschlandweiten Temperatur. Beide Linien weisen einen nahezu parallelen Anstieg auf, wobei dieser besonders ab 1985 auffällig ist.

Die höchste Jahrestemperatur während des Zeitraumes 1881-2013 betrug 10,4 °C im Jahr 1999, die niedrigste dagegen 6,7 °C im Jahr 1940. Für den zur Abschätzung von Entwicklungen des Klimawandels international vereinbarten Vergleichszeitraum 1961-1990 (gestrichelte schwarze Linie) ergibt sich ein Mittelwert von 8,8 °C für Hamburg im Vergleich zu 8,2 °C für Deutschland.

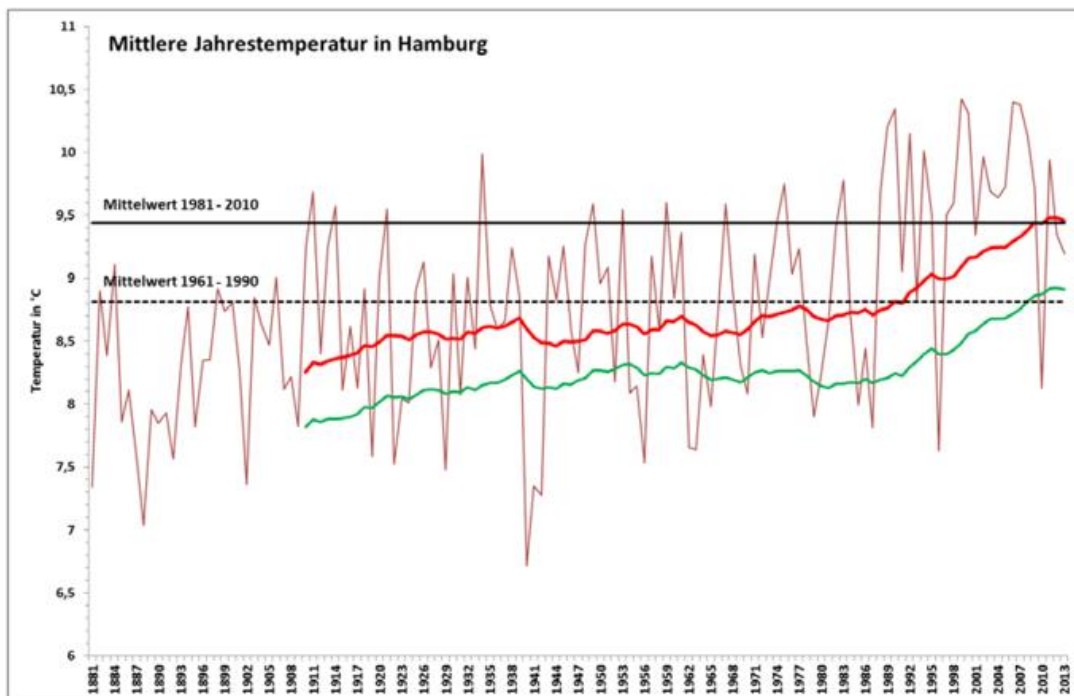


Abb. 7. Messdaten: Es wird wärmer in Hamburg. Die Grafik zeigt die Jahresmitteltemperaturen von 1881-2013 für Hamburg (dünne rote Linie). Die dicke rote Linie stellt den langfristigen Trend als 30-jähriges gleitendes Mittel dar. Zum Vergleich ist das 30-jährige gleitende Mittel für Deutschland (dicke grüne Linie) gezeigt. Die schwarzen Linien kennzeichnen die Mittelwerte der Referenzperioden 1961-1990 (gestrichelt) und 1981-2010 (ausgezogen) für Hamburg.

Hinsichtlich der aktuelleren Bezugsperiode 1981-2010 besteht ein Anstieg für das 30-jährige Mittel (ausgezogene schwarze Linie) auf 9,4 °C (deutschlandweit 8,9 °C). Für die gesamte Zeitspanne von 1881 bis 2013 zeigt sich entsprechend des linearen Trends eine Temperaturzunahme von etwa 1,4 Grad für den Hamburger Raum, der damit leicht über dem bundesdeutschen Wert von 1,2 Grad liegt.

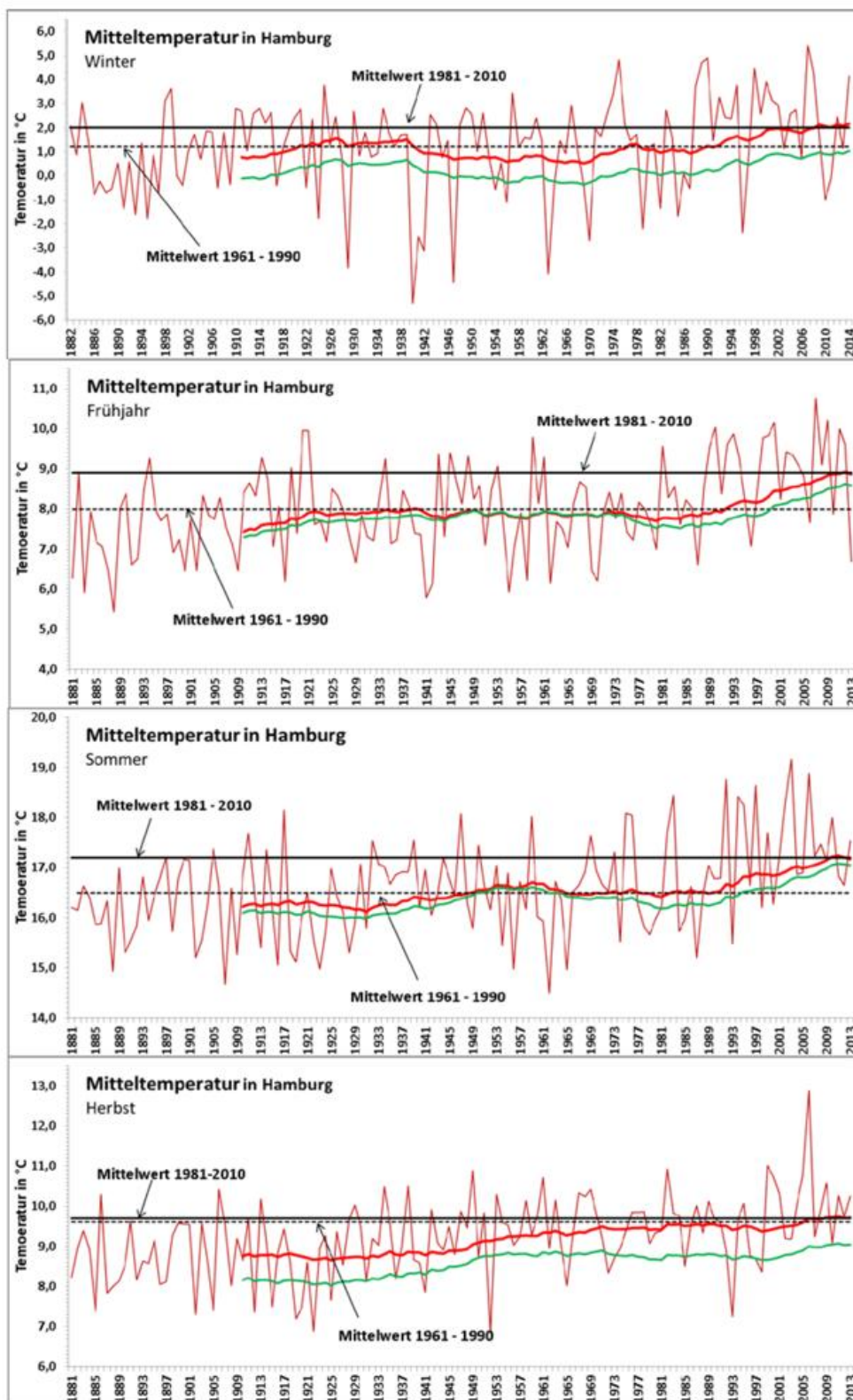


Abb. 8. Messdaten: Entwicklung der jahreszeitlichen Temperaturen in Hamburg (Legende entsprechend Abb. 7).

Abb. 8 betrachtet die Temperaturentwicklung jahreszeitlich. In der Meteorologie werden die Monate Dezember bis Februar als Winter zusammengefasst, März bis Mai als Frühjahr, Juni bis August als Sommer sowie September bis November als Herbst. Die mögliche Schwankungsbreite der jahreszeitlichen Mitteltemperaturen ist im Winter mit einer Spanne von rund 10 Grad wesentlich deutlicher als in den anderen Jahreszeiten mit rund 5 Grad ausgeprägt. Innerhalb des aufgezeigten Zeitraums 1881 bis 2013 erreichte z.B. die sommerliche Mitteltemperatur 2003 mit 19,2 °C den bisherigen Höchstwert. Der niedrigste Wert wurde mit 14,5 °C 1962 festgestellt. Im Winter lagen die bisherigen Extrema zwischen -5,3 °C (1939/40) und 5,4 °C (2006/07).

Die lineare Temperaturzunahme ist in der betrachteten Zeitspanne 1881-2013 mit 1,2 Grad (Sommer) und 1,5 Grad (Winter) in den Jahreszeiten recht einheitlich. Allerdings sind in den zeitlichen Verläufen durchaus Unterschiede erkennbar: Während im Frühjahr und Sommer zunächst ein vergleichsweise geringer Temperaturanstieg erkennbar ist, zeigt sich ab etwa Mitte der 80er Jahre des vergangenen Jahrhunderts eine deutlichere Zunahme. Mit gewissen leichten Schwankungen weist der Herbst eine kontinuierlichere Temperaturentwicklung auf. Markanter sind die periodischen Schwankungen im Winter ausgeprägt. Nach einer wärmeren Zeit zwischen etwa 1920 und 1940 bestand nachfolgend bis etwa 1970 eine kühlere Phase, die dann wieder in ansteigende Temperaturen überging. Mit diesen pro Jahreszeit mehr oder minder ausgeprägten Temperaturphasen ergeben sich bei einem Vergleich der aktuellen Referenzperiode 1981-2010 zur Bezugsperiode 1961-1990 unterschiedliche Temperaturzunahmen. Am geringsten fällt der Anstieg mit 0,1 Grad im Herbst aus (von 9,6 °C auf 9,7 °C), am stärksten im Frühjahr von 8,0 °C auf 8,9 °C. Winter und Sommer zeigen mit 0,8 Grad von 1,2 °C auf 2,0 °C bzw. mit 0,7 Grad von 16,5 °C auf 17,2 °C ebenfalls deutliche Zuwächse.

7.2.2 Analyse der Modellsimulationen für „Norddeutschland“

Die mit dem Modell berechneten Temperaturen werden zunächst mit Stationsbeobachtungen für die Evaluierungsperiode 1989-2008 jahreszeitenabhängig verglichen. Abb. 9 zeigt, dass das Modell die gemessenen Temperaturen im Frühjahr und im Herbst sehr gut (mit einem Fehler unter 1 Grad) wiedergibt, sie im Winter bis zu 2 Grad unterschätzt, im Sommer dagegen bis zu 2 Grad überschätzt. Es ist eine verbreitete Tendenz der Regionalklimamodelle die Temperaturextrema zu überschätzen. Dies ist auch aus früheren COSMO-CLM Modellversionen bekannt (ROCKEL, B. UND B. GEYER 2008). Der Grund dafür wird in einem bisher nicht optimierten Strahlungsantrieb (z.B. durch eine zu grobe Abschätzung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre) oder an einer zu vereinfachten Parametrisierung des Energieaustauschs zwischen dem Boden und der unteren Atmosphäre vermutet. Darüber hinaus „treffen“ die Modellgitterpunkte mit Gitterabständen von 2,8 km selten den genauen Standort der Messstation. Ein zusätzlicher Grund für die Diskrepanzen kann auch in den Unterschieden der modellierten und der realen Landnutzung an der Station bestehen, was sich insbesondere bei der Betrachtung von Temperaturextrema bemerkbar macht.

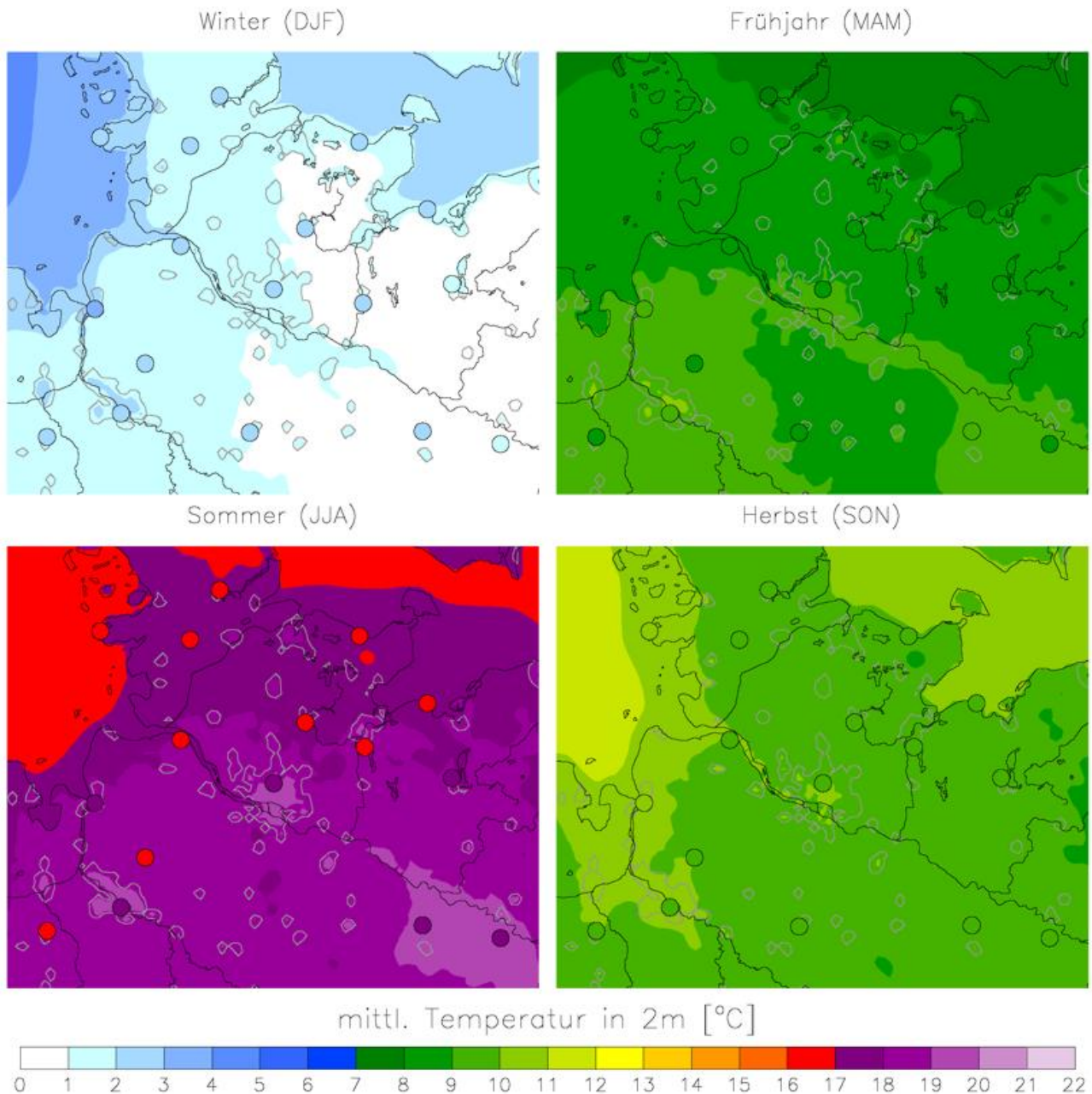


Abb. 9. Modellrechnung vs. Messdaten: Vergleich der 2 m-Lufttemperaturen, gemittelt für Jahreszeiten über die Evaluierungsperiode 1989-2008, mit den Beobachtungen. Kreise markieren die Stationen, die Farbe des Kreises zeigt den Wert auf der Farbskala. Identische Farben von Kreis und umliegender Fläche zeigen Übereinstimmung von Modell- und Stationswert an.

Trotz dieser Unterschiede zwischen Modell- und Beobachtungsdaten kann die Qualität des Modells für das Modellgebiet „Norddeutschland“ als ausreichend angesehen werden, wobei hinsichtlich der Temperaturextrema die ermittelten Änderungen mit einer gewissen Vorsicht, aufgrund der Überschätzung der Temperaturextrema vom Modell, betrachtet werden sollten.

Der Modelllauf für die Evaluierungsperiode 1989-2008 verdeutlicht einen Anstieg der bodennahen Lufttemperaturen in Hamburg sowie im Umland (Abb. 10).

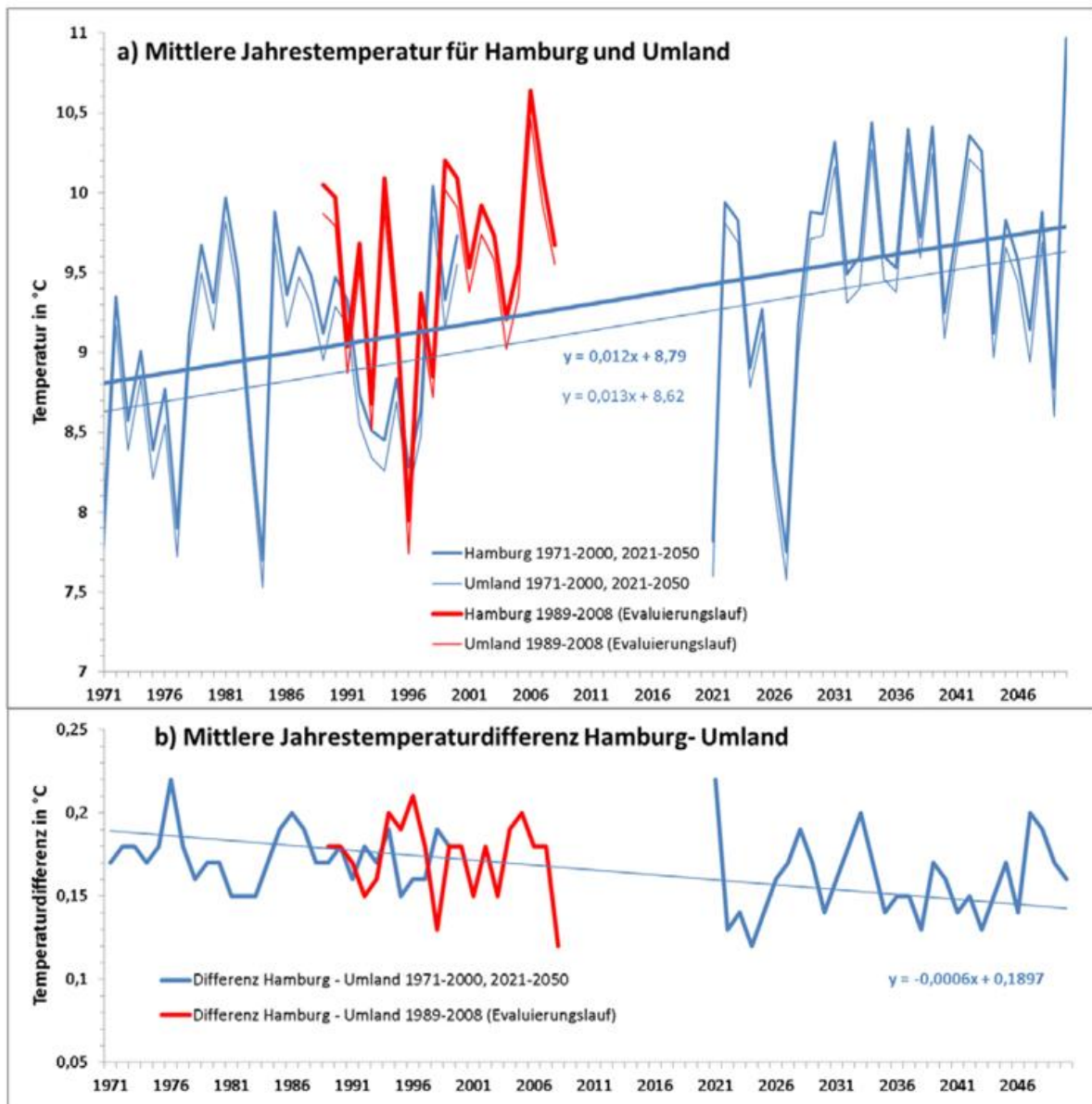


Abb. 10. Modellrechnungen: Entwicklung der mittleren jährlichen Temperatur (a) und Entwicklung der Temperaturdifferenz zwischen der Stadt und dem Umland mit Trends (b).

Die Referenz- und Projektionsrechnungen zeigen einen weiteren Temperaturanstieg für Hamburg von +1,2 Grad/100 Jahre und für das Umland eine leicht verstärkte Zunahme von +1,3 Grad/100 Jahre (Abb. 10). Somit steigt die Temperatur in der Stadt im Mittel geringfügig langsamer an als in der ländlichen Umgebung.

In allen Simulationen bleibt die Temperaturdifferenz zwischen der Stadt und dem Umland positiv (Abb. 10b): Im Mittel ist der Stadtbereich 0,1 Grad bis 0,2 Grad wärmer als das Umland. Diese Differenz verringert sich bis 2050 durch den leicht stärkeren Anstieg der Temperaturen im ländlichen Umland Hamburgs leicht. Dieser Effekt beruht auf einer stärkeren Erwärmung und sommerlichen „Austrocknung“ des Umlands im Vergleich zur Stadt Hamburg.

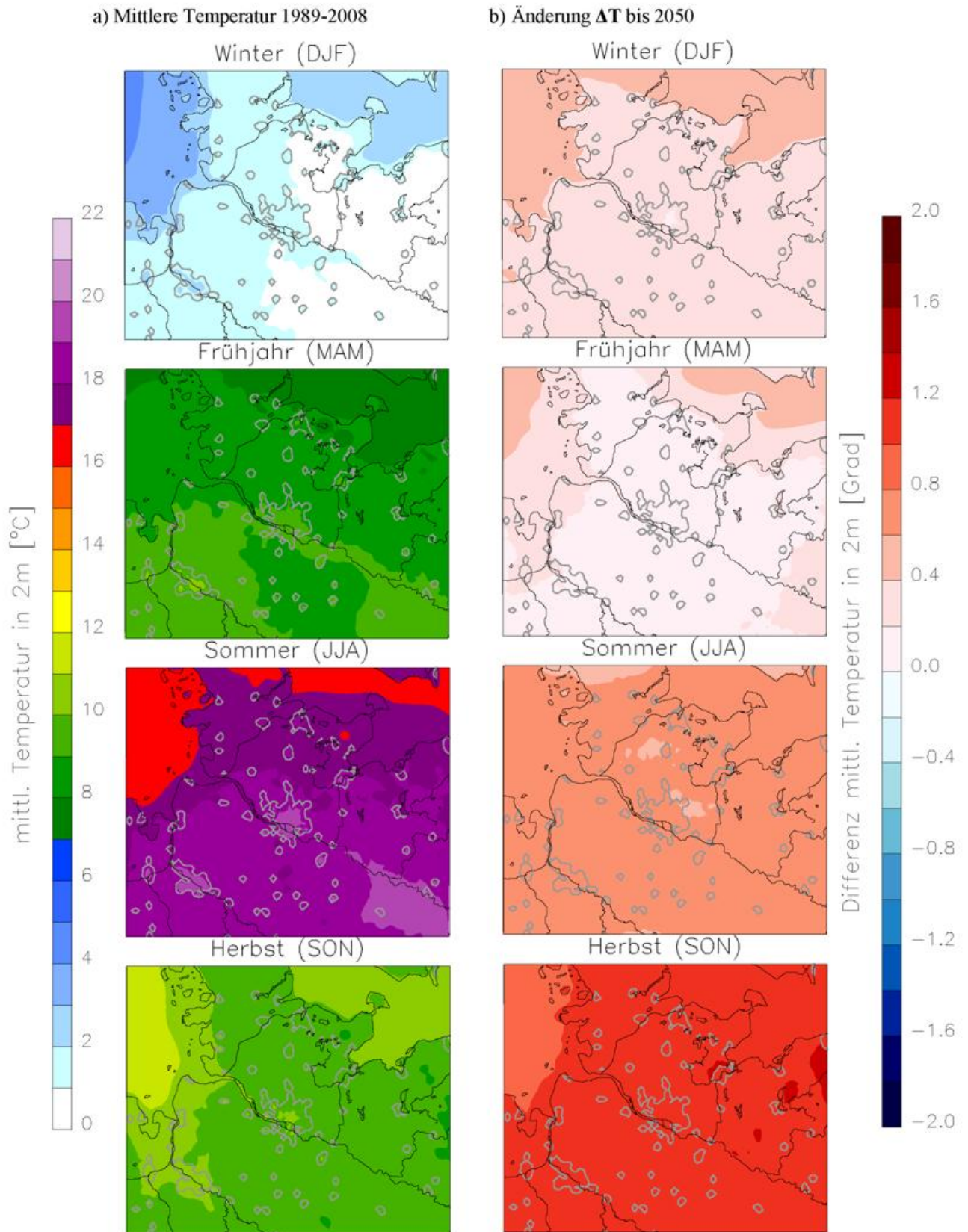


Abb. 11. Modellrechnungen: Mittlere 2 m-Lufttemperatur (a) und die projizierte Änderung (b) für die Jahreszeiten.

Die Modellsimulationen geben für die Evaluierungsperiode die typischen Jahreszeitentemperaturen für die warmgemäßigte Klimazone (effektive Klimaklassifikation nach Köppen und Geiger: Cfb, (KÖPPEN, W. 1918, KÖPPEN, W. UND G. GEIGER 1930-1939)) Jahreszeitentemperaturen (Abb. 11a) wieder. Die zukünftige Temperaturänderung für die Jahreszeiten wird als Differenz zwischen den 30-jährigen gemittelten Temperaturfeldern aus Projektion- und Referenzperiode bestimmt:

$$\Delta T = T_{\text{Projektionsperiode}} - T_{\text{Referenzperiode}}$$

Die erwartete Temperaturänderung ΔT für die Metropolregion Hamburg fällt je nach Jahreszeit unterschiedlich stark aus (Abb. 11b).

Der deutlichste Temperaturanstieg im bebauten Stadtzentrum besteht im Herbst mit bis zu +1,2 Grad, der zweitstärkste im Sommer mit bis zu +0,6 Grad. Diese Abschätzung des Temperaturanstiegs basiert auf der Annahme, dass sich die Bebauungsstruktur der Stadt Hamburg bis 2050 nicht ändert, was die berechnete Zunahme schwächer ausfallen lässt, als wenn eine zusätzliche Stadtverdichtung gegeben wäre. Für die Stadt Hamburg sind die projizierten Änderungen im Winter mit bis zu +0,2 Grad und Frühjahr mit bis zu +0,1 Grad eher gering. Währenddessen findet über der Nord- und Ostsee im Winter und Frühjahr die kräftigste Temperaturzunahme statt. Die Erwärmung der Nordsee und der Ostsee stimmt mit der in den globalen Klimaprojektionen weltweit prognostizierten Erwärmung der Ozeane (IPCC 2013) überein. Der Anstieg der Wassertemperatur wird von der globalen Klimaprojektion erst in das Modellgebiet „Europa“ und dann in das Modellgebiet „Norddeutschland“ übertragen, wodurch eine stärkere Erwärmung der Lufttemperatur über Wasser als über Land hinsichtlich der kalten Jahreszeiten (Winter, Frühjahr) vorgegeben wird (Abb. 11b). Die Temperaturzunahme über Land für das Modellgebiet „Norddeutschland“ bleibt besonders im Frühjahr gering ($\leq 0,2$ Grad).

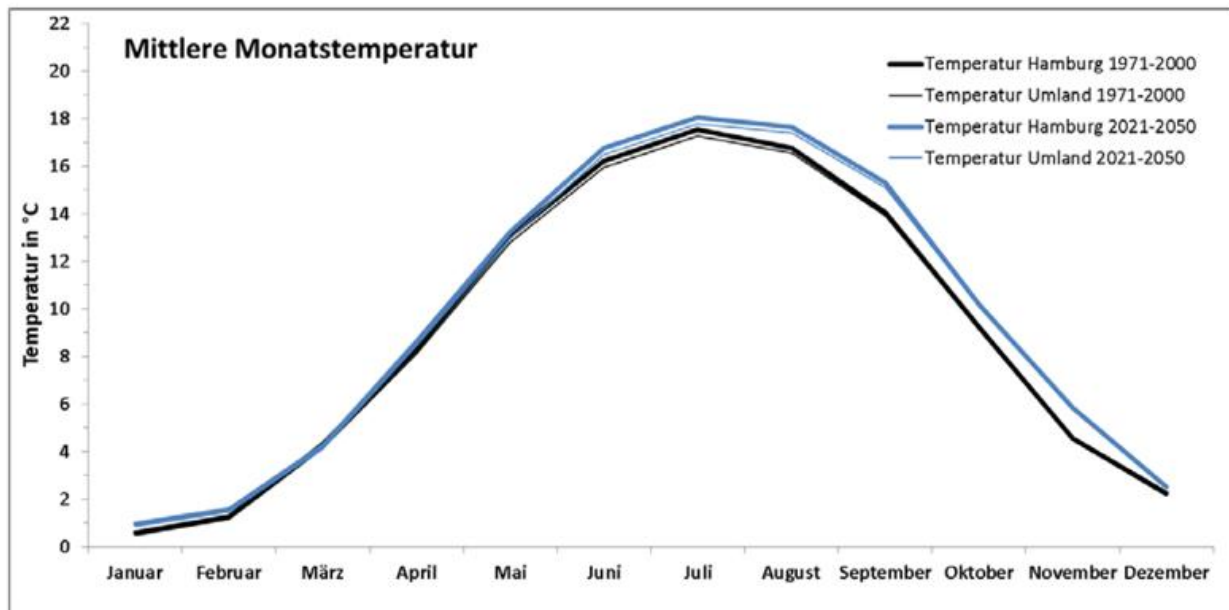


Abb. 12. Modellrechnungen: Mittlere monatliche Lufttemperatur aus dem Referenzlauf (schwarz) und aus dem Projektionslauf (blau). Der mittlere Jahresgang wurde aus den entsprechenden Modellsimulationen für Hamburg und das Umland berechnet (siehe Abb. 6).

Die Änderung der saisonalen Temperaturvariation in der Stadt Hamburg wird zusätzlich anhand des mittleren Jahresgangs veranschaulicht (Abb. 12). Für die Zukunft bis zum Jahr 2050 zeigen die Modellsimulationen eine ab Juni bis zum Jahresende anhaltende Erwärmung, die in den Herbstmonaten bis über +1 Grad erreicht. Während des Frühjahres bleiben die beiden Modellberechnungen nah beieinander und signalisieren damit keine oder eine nur sehr geringe Temperaturänderung.

7.2.3 Sommertage, heiße Tage, Tropennächte

Ein Sommertag ist ein Tag, an dem die maximale Tagestemperatur 25 °C erreicht bzw. überschreitet:

$$T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$$

Entsprechend ist ein heißer Tag ein Tag, an dem die Tageshöchsttemperatur mindestens 30 °C erreicht:

$$T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$$

In einer Tropennacht sinkt die minimale Temperatur nicht unter 20 °C ab:

$$T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$$

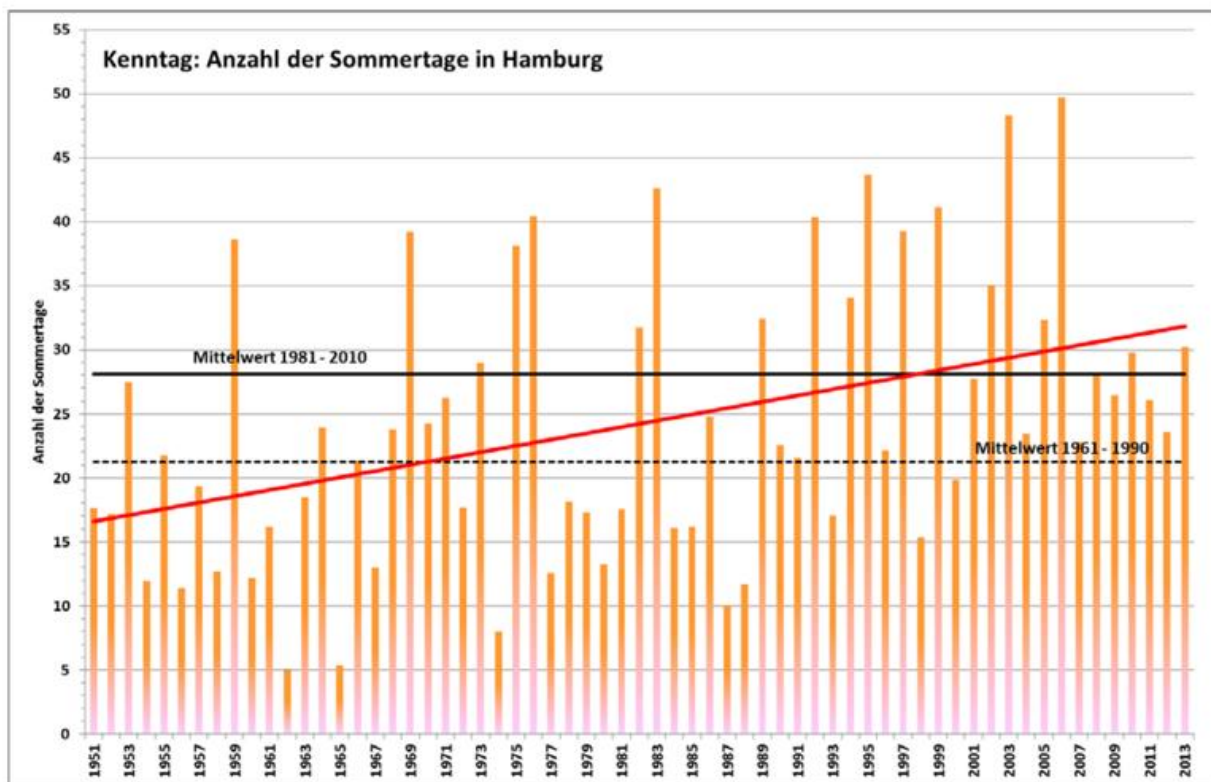


Abb. 13. Messdaten: Die Sommertage nehmen in Hamburg zu. Die Grafik zeigt die Anzahl der jährlichen Sommertage von 1951-2013 für Hamburg (rotorange Säule). Die dicke rote Linie stellt den langfristigen linearen Trend dar. Die schwarzen Linien kennzeichnen den Mittelwert der Referenzperioden 1961-1990 (gestrichelt) und 1981-2010 (ausgezogen).

Die historische Entwicklung solcher Kenntage soll am Beispiel der Sommertage (Gebietsmittel Hamburg) aufgezeigt werden (Abb. 13). Die Grafik in Abb. 13 zeigt einen deutlichen Anstieg der Sommertage in der Zeitspanne von 1951 bis 2013. Der lineare Trend lässt für diesen Zeitraum eine Zunahme von rund +16 Tagen erkennen. Dabei variierte die Anzahl pro Jahr zwischen 5 (1962) und 50 Tagen (2006). In den Jahren 2001 bis 2013 lag die Anzahl der Sommertage durchgängig über dem Mittelwert von 21 Tagen aus dem Bezugszeitraum 1961-1990. Das aktuelle Vergleichsmittel (Bezugszeitraum 1981-2010) beträgt 28 Tage, also ein Plus von 7 Tagen oder entsprechend 33 %.

In der Evaluierungsperiode 1989-2008 wurden in der Stadt Hamburg bis 50 Sommertage, 18 heiße Tage und 5 Tropennächte in einem Jahr gemessen, während die Anzahl dieser Kenntage im Umland niedriger lag (Tab. 2). Im Vergleich überschätzt das Modell (Evaluierungslauf) die Anzahl der Sommertage (Tab. 2). Der entsprechende Vergleich für die heißen Tage und die Tropennächte fällt bei der geringen Anzahl dieser Kenntage ausreichend genau aus (das Modell liefert höhere Anzahlen dieser Kenntage).

Tab. 2. Mittlere jährliche Anzahl der Sommertage, der heißen Tage und der Tropennächte für Hamburg und das Umland berechnet aus Mess- und Modelldaten für die Evaluierungsperiode 1989-2008.

Anzahl Tage [Tage/Jahr]	Hamburg		Umland	
	Messwerte	Modell	Messwerte*	Modell
Min. Anzahl der Sommertage	15	18	9	18
Mittl. Anzahl der Sommertage	31	34	22	29
Max. Anzahl der Sommertage	50	58	39	38
Min. Anzahl der heißen Tage	0	1	0	2
Mittl. Anzahl der heißen Tage	6	8	3	6
Max. Anzahl der heißen Tage	18	19	11	8
Min. Anzahl der Tropennächte	0	2	0	1
Mittl. Anzahl der Tropennächte	1	3	0	3
Max. Anzahl der Tropennächte	5	5	3	5

*Als Messwerte für das Umland von Hamburg wurden die Flächenmittel aus 1 km-Rasterwerten für das Bundesland Schleswig-Holstein genommen. Als Messwerte für die Stadt Hamburg wurden die Flächenmittel aus 1 km-Rasterwerten für das Bundesland Hamburg genommen.

Die mit dem Klimaszenario projizierten Änderungen der Anzahl der Sommertage, der heißen Tage und der Tropennächte wird als Differenz zwischen der mittleren jährlichen Anzahl der Tage in der Projektions- und der Referenzperiode berechnet:

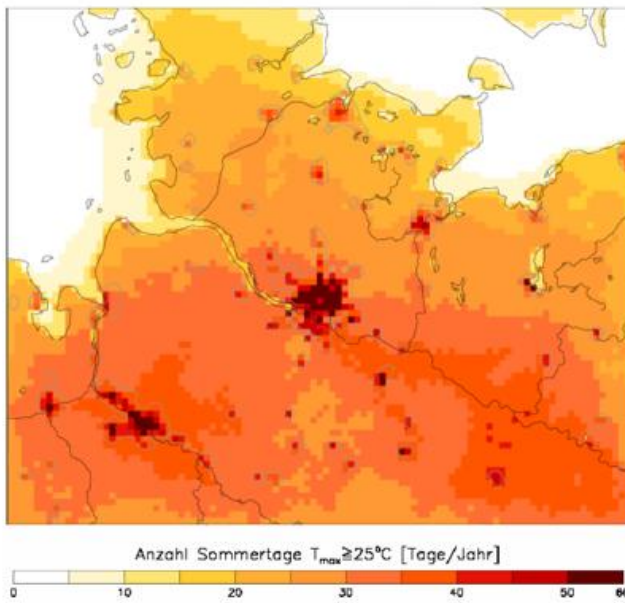
$$\text{Sommertage} : \Delta ST = ST_{\text{Projektionsperiode}} - ST_{\text{Referenzperiode}}$$

$$\text{heiße Tage} : \Delta HT = HT_{\text{Projektionsperiode}} - HT_{\text{Referenzperiode}}$$

$$\text{Tropennächte} : \Delta TN = TN_{\text{Projektionsperiode}} - TN_{\text{Referenzperiode}}$$

Städte weisen eine höhere Anzahl an Sommertagen als ihre Umgebung auf (Abb. 14a). Die Zahl der Sommertage wird nahezu überall im Modellgebiet zunehmen (Abb. 14b). Der markanteste Anstieg ΔST bis über +3 Tage/Jahr ist in ländlichen Gebieten erkennbar. Dies steht im Zusammenhang mit dem Erwärmungstrend aus der globalen Klimaprojektion: Mit der allgemeinen Erwärmung über „Norddeutschland“ nimmt das Überschreiten der 25 °C Schwelle in Gebieten mit einer ursprünglich geringeren Anzahl von Sommertagen stärker zu, als in Stadtbereichen mit einer vergleichsweise größeren Anzahl an Sommertagen.

a) Mittlere Anzahl der Sommertage 1989-2008



b) Änderungstrend ΔST /Jahr bis 2050

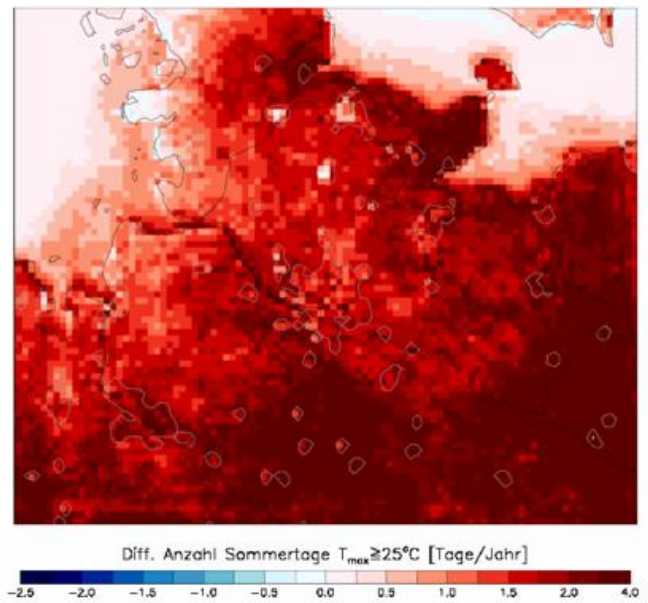
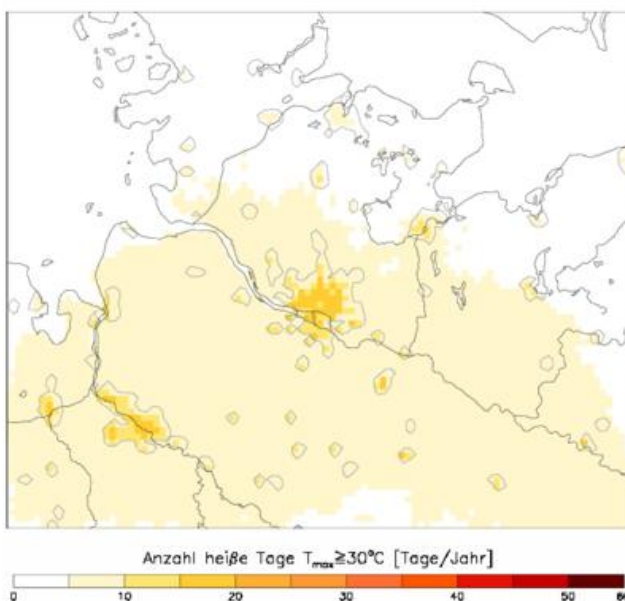


Abb. 14. Modellrechnung: Mittlere jährliche Anzahl der Sommertage (a) und der projizierte Trend (b).

Laut der Klimaprojektionsrechnung bis zum Jahr 2050 steigt auch die Anzahl der heißen Tage und der Tropennächte in Norddeutschland an, insbesondere in den Großstädten Hamburg und Bremen: In der Evaluierungsperiode 1989-2008 liegt die mittlere Anzahl der heißen Tage pro Jahr in ländlichen Gebieten Norddeutschlands unter 10; nur in Städten gibt es mehr heiße Tage (Abb. 15a). Die berechnete Änderung ΔHT zeigt für Hamburg einen Anstieg von bis zu +4 Tage/Jahr. Auch in anderen Städten nimmt die Anzahl der heißen Tage bis zum Jahr 2050 stark zu (Abb. 15b). In ländlichen Räumen gibt es dagegen nur einen geringeren Zuwachs von bis zu +1,5 Tage/Jahr. Die in diesem Zusammenhang am stärksten betroffenen Bereiche liegen leewärts⁸ der Städte Hamburg und Bremen. Die Ergebnisse deuten auf eine Verstärkung des Hitzestresses besonders in Städten hin.

a) Mittlere Anzahl der heißen Tage 1989-2008



b) Änderungstrend ΔHT /Jahr bis 2050

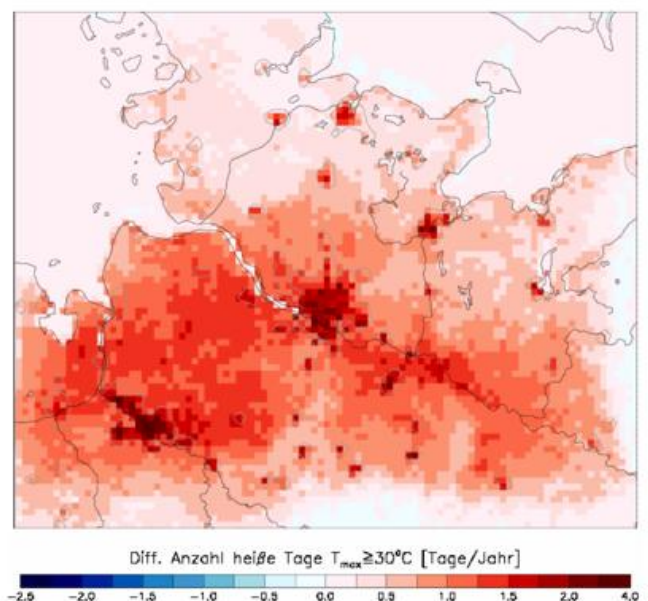


Abb. 15. Modellrechnung: Mittlere jährliche Anzahl der heißen Tage (a) und der projizierte Trend (b).

⁸ Bezogen auf westliche Winde die am häufigsten in Norddeutschland vorkommende Windrichtung.

Tropennächte sind in Norddeutschland selten: In großen Städten werden 1989-2008 weniger als 10 Tropennächte pro Jahr modelliert (Abb. 16a). Der Änderungstrend ΔTN zeigt, dass bis zum Jahr 2050 sowohl in Städten als auch in ländlichen Gebieten mehr Tropennächte (Abb. 16b) vorkommen werden. Besonders stark ist die Zunahme in großen Städten: In Hamburg nimmt die Anzahl der Tropennächte um +0,5 bis +1 Tag/Jahr zu. In ländlichen Gebieten gibt es einen geringeren Anstieg von maximal +1 Tag/Jahr, dabei liegen die Höchstwerte im Lee der beiden großen Städte Hamburg und Bremen.

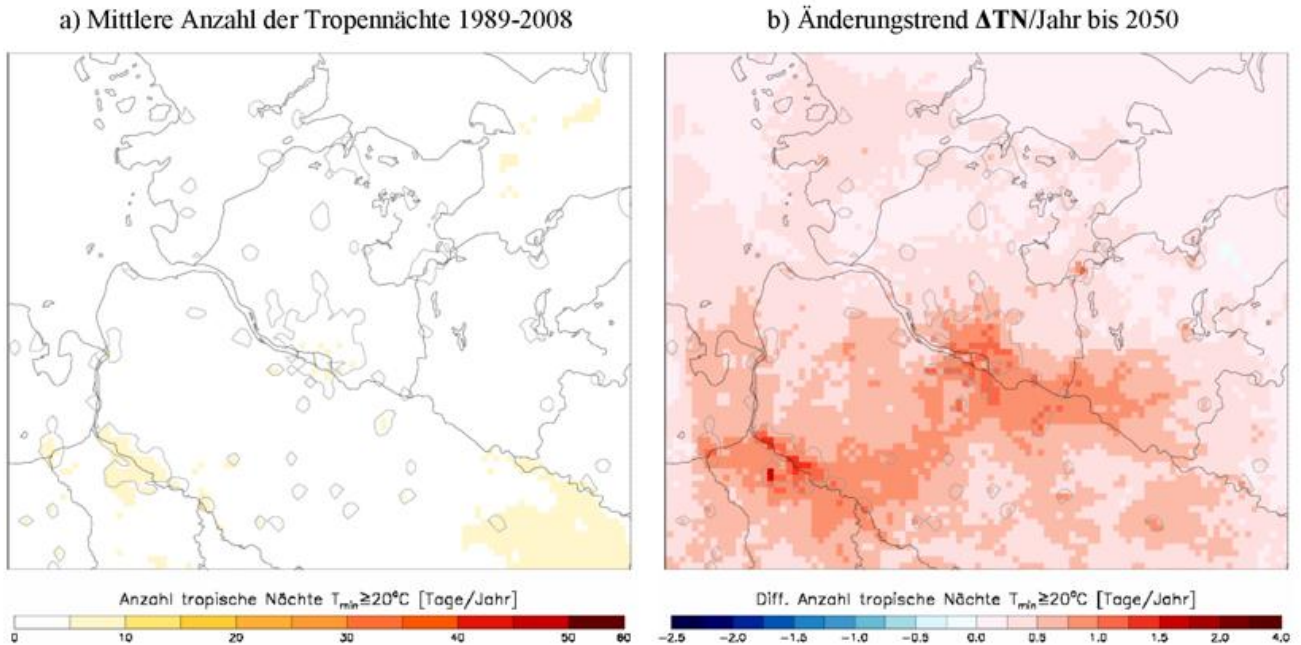


Abb. 16. Modellrechnung: Mittlere jährliche Anzahl der Tropennächte (a) und der projizierte Trend (b).

7.2.4 Episodenrechnungen für „Hamburg“

Im weiterführenden dritten Skalierungsschritt für das Modellgebiet „Hamburg“ finden zwei zusätzliche Datensätze der Landnutzung mit einer deutlich feineren räumlichen Auflösung von ca. 140 m Verwendung (siehe Kapitel 6.4.2 Modellgebiete):

- 1) LU2009 – der aktuelle Flächennutzungszustand für das Jahr 2009 und
- 2) LU2030 – die voraussichtliche Stadtentwicklung für das Jahr 2030.

Um die Auswirkungen der vorgegebenen kleinräumigen Landnutzungsänderungen auf das Klima zu untersuchen, wurden die in Tab. 3 aufgeführten Modellsimulationen durchgeführt.

Tab. 3. Modellsimulationen für das hochaufgelöste Modellgebiet „Hamburg“.

Modellsimulation	Zeitraum (siehe Tab. 1)	Beschreibung
RAIN2009	August 2002	Monat mit starkem Niederschlag unter Verwendung von LU2009
RAIN2030	August 2002	Monat mit starkem Niederschlag unter Verwendung von LU2030
HOT2009	August 2003	Trockner und heißer Monat unter Verwendung von LU2009
HOT2030	August 2003	Trockner und heißer Monat unter Verwendung von LU2030

Die Paare der Modellsimulationen RAIN2009/RAIN2030 und HOT2009/HOT2030 werden verglichen und damit die durch die Landnutzungsänderungen verursachten Temperaturdifferenzen für die Stadt Hamburg quantitativ bestimmt.

Die Modellsimulation HOT2009 zeigt den wärmsten Tag am 11. August 2003. Abb. 17 stellt die 2 m-Temperatur für diesen Tag um 12:00 UTC (14:00 MESZ) dar: Die höchsten Werte sind über dem bebauten Gelände im Stadtzentrum von Hamburg und entlang der Elbe zu finden. Deutlich niedrigere Temperaturen kommen über den Wasserflächen vor.

Die Temperaturdifferenzen für die Modellsimulationen HOT2030-HOT2009 und RAIN2030-RAIN2009 (Abb. 18) werden als Mittel über den ganzen Monat berechnet. Die Temperaturerhöhung bis +0,5 Grad bezieht sich häufig auf die Flächen mit einer Urbanisierung (Wechsel von nicht-urbaner zu urbaner Landnutzung zwischen 2009 und 2030). Die Gebiete mit einer Aufforstung (Wechsel von niedriger Vegetation 2009 zu Flächen mit Baumbestand 2030) weisen eine Abkühlung von -0,2 bis -0,3 Grad auf.

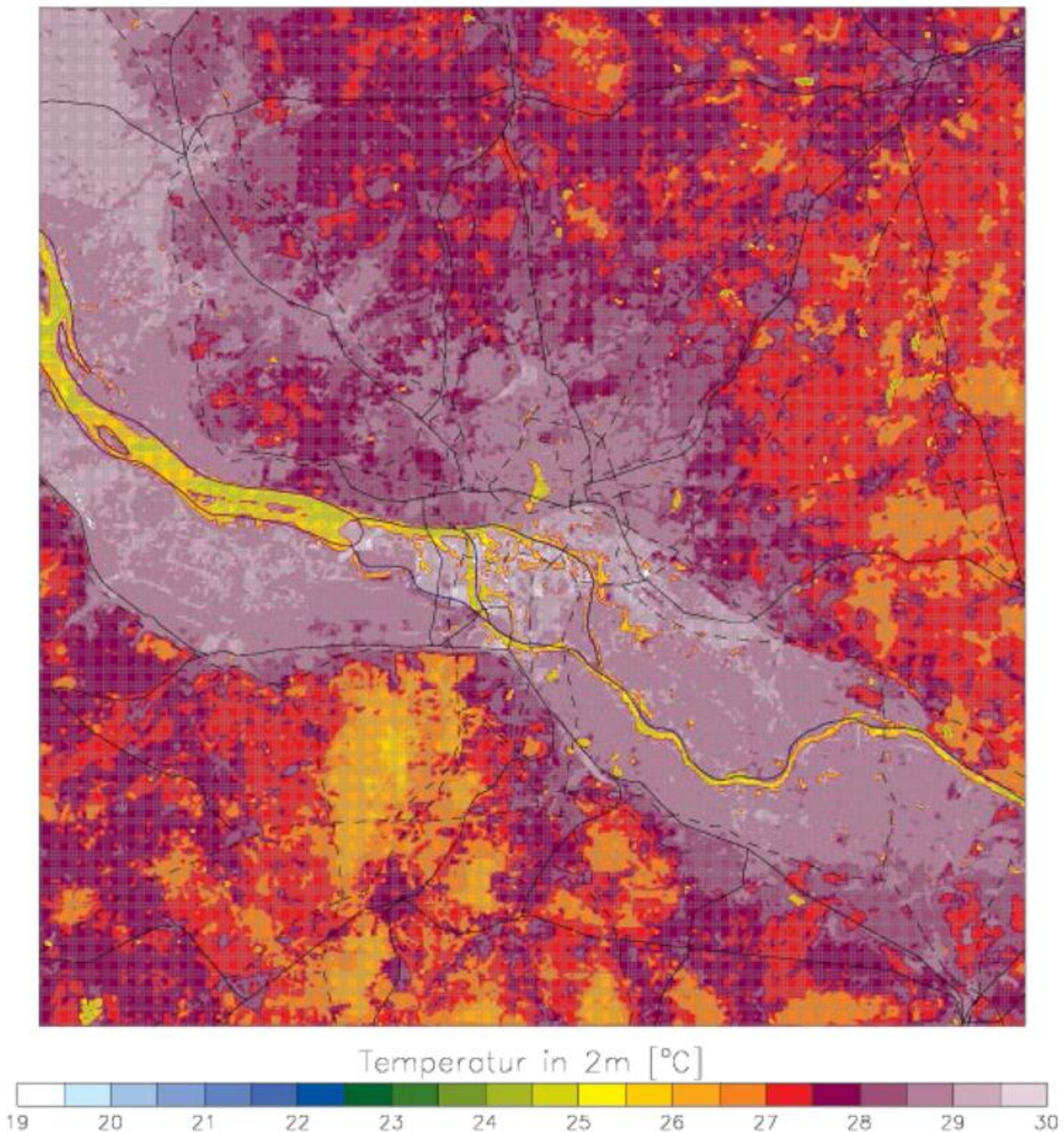


Abb. 17. Modellrechnung: Lufttemperatur in 2 m Höhe über Grund am 11. August 2003 um 12:00 UTC; berechnet mit den Landnutzungsdaten LU2009 (Modellsimulation HOT2009).

a) Mittlere Temperaturdifferenz HOT2030-HOT2009

b) Mittlere Temperaturdifferenz RAIN2030-RAIN2009

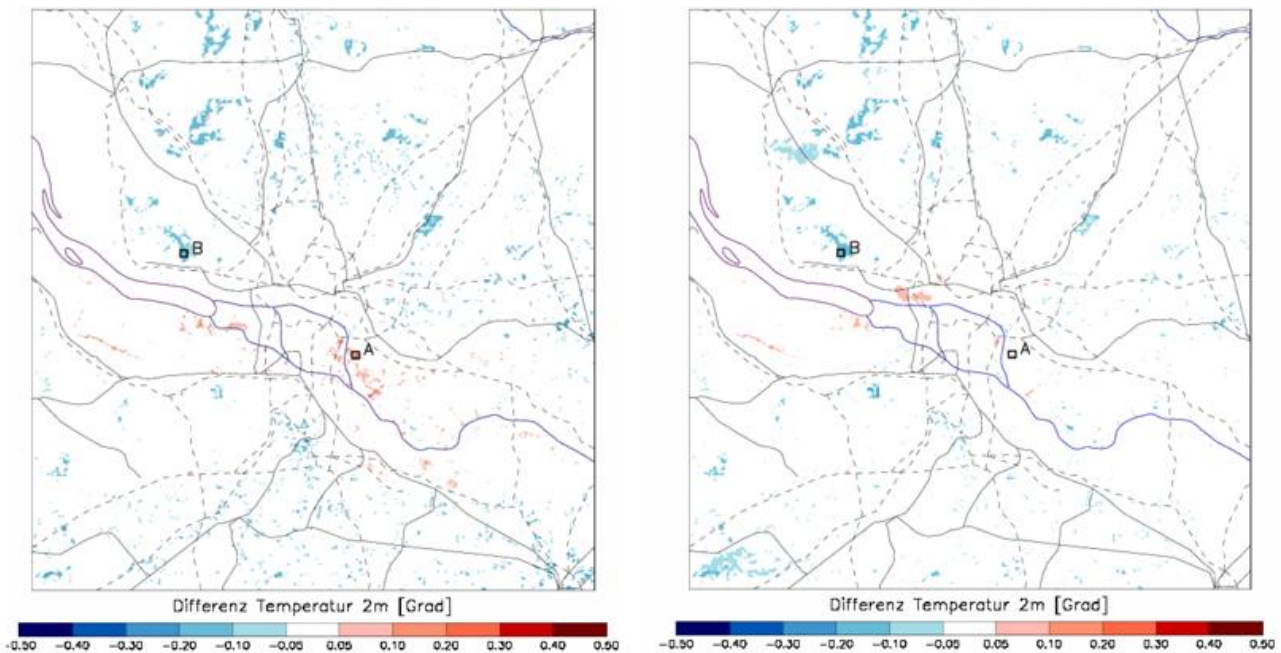


Abb. 18. Modellrechnung: Temperaturdifferenz zwischen Modellsimulationen mit den Landnutzungsdaten für 2009 und 2030 im trockenen heißen Monat (a) und im regenreichen Monat (b).

Die Temperaturerhöhung infolge der urbanen Landnutzung wird in der Natur und im Modell durch die folgenden drei Prozesse beschrieben:

- 1) Gebäudematerialien (z.B. dunkle Fassaden, Dachziegel etc.) haben geringere Albedo-Werte (Rückstrahlvermögen) als natürliche Landoberflächen (z.B. Gras) und absorbieren dadurch eine größere Menge der Sonneneinstrahlung;
- 2) Gebäude speichern mehr Wärme durch ihre erhöhte Wärmekapazität als natürliche Landoberflächen;
- 3) Die für Wasser undurchlässigen versiegelten Flächen verhindern die Abkühlung durch Wasserverdunstung;

Nicht im Modell berücksichtigt wird der Effekt, dass Straßenschluchten die solare Einstrahlung umfassender „einfangen“ als Vegetation (Mehrfachreflektionen von Wänden, Straße etc.).

Die Temperaturerhöhung durch den Zuwachs an urbanen Flächen ist im heißen, trockenen Sommermonat (Abb. 18a) höher als im niederschlagreichen Sommermonat (Abb. 18b), da sich die urbanen Oberflächen bei wolkenfreien Bedingungen mit intensiverer Sonneneinstrahlung stärker erwärmen als an Tagen mit starker Bewölkung und Regen, an denen nur ein geringer Anteil der Sonnenstrahlung den Boden erreicht.

Die durch Bäume verursachte Abkühlung erfolgt sowohl bei trockenheißer Witterung als auch bei regenreichen Bedingungen in gleichem Ausmaß (Abb. 18). Sie wird in der Natur und im Modell durch folgende drei Prozesse „gesteuert“:

- 1) Baumkronen lassen einen geringeren Anteil der Sonneneinstrahlung den Boden erreichen (Abschattung) als niedrige Vegetation;
- 2) Baumkronen speichern mehr Feuchte mit einer erhöhten Abkühlung durch Verdunstung;

- 3) Bäume haben tiefere Wurzeln als andere Vegetationsarten und extrahieren damit mehr für die Verdunstung zur Verfügung stehendes Wasser aus tieferen Bodenschichten wenn die Bodenoberfläche selbst trocken ist.

In den Modellsimulationen findet allerdings der Schatteneffekt durch die Bäume keine Berücksichtigung.

Diese Gegebenheiten begünstigen die Wasserverfügbarkeit für abkühlend wirkende Verdunstungsprozesse in urbaner Umgebung und kommen so vor allem an trockenheißen Tagen zum Tragen, wodurch sich beide Szenarien trockenheiß und nass in ihren Ergebnissen annähern.

Um die durch den Landnutzungswechsel bedingten Änderungen im Tagesgang der Lufttemperatur aufzuzeigen, wurden im Modellgebiet zwei repräsentative Standorte ausgewählt (Abb. 18, Quadrate A und B):

- Der Standort A weist 2009 niedrige Vegetation (keine Bäume) und 2030 eine versiegelte Fläche durch Stadtverdichtung auf.
- Am Standort B wird die 2009 bestehende niedrige Vegetation (keine Bäume) 2030 in eine Waldfläche umgewidmet.

Abb. 19 demonstriert den durch den Landnutzungswechsel geänderten Temperaturtagesgang an den beiden Standorten A und B. Die Temperaturänderungen werden für beide Standorte anhand von 5 Modellgitterzellen bestimmt.

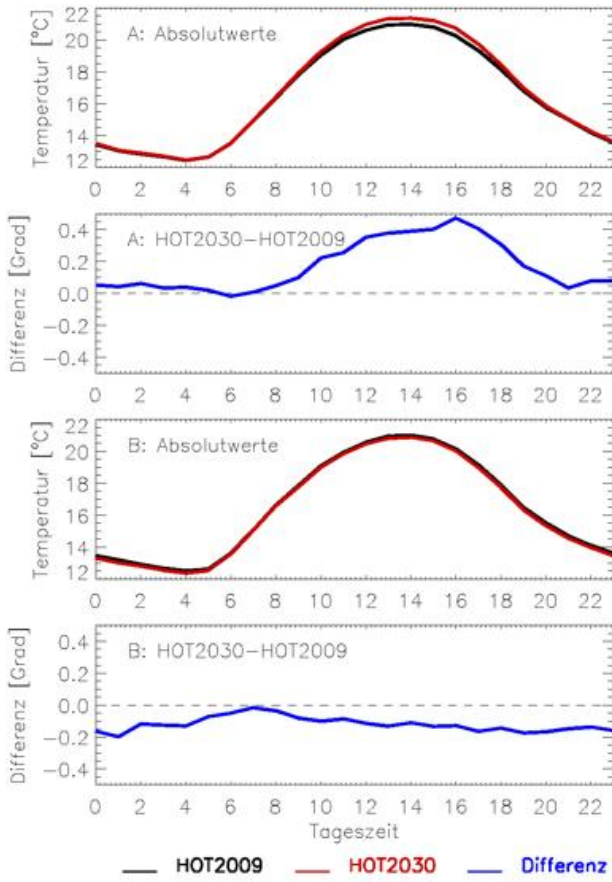
Der Landnutzungswechsel am Standort A („Vegetation“ zu „Stadt“) führt im trockenheißen Monat zu allen Tageszeiten zu einer Temperaturzunahme von bis zu +0,5 Grad (16:00 UTC entsprechend 18 MESZ); im regenreichen Monat bleibt die Temperaturänderung mit -0,1 bis +0,3 Grad gering.

Der Landnutzungswechsel am Standort B („niedrige Vegetation“ zu „Wald“) zeigt im trocken-heißen Monat sowie im regenreichen Monat eine Abkühlung von bis zu -0,2 Grad.

Aus der Analyse dieser Beispielrechnungen können für Hamburg folgende Schlussfolgerungen formuliert werden:

- Die Landnutzungsänderung von „Vegetation“ zu „Stadt“ führt zu einer Verschärfung des Hitzestresses an trockenen und heißen Tagen; an Regentagen ist dieser Effekt eher gering;
- Die Ausweitung von Waldflächen bietet unter den angegebenen Rahmenbedingungen sowohl an Sonnen- als auch an Regentagen eine geringe aber nachhaltige Minderung des Hitzestresses. Da im Modell die Schattenwirkungen unberücksichtigt bleiben, könnten sie zu einer weiteren Abkühlung führen.

a) Modellsimulationen HOT2009 und HOT2030



b) Modellsimulationen RAIN2009 und RAIN2030

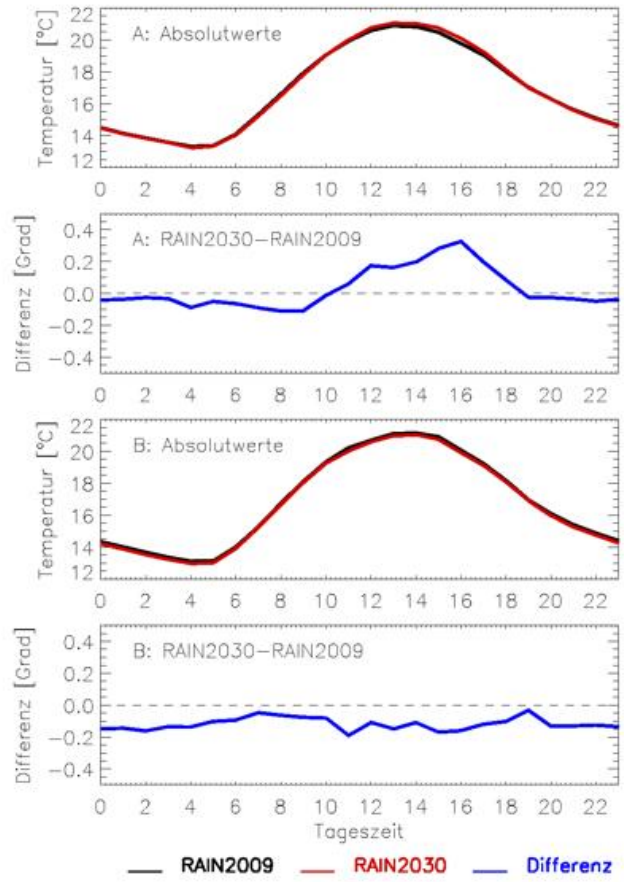


Abb. 19. Modellrechnung: Mittlerer monatlicher Tagesgang der Lufttemperatur an den Punkten A und B im trockenheißen Monat (a) und im regenreichen Monat (b).

7.2.5 Kurzfassung der Ergebnisse für die Klimavariablen Lufttemperatur

Vergangenheit

- 1) In der Vergangenheit stiegen von 1881 bis 2013 die Temperaturen in Hamburg im Mittel um +1,4 Grad an (ca. 1 Grad/100 Jahre), dabei wurde die stärkste Temperaturzunahme im Frühjahr und die geringste im Herbst festgestellt.

Zukunft

- 2) Laut der den Modellrechnungen bis 2050 steigen die Lufttemperaturen in der Region Hamburg weiter mit ca. +1,3 Grad/100 Jahre mit der deutlichsten Temperaturzunahme von bis zu +1,2 Grad im Herbst, gefolgt vom Sommer mit bis zu +0,6 Grad.
- 3) Die mittlere jährliche Anzahl der Sommertage nimmt zu, stärker in ländlichen Gegenden Norddeutschlands.
- 4) Die mittlere jährliche Anzahl der heißen Tage nimmt in Stadtgebieten am deutlichsten zu (bis zu +4 Tage).
- 5) Die mittlere jährliche Anzahl der Tropennächte nimmt in Stadtgebieten bis zu +1,5 Tage zu.

Landnutzungsänderung

- 6) Weiterführende Sensitivitätsrechnungen zur Landnutzungsänderung auf einer räumlichen Skala von 140 m zeigen das Folgende auf:
- 7) Auch kleinräumige Neubebauungen (statt niedriger Vegetation) führen in trockenen und heißen Sommermonaten zu Erhöhung der mittleren monatlichen Lufttemperatur bis zu +0,5 Grad; diese Änderung kann in Abhängigkeit des Bebauungstyps stärker ausfallen. In regenreichen Sommermonaten ist kaum eine Erwärmung spürbar.
- 8) Die Aufforstung von Wald (statt niedriger Vegetation) bietet in den Sommermonaten bei unterschiedlichen Wetterbedingungen gleichermaßen eine moderate jedoch nachhaltige zusätzliche Abkühlung zwischen ca. -0,2 bis -0,3 Grad.

7.3 Niederschlag

7.3.1 Historische Entwicklung

Das Gebietsmittel Hamburg zeigt für die Jahressummen des Niederschlages einen ansteigenden Trend, so wie er auch für Deutschland zu verzeichnen ist (Abb. 20). Für den Bereich Hamburg macht er über die Zeitspanne 1881 bis 2013 etwa 120 mm aus (deutschlandweit ca. 80 mm). Hinsichtlich der Vergleichsperioden 1961-1990 und 1981-2010 ergibt sich für die mittleren 30-jährigen Niederschlagssummen ein Anstieg von 750 mm auf 785 mm von der früheren zur aktuellen Periode. Im Zeitraum 1831 bis 2013 variierte die Jahressumme des Niederschlags zwischen 409 mm (1959) und 1043 mm (2007).

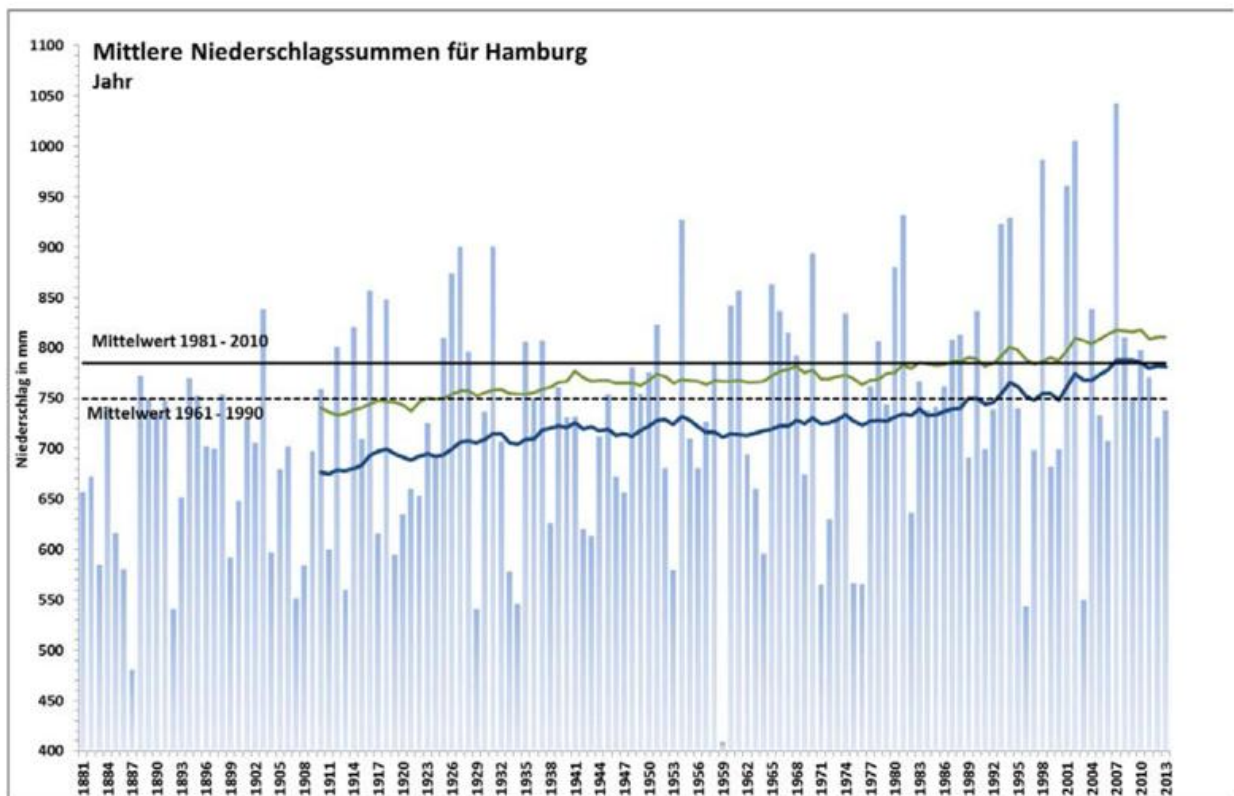


Abb. 20. Messdaten: Es wird nasser in Hamburg. Die Grafik zeigt die Jahresniederschlagssummen von 1881-2013 für Hamburg (blaue Säulen). Die dicke blaue Linie stellt den langfristigen Trend als 30-jähriges gleitendes Mittel dar. Zum Vergleich ist das 30-jährige gleitende Mittel für Deutschland (dicke grüne Linie) gezeigt. Die schwarzen Linien kennzeichnen den Mittelwert der Referenzperioden 1961-1990 (gestrichelt) und 1981-2010 (ausgezogen) für Hamburg.

Auf die Jahreszeiten bezogen trägt insbesondere der Winter mit einem Plus von knapp +60 mm und damit zu fast 50 % zu diesem Anstieg bei (Abb. 21). Die Anteile der anderen Jahreszeiten fallen entsprechend mit +30 mm (Herbst), +19 mm (Frühjahr) und +16 mm (Sommer) deutlich moderater aus. Am kräftigsten schwanken die jahreszeitlichen Niederschlagssummen im Sommer mit einer Spanne von etwa 50 mm bis etwa 400 mm.

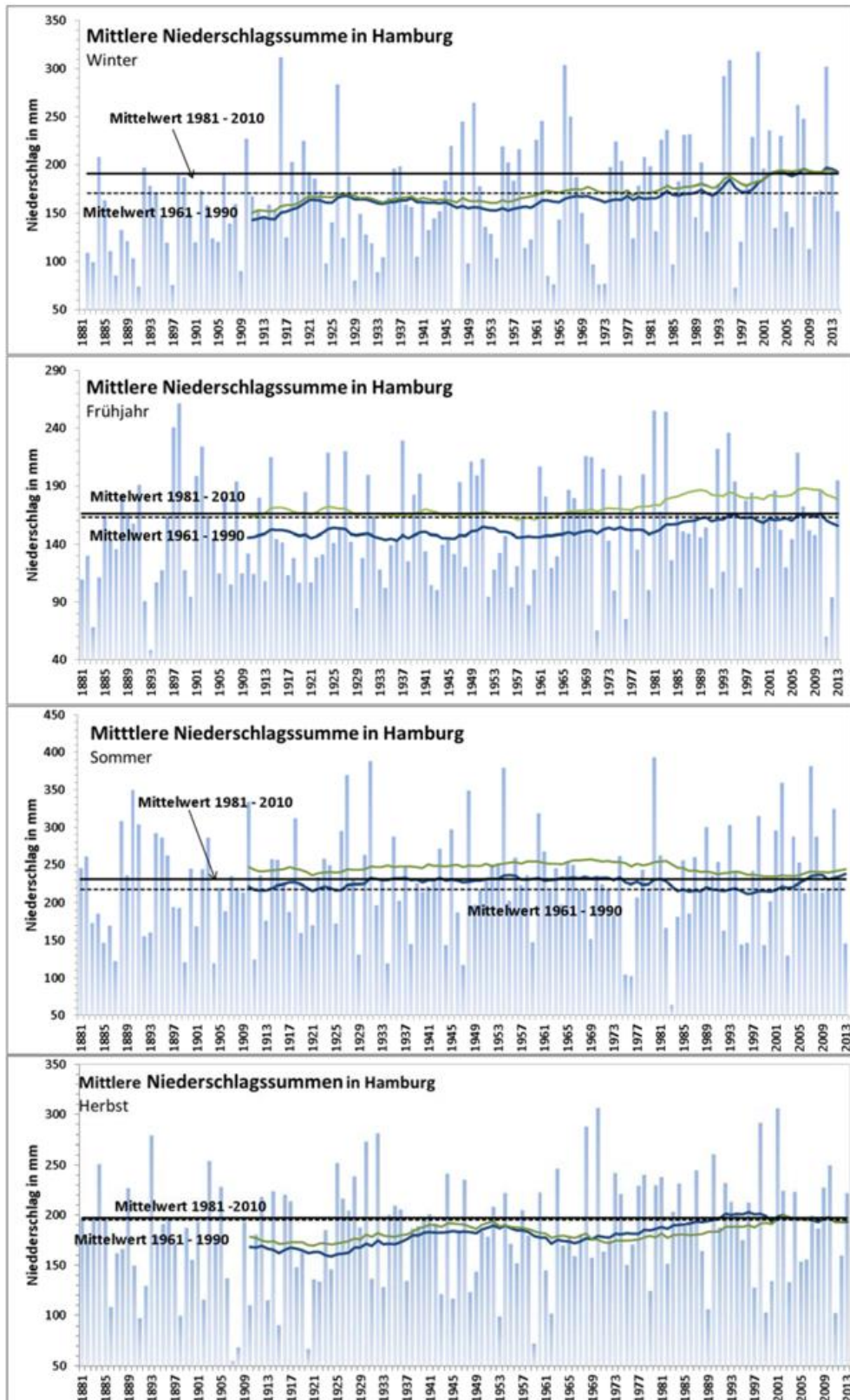


Abb. 21. Messdaten: Jahreszeitliche Niederschlagssummen in Hamburg (Legende entsprechend Abb. 20).

Die Abb. 21 zeigt die jahreszeitlichen Niederschläge für Hamburg seit 1881. Mit einer leichten Unterbrechung von etwa 1930 bis etwa 1955 ist für den Winter eher ein recht kontinuierlicher Anstieg der Niederschlagssummen zu beobachten. Für die Frühjahre lassen sich aus der Grafik bis etwa 1965 recht gleichbleibende Niederschlagsverhältnisse entnehmen, ebenso ab etwa 1990 mit einem dazwischen liegenden Anstieg. Der Sommer zeigt von etwa 1930 bis 1980 ein leicht höheres Niederschlagsniveau im Verlauf des 30-jährigen, gleitenden Mittels. Ein auffälligeres Auf und Ab ist für den Herbst auszumachen: Maxima im gleitenden Mittel sind um 1950 sowie um 1995 gegeben, wobei Letzteres die höheren Werte aufweist. Generell liegt der 30-jährige, jahreszeitliche Mittelwert 1981-2010 über dem der Bezugsperiode 1961-1990: Frühjahr 166 mm (163 mm), Sommer 231 mm (218 mm), Herbst 197 mm (195 mm) und Winter 191 mm (171 mm).

7.3.2 Analyse der Modellsimulationen für „Norddeutschland“

Die Evaluierung der Klimavariablen Niederschlag ist mit größeren Schwierigkeiten verbunden. In der Realität nimmt Niederschlag viele verschiedene Formen an - Regen, Sprühregen, Schnee, Hagel, Nebelnässen, Reif - und ist dazu noch hoch variabel hinsichtlich Ausdehnung, Intensität und Quantität. Ein Modell nutzt komplexe Parametrisierungen der Kondensation des Wasserdampfes zu Wolken und dann zu Niederschlägen. Dabei ist ein großer Teil der natürlichen Abläufe zu kleinräumig, um direkt modelliert werden zu können, so dass die Modelle auf zahlreiche Approximationen zurückgreifen müssen. Dies führt dazu, dass sie die Intensität und räumliche Verteilung des Niederschlages eher ungenau wiedergeben. Aus diesem Grund werden die Modellwerte nicht direkt mit Messungen verglichen, sondern als mittlere, jahreszeitliche Monatswerte.

Die Evaluierung der modellierten Niederschlagsmengen erfolgt üblicherweise als Vergleich aus Modell- und Messdaten, der über eine bestimmte Zeitperiode akkumulierten Niederschlagssummen. Um die korrekten Niederschlagssummen aus Messdaten bilden zu können, ist eine lückenlose Messreihe von besonderer Bedeutung. Modellwerte weisen bei korrektem Modellablauf keine Lücken auf. Die Niederschlagsbeobachtungen über die gesamte Evaluierungsperiode 1989-2008 weisen viele Lücken auf. Aus diesem Grund werden nicht die 20-jährigen Modellmittelwerte (Evaluierungslauf 1989-2008) mit den entsprechenden Messwerten verglichen, sondern es werden im Folgenden kürzere Zeiträume (5 Jahre) zum Vergleich betrachtet: 1989-1993, 1994-1998, 1999-2003 und 2004-2008. Aus den Modell- und Messdaten werden für diese 5-jährigen Perioden jeweils mittlere monatliche Summen gebildet und jahreszeitlich zusammengefasst dargestellt (Abb. 22).

Das Modell unterschätzt den Niederschlag (Abb. 22) insbesondere im Sommer. Die geringste Differenz zwischen Modellergebnis und Messung tritt im Frühjahr auf. Die Unterschiede fallen besonders deutlich in den Sommern 1989-1993 und 1999-2003 aus. Dieses kann zwei Gründe haben. Zum einen ist die grobe räumliche Modellauflösung zu beachten: Das Modell berechnet den Niederschlag für eine 2,8 km × 2,8 km große Gitterzelle, in der die atmosphärischen Eigenschaften räumlich homogen parametrisiert sind, während der gemessene Niederschlag eine Punktfeststellung ist. Lokalen Niederschlagsereignisse, wie Schauer oder Gewitter, werden im Modellgitter gar nicht oder nur mit schwächerer Intensität simuliert. Zum anderen ist zu berücksichtigen, dass das Modell noch nicht ausreichend die Bildung von konvektivem Niederschlag berechnen kann: Parametrisierungen der vertikalen Luftbewegung und der Wolkenbildung werden nur ungenau in der regionalen Klimamodellierung abgebildet.

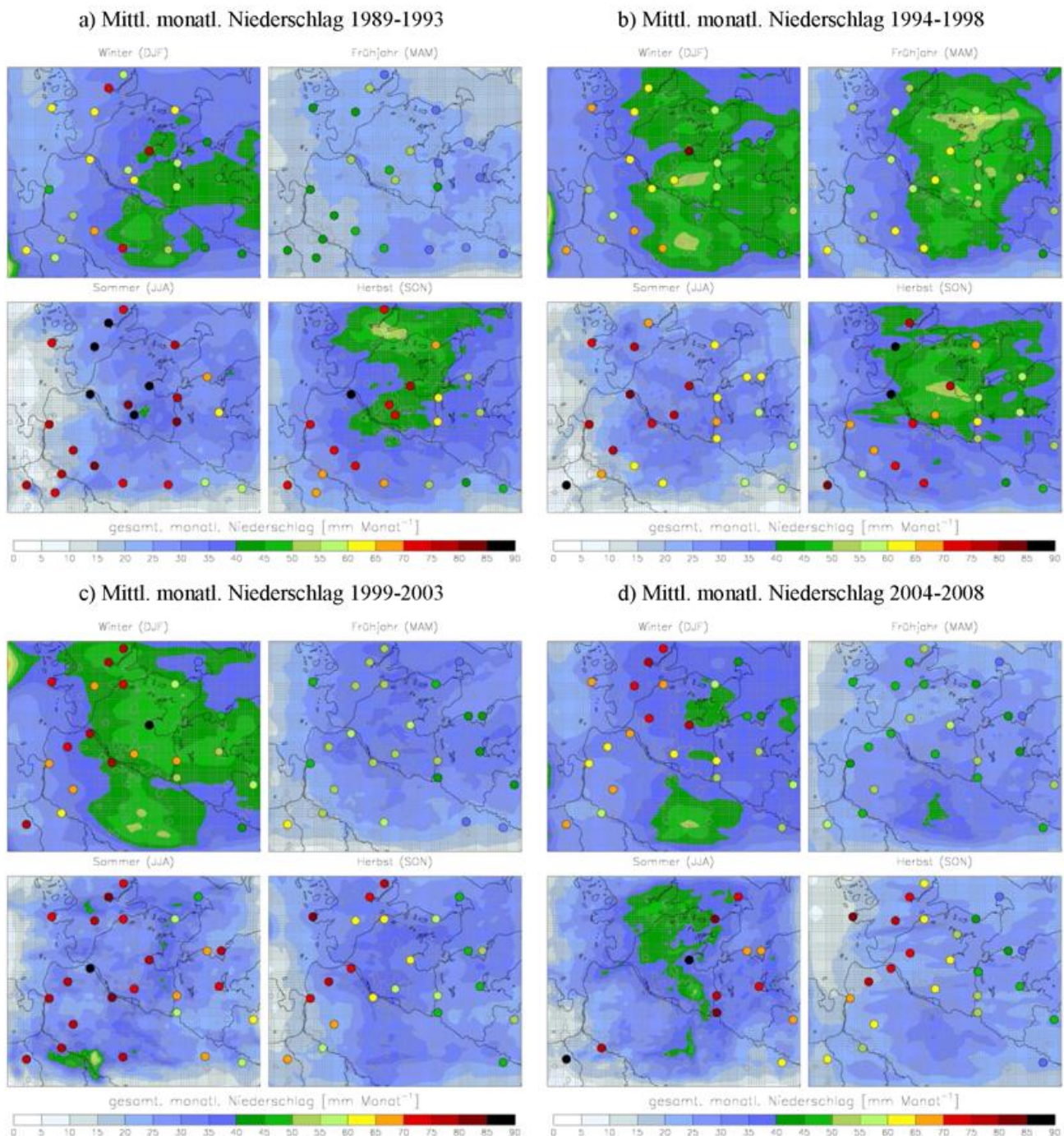


Abb. 22. Modellrechnung vs. Messdaten: Vergleich des mittleren monatlichen Niederschlags (gemittelt für Jahreszeiten) mit den Messdaten für vier 5-Jahres Perioden. Kreise markieren die Messorte, die Farbe des Kreises entspricht dem Wert auf der Farbskala.

Obwohl das Klimamodell den Niederschlag unterschätzt, enthält es physikalische Zusammenhänge, die zu Niederschlagsbildung über komplexem Gelände und über inhomogen aufgewärmter Landoberfläche führen. Das Modell kann also für die Abschätzung von Niederschlagsänderungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel angewandt werden, nicht aber für die Darstellung von Absolutwerten. Dennoch können die wichtigen Effekte einer Stadt auf die Atmosphäre, wie z. B. die der urbanen Wärmeinsel, berücksichtigt werden.

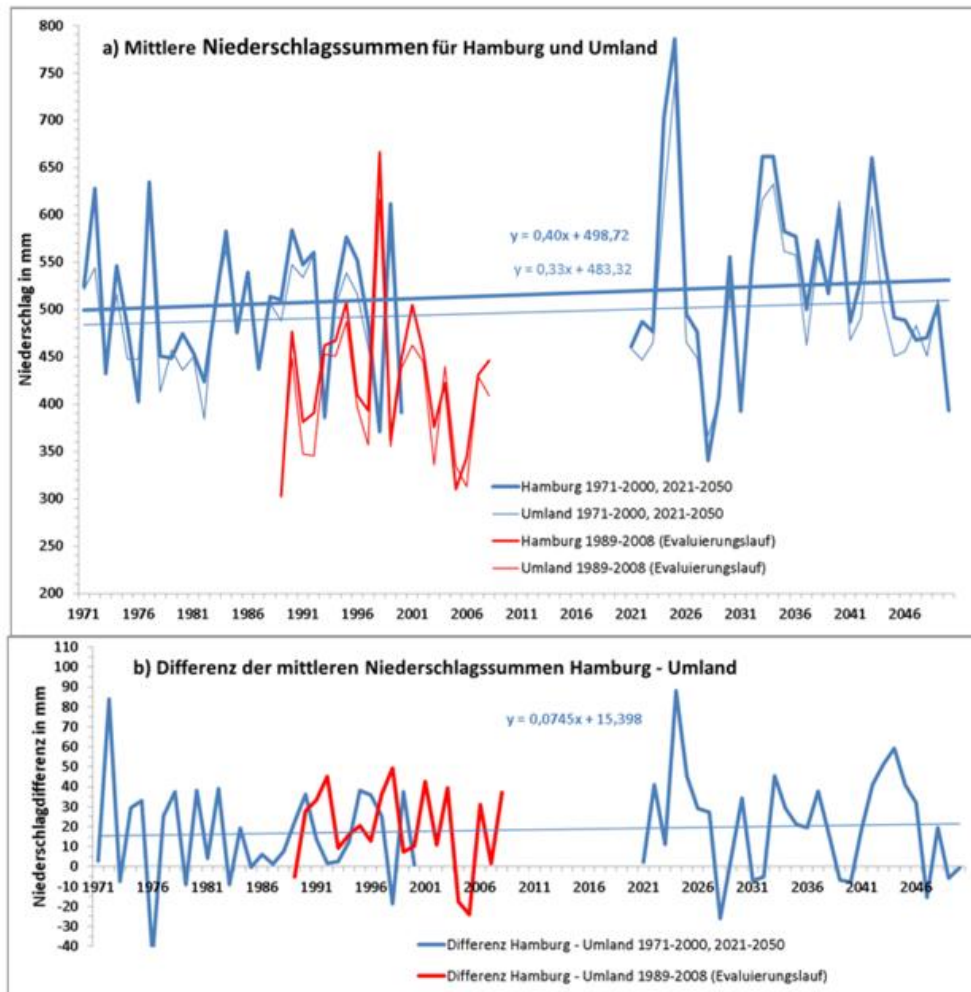


Abb. 23. Modellrechnungen: Entwicklung der jährlichen Niederschlagssumme mit linearen Trends (a) und der Differenz zwischen Stadt und Umgebung mit Trends (b).

Die Modellsimulationen zeigen für die Zukunft bis 2050 eine weitere Zunahme des Niederschlags (Abb. 23), wobei dieser Anstieg für Hamburg (+40 mm/100 Jahre) etwas stärker ausfällt als für das Umland (+33 mm/100 Jahre).

Die Niederschlagstrends für das Stadtgebiet und das Umland machen sichtbar, dass es bis zum Jahr 2050 in der Region „Norddeutschland“ insgesamt mehr Niederschlag mit verstärktem Niederschlagzuwachs in der Stadt gibt. Die Signifikanz dieser Aussage lässt sich allerdings wegen einer zu geringen Datenmenge an jährlichen Niederschlagssummen nicht prüfen.

Der Jahresgang des Niederschlags ändert sich bis 2050 (Abb. 24): Im März, Juli und August wird eine Abnahme und von April bis Juni sowie im September Oktober, Dezember und im Februar eine starke Niederschlagzunahme prognostiziert. Daraus lässt sich schließen, dass das spätere Frühjahr und der Herbst zukünftig regenreicher ausfallen werden und die Zeitspanne Juli bis August trockener wird. Diese Trends zeichnen sich generell sowohl für das Stadtgebiet als auch für das Umland ab.

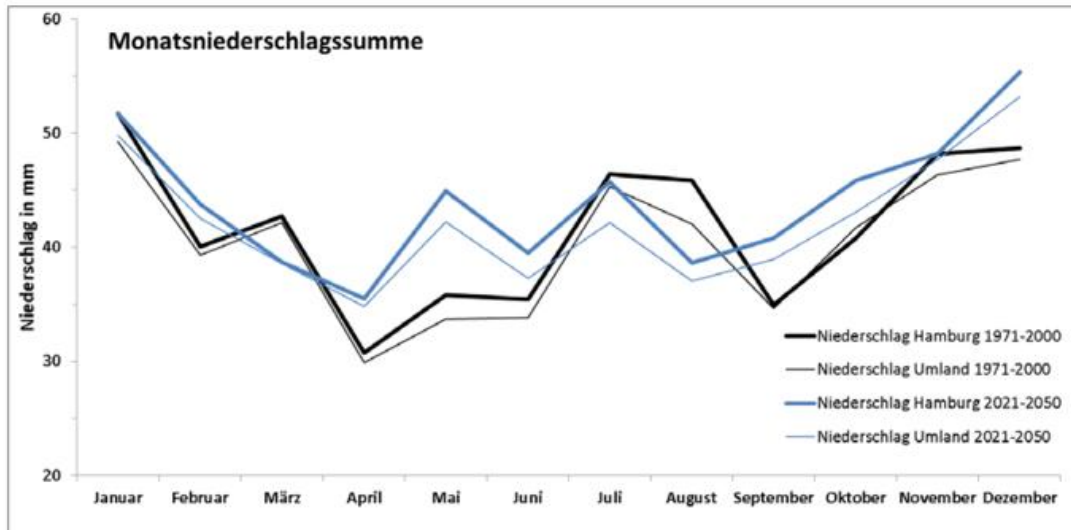


Abb. 24. Modellrechnung: Mittlere monatliche Niederschlagssummen aus dem Referenzlauf (schwarz) und dem Projektionslauf (blau). Der mittlere Jahrgang wurde aus 30 Jahren der entsprechenden Modellsimulation für „Hamburg“ und für das „Umland“ berechnet.

Die Ergebnisse der Modellsimulationen für die Evaluierungsperiode werden für vier Jahreszeiten in Abb. 25a gezeigt. Der Niederschlag variiert räumlich in Bezug auf den in der Stadt Hamburg häufig vorkommenden Wind aus West bis Südwest, siehe Windpfeile in Abb. 25a) und über den Harburger Bergen. Nur im Frühjahr gibt es keine erkennbare Niederschlagsänderung, die einem Stadt- (HOFFMANN, P. 2009) bzw. Orographieeffekt zugeordnet werden könnte.

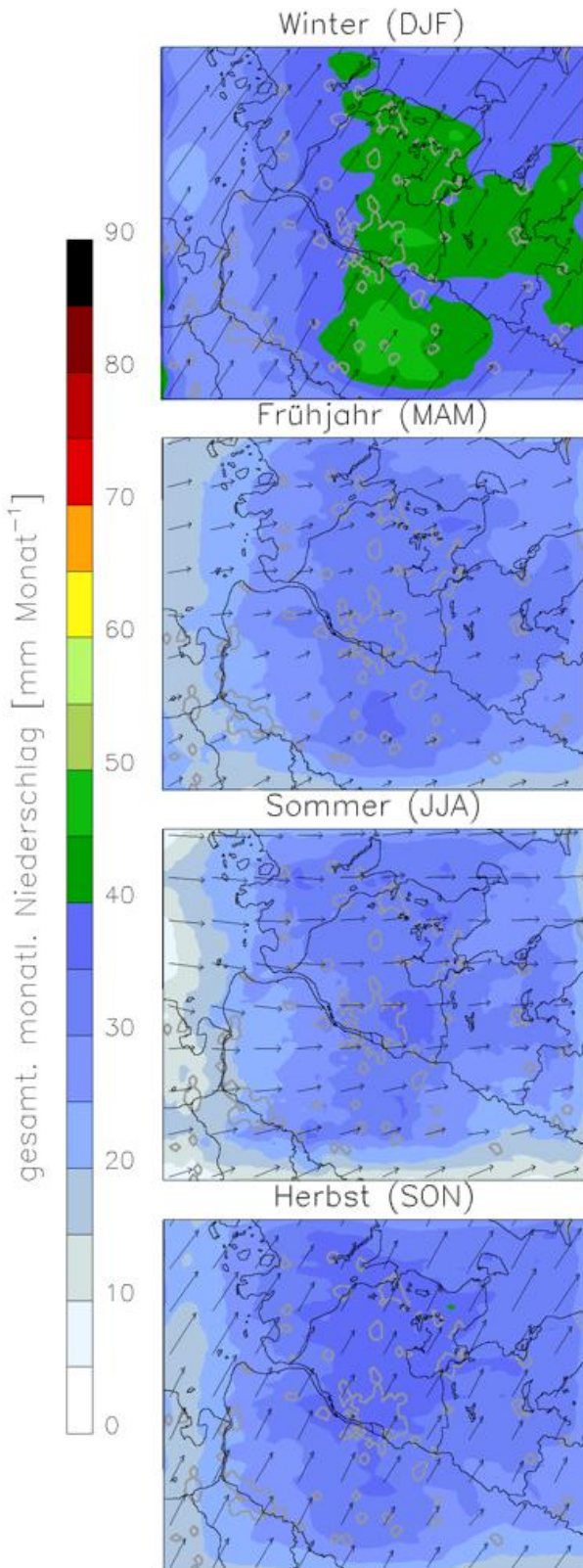
Die mit dem Klimaszenario projizierte Niederschlagsänderung wird als Differenz zwischen den gemittelten monatlichen Niederschlagssummen der Projektions- und Referenzperiode ermittelt:

$$\Delta R = R_{\text{Projektionsperiode}} - R_{\text{Referenzperiode}}$$

Die Niederschlagsänderung ΔR für das Modellgebiet „Norddeutschland“ zeigt eine Zunahme im Winter, Frühjahr und Herbst, die im Mittel über Norddeutschland +2 bis +4 mm/Monat beträgt, lokal aber auch über 10 mm/Monat (Abb. 25b) erreichen kann. Im Sommer wird eine Niederschlagsabnahme von -1,4 mm/Monat als Mittel über das Gesamtgebiet festgestellt; lokal kann sie bis über -10 mm/Monat ausmachen.

Für die Stadt Hamburg ist der gleiche Trend wie für das ganze Modellgebiet „Norddeutschland“ zu beobachten: Der Sommer fällt trockener und die anderen Jahreszeiten niederschlagsreicher aus, besonders der Winter und das Frühjahr. Die Niederschlagszunahme für das Stadtzentrum Hamburg wird auf +2 bis +4 mm/Monat für Winter, Frühjahr und Herbst und auf -1,4 mm/Monat (Flächenmittel) für den Sommer abgeschätzt.

a) Mittlerer Niederschlag und Windrichtung 1989-2008



b) Änderung ΔR bis 2050

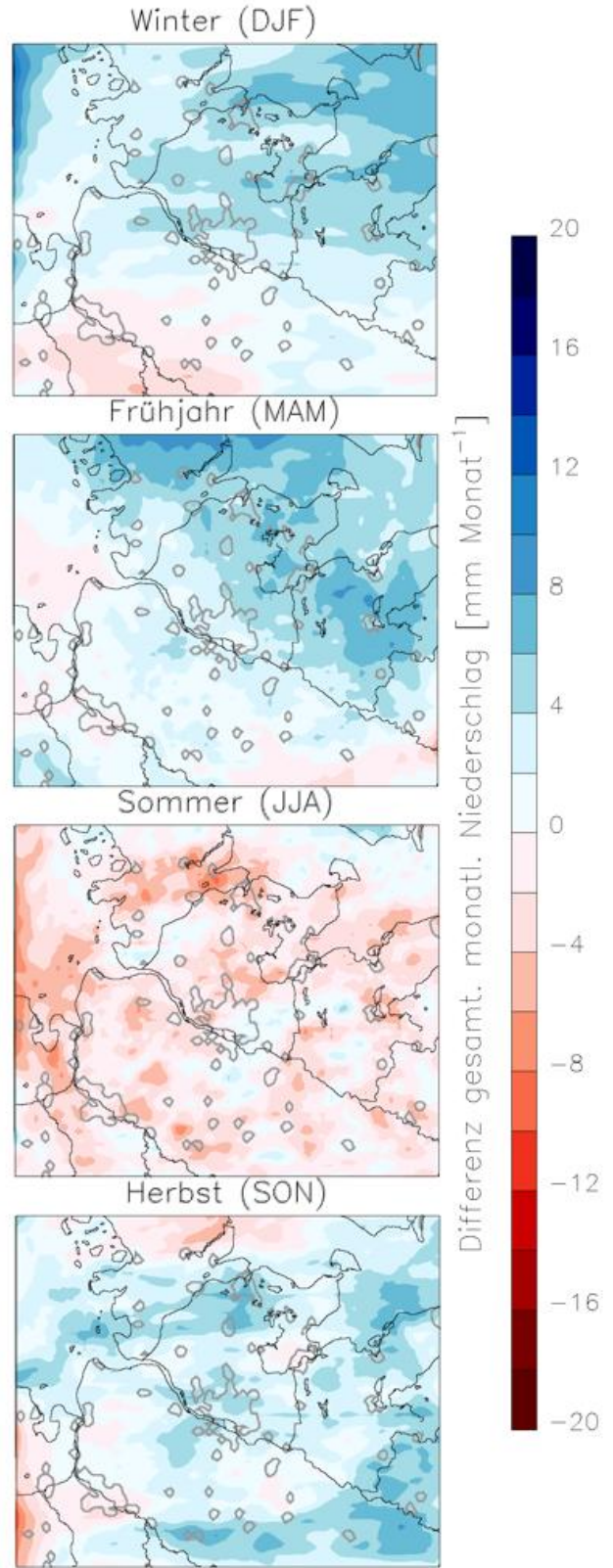


Abb. 25. Modellrechnung: Mittlere monatliche Niederschlagssumme mit Windrichtung (a) und die projizierte Niederschlagsänderung (b) für Jahreszeiten.

7.3.3 Starkniederschlag

Von besonderer Bedeutung ist die Betrachtung der Entwicklung von Starkniederschlägen. Zu einer diesbezüglichen Abschätzung kann der Kenntag mit einer Tagessumme des Niederschlages ≥ 20 mm herangezogen werden (Abb. 26). Allerdings ist zu bemerken, dass der Niederschlag und insbesondere der kurzzeitige sommerliche Niederschlag in Form von Schauern und Gewittern meist nur ein recht kleinräumiges Intensitätsmaximum aufweist und diese Niederschläge durch das bestehende Messnetz wie auch durch die Modellsimulationen nur unzureichend erfasst werden. Hier werden zukünftig die Auswertungen des Niederschlagsradars zu einer deutlichen Informationsverbesserung führen (z.B. Radolan www.dwd.de/RADOLAN: RADAR OnLine ANeichung von Niederschlägen).

Von Starkregen (bzw. Starkniederschlag in flüssiger Form) spricht man bei großen Niederschlagsmengen pro Zeiteinheit. Er fällt in warmen Jahreszeiten meist aus konvektiver Bewölkung. Die Abschätzung der Häufigkeit von Starkregeneignissen ist von besonderer Bedeutung, da Starkregen zu schnell ansteigenden Wasserständen und Überschwemmungen führen kann. In diesem Bericht wird der Starkniederschlag mit Hilfe der drei Schwellenwerte betrachtet:

Regenmenge ≥ 10 | ≥ 20 | ≥ 30 mm/Tag

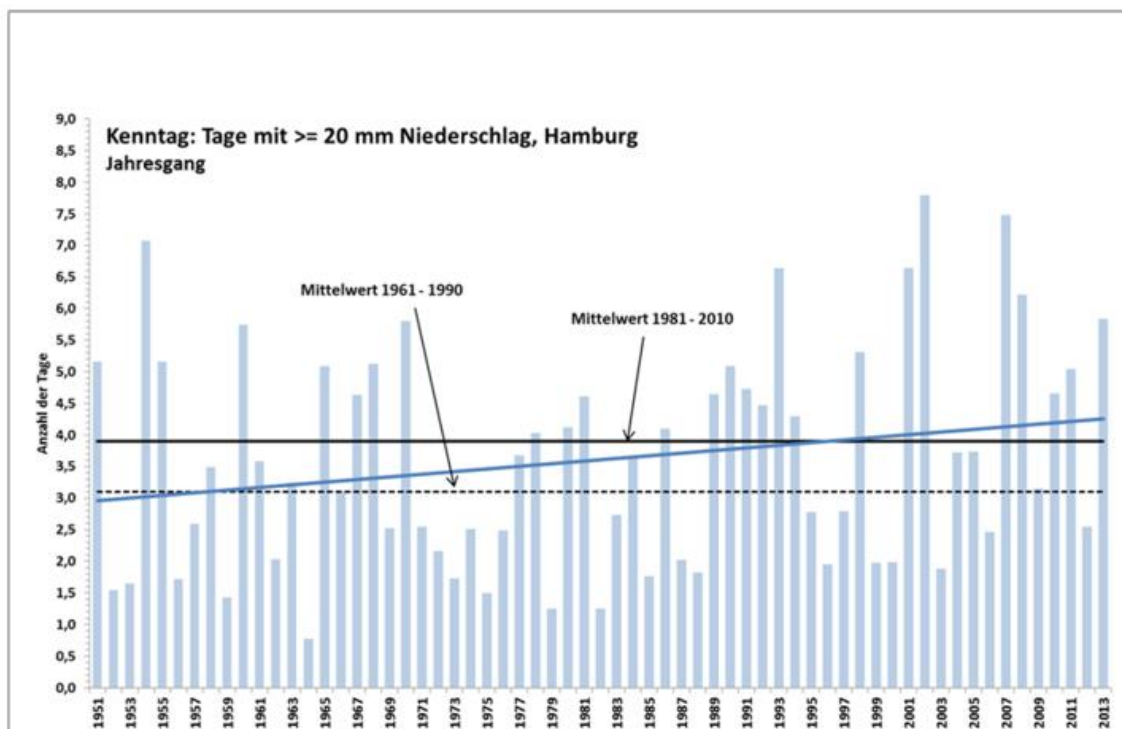


Abb. 26. Messdaten: Die Starkregentage steigen in Hamburg an. Die Grafik stellt die Anzahl der jährlichen Starkregentage von 1951 bis 2013 sowie den linearen Trend dar. Die schwarzen Linien kennzeichnen den Mittelwert der Referenzperioden 1961 bis 1990 (gestrichelt) und 1981 bis 2010 (ausgezogen) für Hamburg.

In der historischen Darstellung soll nur der Fall einer Niederschlagssumme von ≥ 20 mm/Tag verfolgt werden (Abb. 26). Während der Zeitspanne von 1951 bis 2013 betrug die größte Anzahl derartiger Niederschlagstage pro Jahr in Hamburg (Flächenmittel) 8 Tage im Jahr 2002. Es ist bislang nicht vorgekommen, dass in einem Jahr kein Tag mit einer Niederschlagssumme ≥ 20 mm irgendwo in Hamburg aufgetreten ist. Der mittlere Anstieg dieses Kenntages von 1951 bis 2013 ist im Hamburger Flächenmittel mit gut einem Tag anzugeben. Diese Zunahme lässt sich auch aus einem Vergleich der beiden

Bezugsperioden 1961-1990 und 1981-2010 entnehmen. Danach ergeben sich für die alte Periode 3,1 Tage gegenüber 3,9 Starkniederschlagstagen für die aktuelle Zeitspanne.

Als Folge der systematischen Unterschätzung des Niederschlags liefert das Modell auch eine zu geringe Anzahl von Tagen mit Starkniederschlag. Tab. 4 verdeutlicht diesen Umstand: Für Hamburg werden nur ca. halb so viele Tage mit ≥ 10 mm bzw. mit ≥ 20 mm berechnet als beobachtet, für das Umland nur ca. ein Drittel. Dieses Modellverhalten ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen: Die projizierten Änderungen können in der Realität stärker ausfallen.

Tab. 4. Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 10 , ≥ 20 und ≥ 30 mm/Tag für die Stadt Hamburg und das Umland ausgerechnet aus Mess- und Modelldaten für die Evaluierungsperiode 1989-2008.

Anzahl Tage [Tage/Jahr]	Hamburg		Umland	
	Messwerte	Modell	Messwerte*	Modell
Min. Anzahl mit 10 mm/Tag	14	7	13	5
Mittl. Anzahl mit 10 mm/Tag	21	9	22	8
Max. Anzahl mit 10 mm/Tag	30	11	30	11
Min. Anzahl mit 20 mm/Tag	2	1	2	0
Mittl. Anzahl mit 20 mm/Tag	4	2	4	1
Max. Anzahl mit 20 mm/Tag	8	3	7	3
Min. Anzahl mit 30 mm/Tag	0	0	0	0
Mittl. Anzahl mit 30 mm/Tag	1	0	1	0
Max. Anzahl mit 30 mm/Tag	3	1	3	1

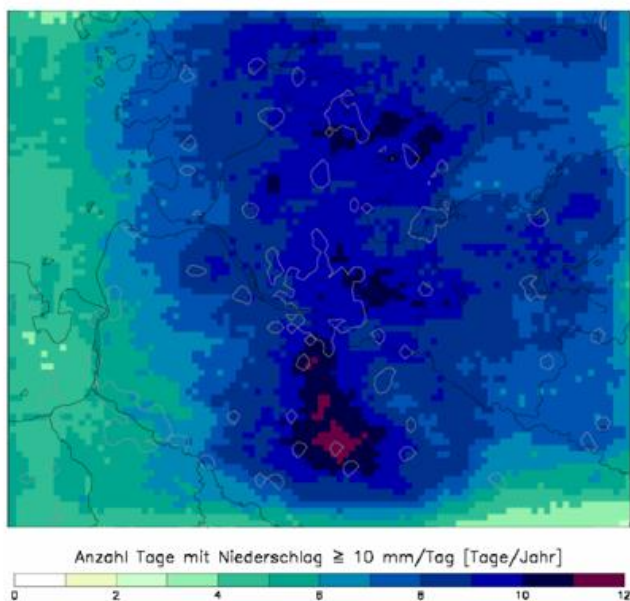
*Als Messwerte für das Umland von Hamburg wurden die Flächenmittel aus 1 km-Rasterwerten für das Bundesland Schleswig-Holstein genommen. Als Messwerte für die Stadt Hamburg wurden die Flächenmittel aus 1 km-Rasterwerten für das Bundesland Hamburg genommen.

Die mit dem Klimaszenario projizierte Änderung der Anzahl von Tagen mit Niederschlägen über den Schwellenwerten von 10, 20, und 30 mm pro Tag berechnet sich aus der Differenz zwischen der mittleren jährlichen Anzahl der Tage der Projektions- und Referenzperiode:

$$\Delta SR_x = SR_{x, \text{Projektionsperiode}} - SR_{x, \text{Referenzperiode}}, \quad x = 10 \text{ mm} \mid 20 \text{ mm} \mid 30 \text{ mm}.$$

Starkniederschlag mit ≥ 10 mm und ≥ 20 mm pro Tag tritt häufiger leewärts der Harburger Berge und der Stadt Hamburg auf (Abb. 27a, Abb. 28a).

a) Mittl. Anzahl der Starkniederschlagstage mit ≥ 10 mm/Tag 1989-2008



b) Änderungstrend ΔSR_{10mm} /Jahr bis 2050

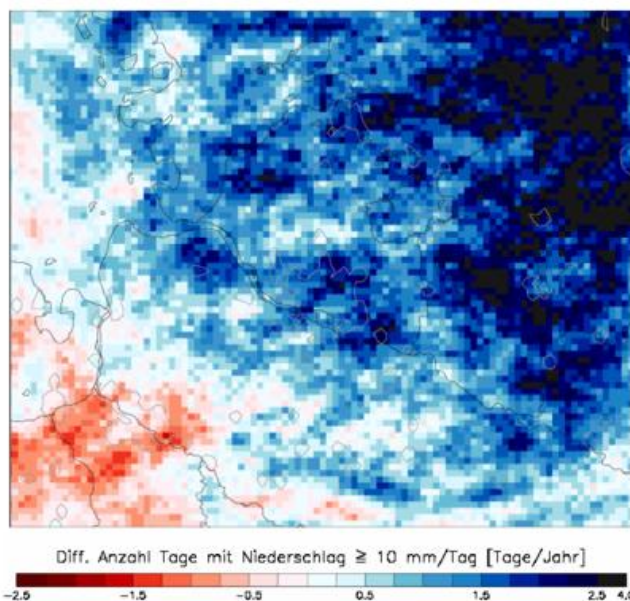
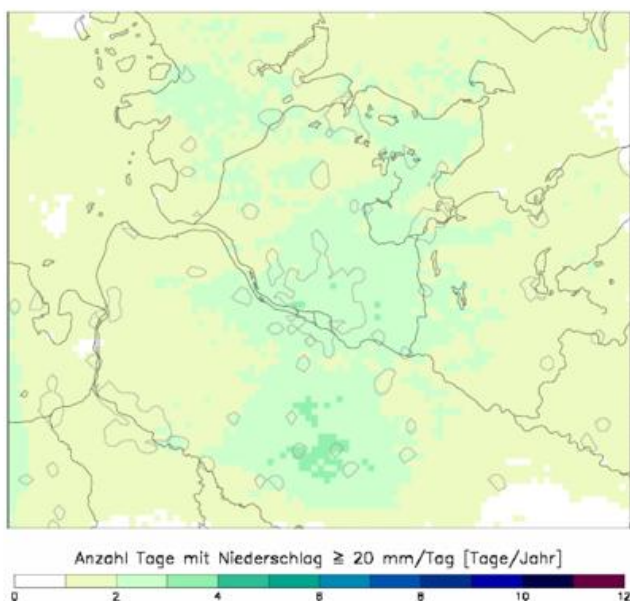


Abb. 27. Modellrechnung: Mittlere jährliche Anzahl der Tage pro Jahr mit Niederschlag ≥ 10 mm/Tag (a) und der projizierte Trend (b).

Entsprechend der Modellrechnungen steigt zukünftig die Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 10 mm und ≥ 20 mm verbreitet im Modellgebiet, so in Hamburg und im nordöstlich gelegenen Umland (Abb. 27b, Abb. 28b). In Hamburg nimmt bis 2050 die mittlere jährliche Anzahl der Starkregentage um bis zu +4 Tage (≥ 10 mm) bzw. bis zu +1,5 Tage (≥ 20 mm) zu. Nur südwestlich von Hamburg, zur Weser hin, zeigen die Änderungen ΔSR_{10mm} und ΔSR_{20mm} einen negativen Trend und damit eine abnehmende Häufigkeit dieser Kenntage.

a) Mittl. Anzahl der Starkniederschlagstage mit ≥ 20 mm/Tag 1989-2008



b) Änderungstrend ΔSR_{20mm} /Jahr bis 2050

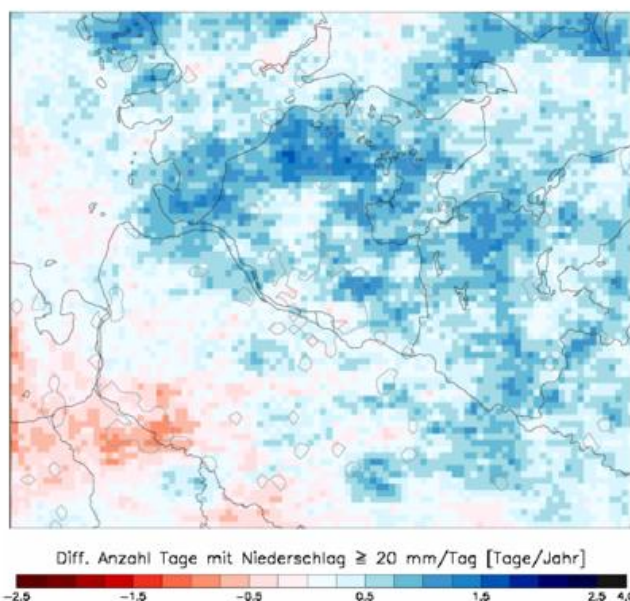


Abb. 28. Modellrechnung: Mittlere jährliche Anzahl der Tage pro Jahr mit Niederschlag ≥ 20 mm/Tag (a) und der projizierte Trend (b).

Niederschlagsmengen von ≥ 30 mm/Tag sind in Norddeutschland selten (Abb. 29a). Bis 2050 wächst deren Anzahl in Hamburg am stärksten (ΔSR_{30mm} bis +1 Tag pro Jahr im Mittel; Abb. 29b); in den anderen Gebieten gibt es weder in die eine noch in die andere Richtung einen deutlichen Trend.

a) Mittl. Anzahl der Starkniederschlagstage mit ≥ 30 mm/Tag pro Jahr 1989 2008



b) Änderungstrend ΔSR_{30mm} /Jahr bis 2050

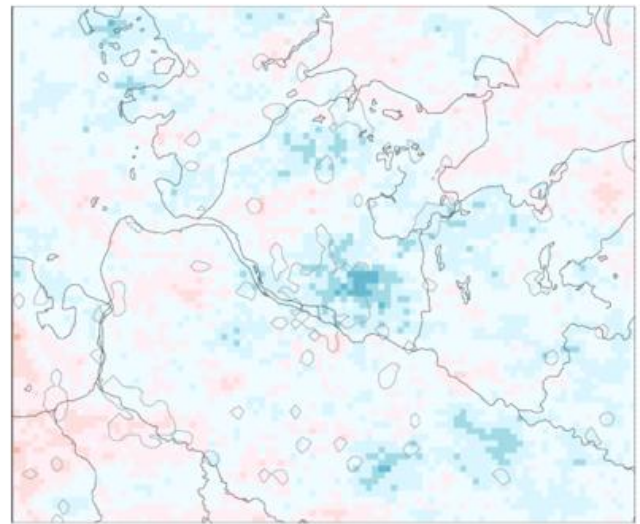


Abb. 29. Modellrechnung: Mittlere jährliche Anzahl der Tage pro Jahr mit Niederschlag ≥ 30 mm/Tag (a) und der projizierte Trend (b).

7.3.4 Kurzfassung der Ergebnisse für die Klimavariablen Niederschlag

Vergangenheit

- 1) In der Vergangenheit nahm der Niederschlag in Hamburg von 1881 bis 2013 in Hamburg zu, dabei war die stärkste Zunahme (+60 %) im Winter und im Frühjahr (+30 %) festzustellen.

Zukunft

- 2) Die Modellrechnungen bis 2050 zeigen eine weitere Zunahme des Niederschlags in Norddeutschland.
- 3) Der mittlere monatliche Niederschlag nimmt großflächig im Winter zu.
- 4) Das Frühjahr (April und Mai) und der Herbst werden in der Zukunft regenreicher.
- 5) Die Sommermonate Juli und insbesondere August werden trockener.
- 6) Die Häufigkeit von Starkniederschlägen mit ≥ 10 mm/Tag und ≥ 20 mm/Tag nimmt in Hamburg und besonders deutlich nordöstlich von Hamburg zu.
- 7) Die Anzahl der Tage mit extremen Starkniederschlag ≥ 30 mm/Tag steigt in Hamburg um +1 Tag bis zum Jahr 2050.
- 8) Da die Niederschlagsmengen vom Modell systematisch unterschätzt werden, ist davon auszugehen, dass die projizierten Änderungen (Niederschlagszunahme, Zunahme des Starkniederschlags) in der Realität kräftiger ausfallen.

7.4 Strahlung (Globalstrahlung)

7.4.1 Historische Entwicklung

Die Darstellung der historischen Entwicklung der Strahlungsgröße Globalstrahlung, die sich aus der direkten schattengebenden und der diffusen Sonnenstrahlung zusammensetzt, erfolgt an Hand von Stationsdaten für Hamburg. Abb. 30 zeigt die Jahressummen der Globalstrahlung von 1891 bis 2013 in kWh/m². Messungen der Globalstrahlung liegen von Hamburg seit dem 01.07.1949 vor. Die Verlängerung der Jahresreihe geschieht mit Hilfe der wesentlich weiter zurückreichenden Sonnenscheindauernmessungen. Liegen keine Messungen der Globalstrahlung vor, kann aus Daten der Sonnenscheindauer die Strahlung abgeschätzt werden, wenn zeitweise parallele Messungen von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung (Angström, A. 1924) vorliegen.

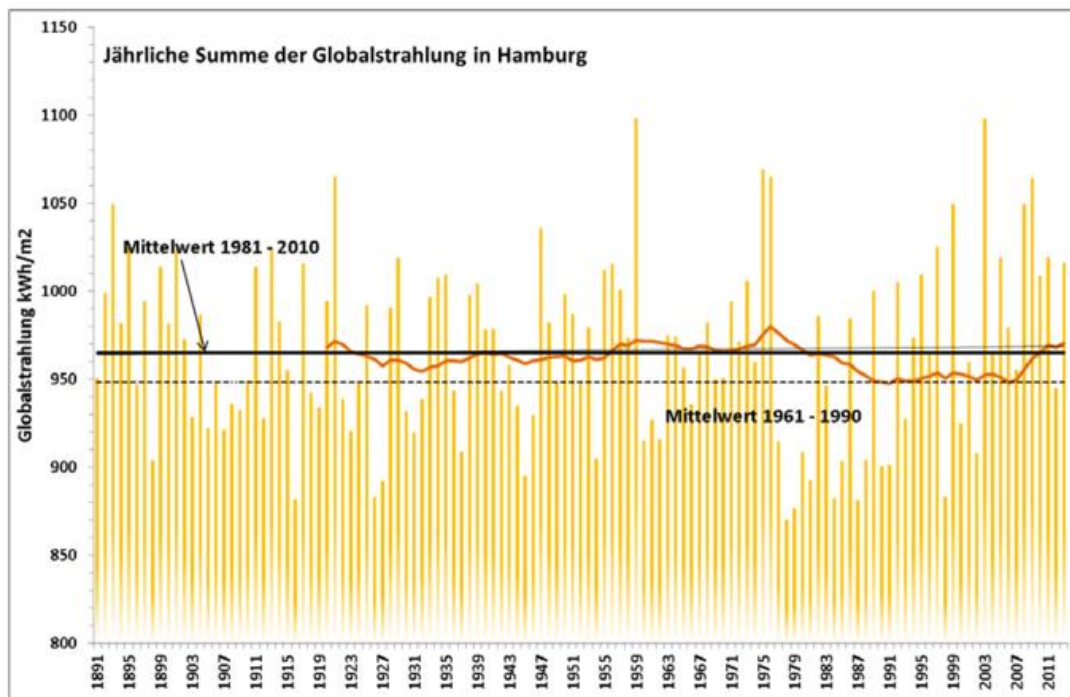


Abb. 30. Messdaten: Die letzten gut 10 Jahre zeigen in Hamburg ein hohes Einstrahlungsniveau. Die Grafik zeigt die Jahressummen der Globalstrahlung von 1891-2013 für Hamburg (gelborange Säulen). Die dicke orangene Linie stellt den langfristigen Trend als 30-jähriges gleitendes Mittel dar. Die schwarzen Linien kennzeichnen den Mittelwert der Referenzperioden 1961-1990 (gestrichelt) und 1981-2010 (ausgezogen) für Hamburg.

Ganz deutlich ist aus der Grafik in der Zeit von 1977 bis 1991 eine Periode mit auffällig geringer Sonneneinstrahlung ersichtlich. Nach dem absoluten Minimum 1978 steigen die jährlichen Summen wieder kontinuierlich an und verharren in den letzten Jahren auf einem recht hohen Niveau. Der aktuelle 30-jährige Mittelwert 1981-2010 beträgt 965 kWh/m² und liegt damit um 15 Einheiten über dem Mittelwertwert von 1961-1990. Von 1891 bis 2013 wurden in Hamburg Jahressummen der Globalstrahlung zwischen 870 kWh/m² (1978) und 1098 kWh/m² (1959, 2003) gemessen.

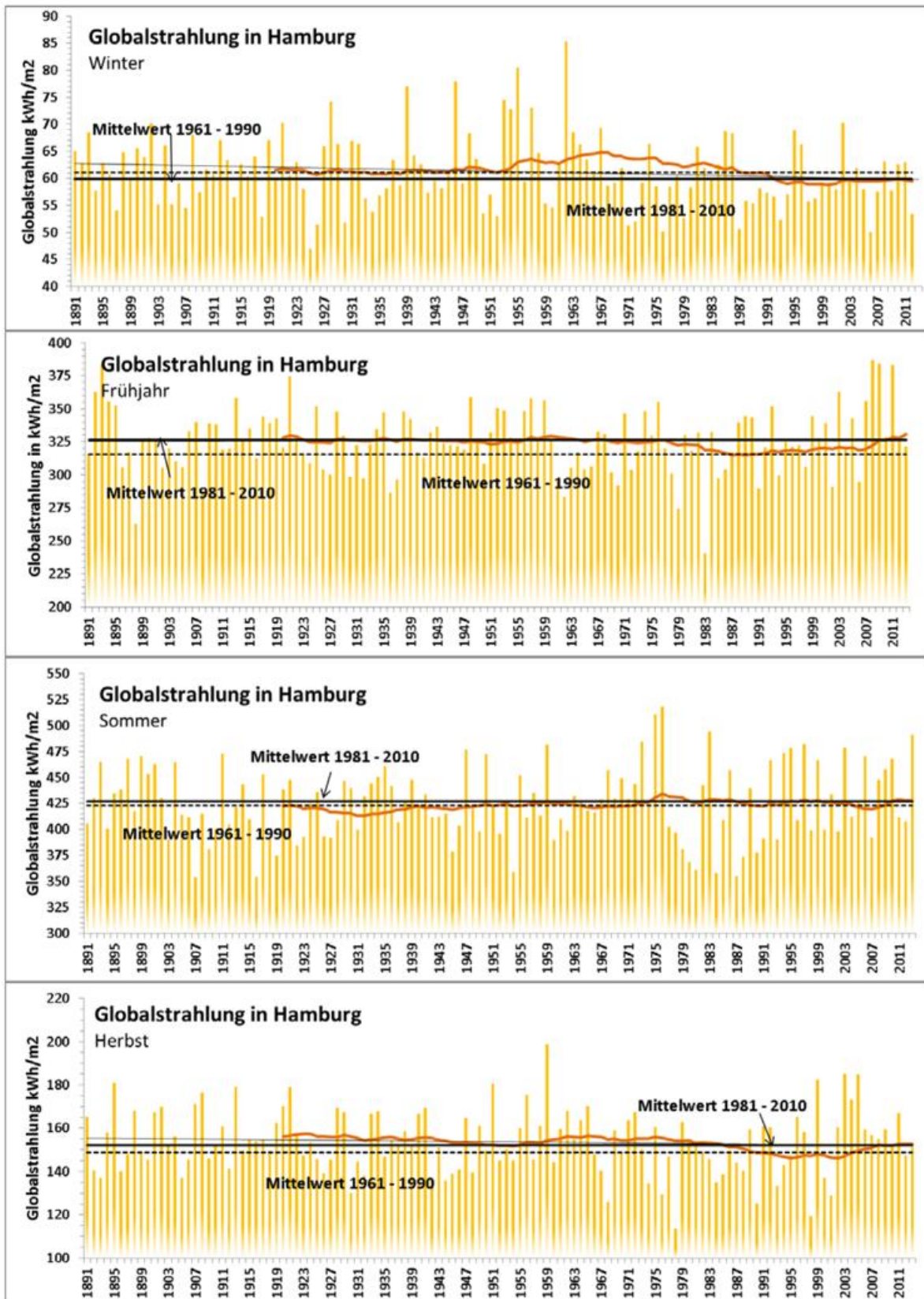


Abb. 31. Messdaten: Entwicklung der jahreszeitlichen Globalstrahlungssummen in Hamburg (Legende entsprechend Abb. 30).

Werden die 30-jährigen Mittelwerte jahreszeitenabhängig verglichen (Abb. 31), ist für den Winter eine geringe Abnahme von -1 kWh/m^2 von 1961-1990 auf 1981-2010 erkennbar. Dagegen zeigen andere Jahreszeiten ein gegenläufiges Bild: im Frühjahr ist der größte Zuwachs mit etwa $+11 \text{ kWh/m}^2$ von 1961-1990 auf 1981-2010 erkennbar. Im Sommer fällt der Zuwachs mit $+3$ bis $+4 \text{ kWh/m}^2$ geringer aus (Abb. 31). Im Herbst liegt der Mittelwert 1981-2010 über dem des Zeitraumes 1961-1990 mit $+3 \text{ kWh/m}^2$.

7.4.2 Analyse der Modellsimulationen für „Norddeutschland“

Auf der Basis der vorhandenen Daten für Hamburg wird der mittlere Jahresgang der Globalstrahlung über der Landfläche des Modellgebietes analysiert. Aus Modellwerten und Messdaten werden über die Evaluierungsperiode 1989-2008 Monatsmittel gebildet und miteinander verglichen (Abb. 32). Für Mai und Juni zeigt das Modell eine Überschätzung der Globalstrahlung, in den anderen Monaten stimmen die Modellwerte mit den Messungen gut überein.

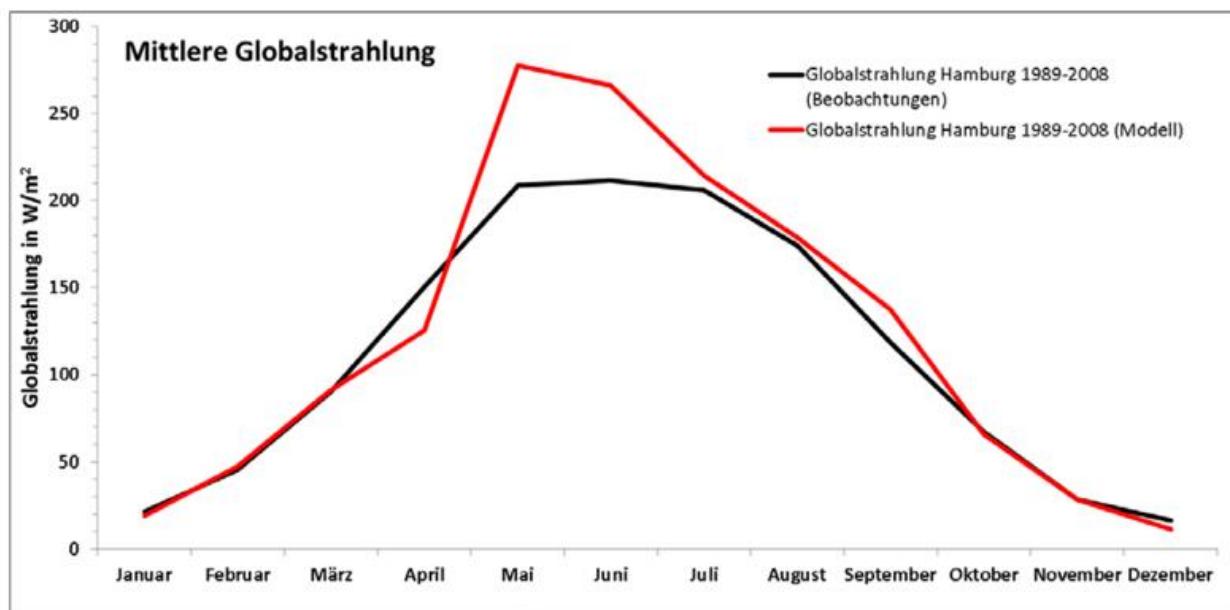


Abb. 32. Modellrechnung vs. Messdaten: Mittlerer Jahresgang der monatlichen Globalstrahlung am Boden aus dem Evaluierungslauf (rot) und aus Beobachtungen (schwarz). Der mittlere Jahresgang wurde für die Evaluierungsperiode aus der 20-jährigen Modellsimulation und aus Messdaten für Hamburg berechnet.

Im Zeitraum 1989-2000, in dem sich die Evaluierungsperiode und die Referenzperiode überschneiden, liefert der Evaluierungslauf einen höheren Wert der Strahlung als die Referenzsimulation (Abb. 33). Hier werden die Differenzen zwischen den beiden globalen Klimamodellen sichtbar, die zum Antrieb des CCLM-Modells an den Rändern genutzt werden: die Parametrisierungen für den Strahlungstransport durch die Atmosphäre sowie die Annahmen zur Treibhausgas- und Aerosolkonzentration sind im Modell IFS und im Modell MPI-ESM-LR unterschiedlich (siehe Kapitel 6.4.1 Zeitperioden).

Die Modellergebnisse lassen bis 2050 eine Abnahme der mittleren jährlichen Globalstrahlung (Abb. 33) um $-14 \text{ W m}^{-2}/100 \text{ Jahre}$ in Hamburg im Umland erkennen. Die Unterschiede in den Trends sind damit allerdings sehr gering. Die Strahlungsabnahme korreliert mit der Niederschlagszunahme.

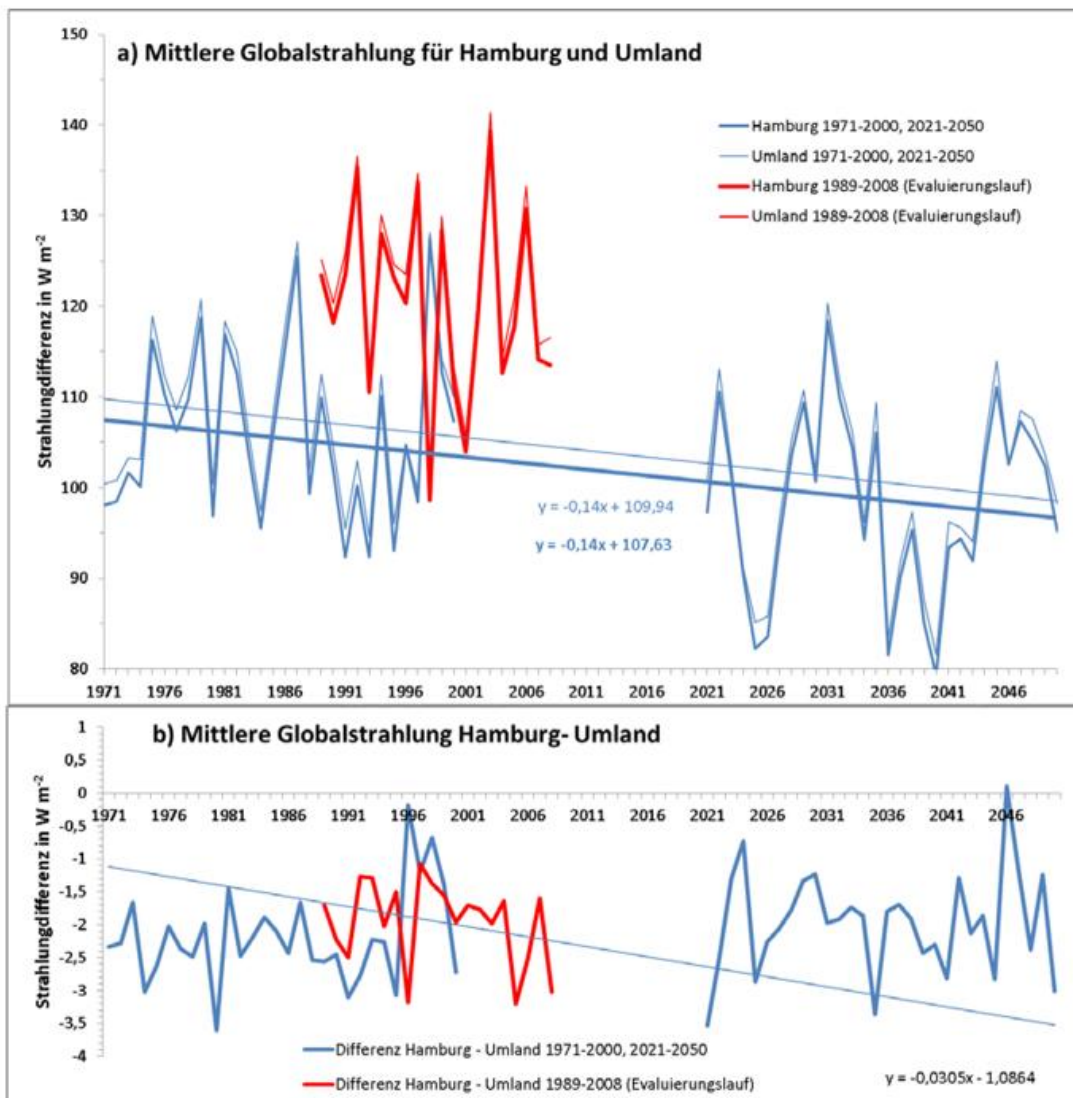


Abb. 33. Modellrechnung: Entwicklung der mittleren jährlichen Globalstrahlung mit linearen Trends (a) und der Differenz zwischen Hamburg und Umland mit Trends (b).

Der mittlere Jahrgang der Globalstrahlung ändert sich zwischen der Referenzperiode 1971-2000 und der Projektion für 2021-2050 (Abb. 34): Im Juni und September wird eine Zunahme ermittelt, wohingegen in den Frühjahrsmonaten, im Juli und August eine Abnahme festzustellen ist. Diese Änderungen sind gering, doch deuten sie an, dass das Frühjahr eher „sonnenärmer“ wird.

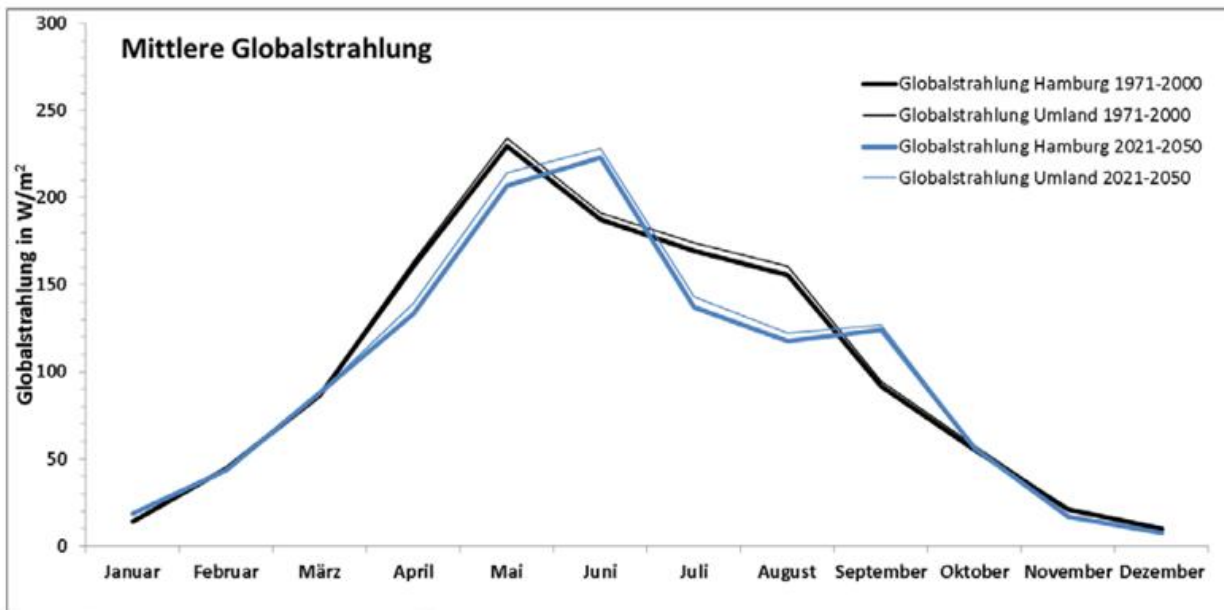


Abb. 34. Modellrechnung: Mittlerer Jahresgang der monatlichen Globalstrahlung am Boden aus dem Referenzlauf (schwarz) und dem Projektionslauf (blau). Mittlerer Jahresgang wurde jeweils aus der entsprechenden 30-jährigen Modellsimulation für Hamburg und für das Umland berechnet.

Die mit dem Klimaszenario festgestellten Strahlungsänderungen werden als Differenz zwischen den gemittelten, monatlichen Werten der Projektions- und Referenzperiode bestimmt:

$$\Delta S = S_{\text{Projektionsperiode}} - S_{\text{Referenzperiode}}$$

Die Strahlungsverhältnisse in „Nordeutschland“ bleiben auch zukünftig im Winter unverändert. In den anderen Jahreszeiten ist eine Abnahme der Strahlung zu konstatieren (Abb. 35). Die stärkste Abnahme bis über -10 W/m^2 wird im Frühjahr erwartet.

Der Beschreibung der zukünftigen Entwicklung der kurzwelligen Sonneneinstrahlung kommt eine besondere Bedeutung zu. Für die Pflanzenwelt ist die solare Einstrahlung für die Photosynthese wachstumsnotwendig, u. a. erfolgt damit der Abbau von Kohlendioxid (CO_2) in der Atmosphäre.

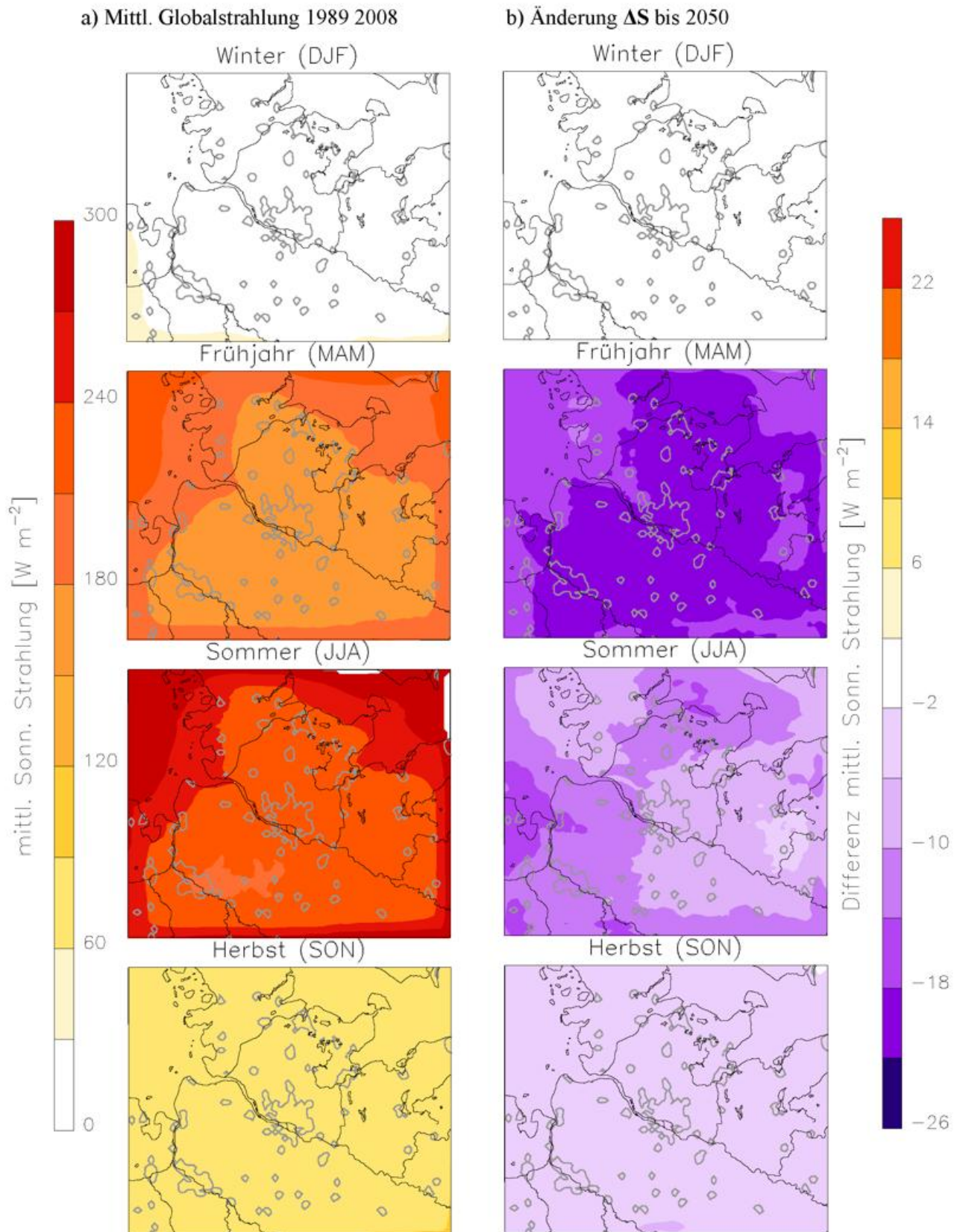


Abb. 35. Modellrechnung: Mittlere Globalstrahlung am Boden (a) und die projizierte Änderung (b) für die Jahreszeiten.

7.4.3 Kurzfassung der Ergebnisse für die Klimavariablen Globalstrahlung

Zukunft

- 1) Bis 2050 wird eine Abnahme der Globalstrahlung im Frühjahr, Sommer und Herbst erwartet; diese Tatsache korreliert mit einer Niederschlagszunahme im Frühjahr und Herbst.
- 2) Das Frühjahr wird mit -10 W m^{-2} (im Mittel) „sonnenärmer“ (und „nasser“).

7.5 Wind

7.5.1 Historische Entwicklung

Der Wind, insbesondere die Windgeschwindigkeit reagiert sehr sensibel auf Veränderungen im Umfeld der Messstation und auch auf Aufstellungsänderungen (z.B. der Windgeberhöhe). Eine lange „ungestörte“ Zeitreihe zur Betrachtung der langjährigen Windentwicklung zu erhalten, gestaltet sich so eher schwierig. Ausweichen kann man für eine qualitative Betrachtung der Windgeschwindigkeitsänderung auf den so genannten geostrophischen Wind, der aus Luftdruckmessungen bestimmt wird. Der geostrophische Wind ist dem horizontalen Gradienten⁹ des Luftdruckes in Meereshöhe proportional und damit ebenso ein Maß für die atmosphärische Bewegung wie der reale Wind. Allerdings lassen sich die Windgeschwindigkeiten des geostrophischen Windes betragsmäßig nicht mit der bodennahen, von der Reibung beeinflussten realen Windgeschwindigkeit vergleichen.

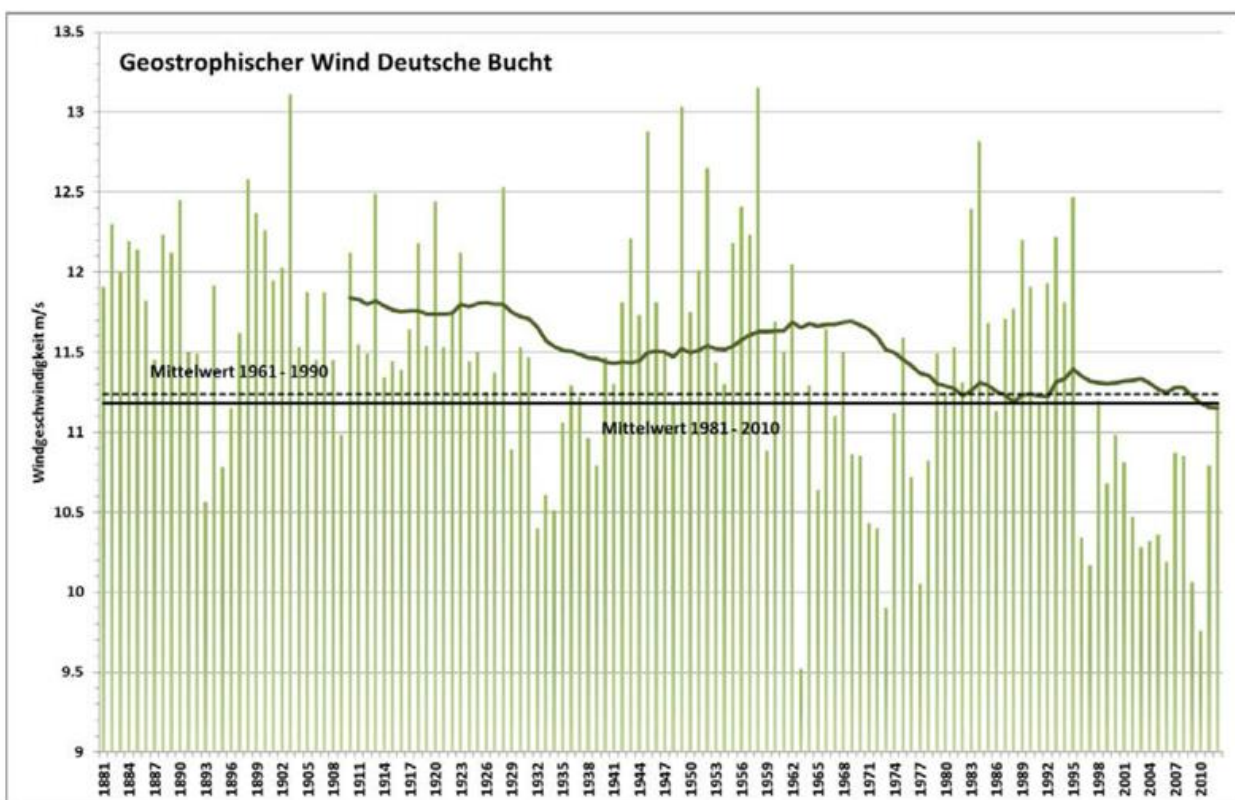


Abb. 36. Messwerte: Jahresmittel der Geschwindigkeit des geostrophischen Windes für die Deutsche Bucht 1881-2012; dunkelgrüne Linie: 30-jähriges gleitendes Mittel. Die schwarzen Linien kennzeichnen den Mittelwert der Referenzperioden 1961-1990 (gestrichelt) und 1981-2010 (ausgezogen).

Abb. 36 zeigt die jährliche Entwicklung des geostrophischen Windes für die Deutsche Bucht von 1881 bis 2012, also nicht direkt für die unmittelbare Region Hamburgs. Für eine allgemeine qualitative Betrachtung einer Zunahme oder Abnahme der Windgeschwindigkeit lassen sich aber aus diesen Daten entsprechende Schlüsse auch für Hamburg ziehen. Auch ist die Windrichtung in der Deutschen Bucht im Zusammenhang mit der Entwicklung von Sturmfluten für Hamburg von besonderer Wichtigkeit. Die Zeitreihe weist eine ausgeprägte Variabilität in Zeitskalen von wenigen Jahren bis einigen Jahrzehnten auf. Es wechseln sich Abschnitte höherer Windgeschwindigkeiten mit niedrigeren ab. Deutlich erkennbar ist die windreiche Zeit

⁹ Gradient der des Luftdruckes: eine ortsabhängige Veränderung des Luftdruckes.

der 1980er und 1990er Jahre, die sich aber unauffällig in die Maxima der Gesamtreihe einreihen. Für den Gesamtzeitraum ergibt sich eine abnehmende Tendenz der Windgeschwindigkeiten.

Von besonderem Interesse für Hamburg ist in Hinblick auf Sturmfluten die Windrichtungsverteilung und hierbei besonders die Windrichtungen West bis Nord (Abb. 37).

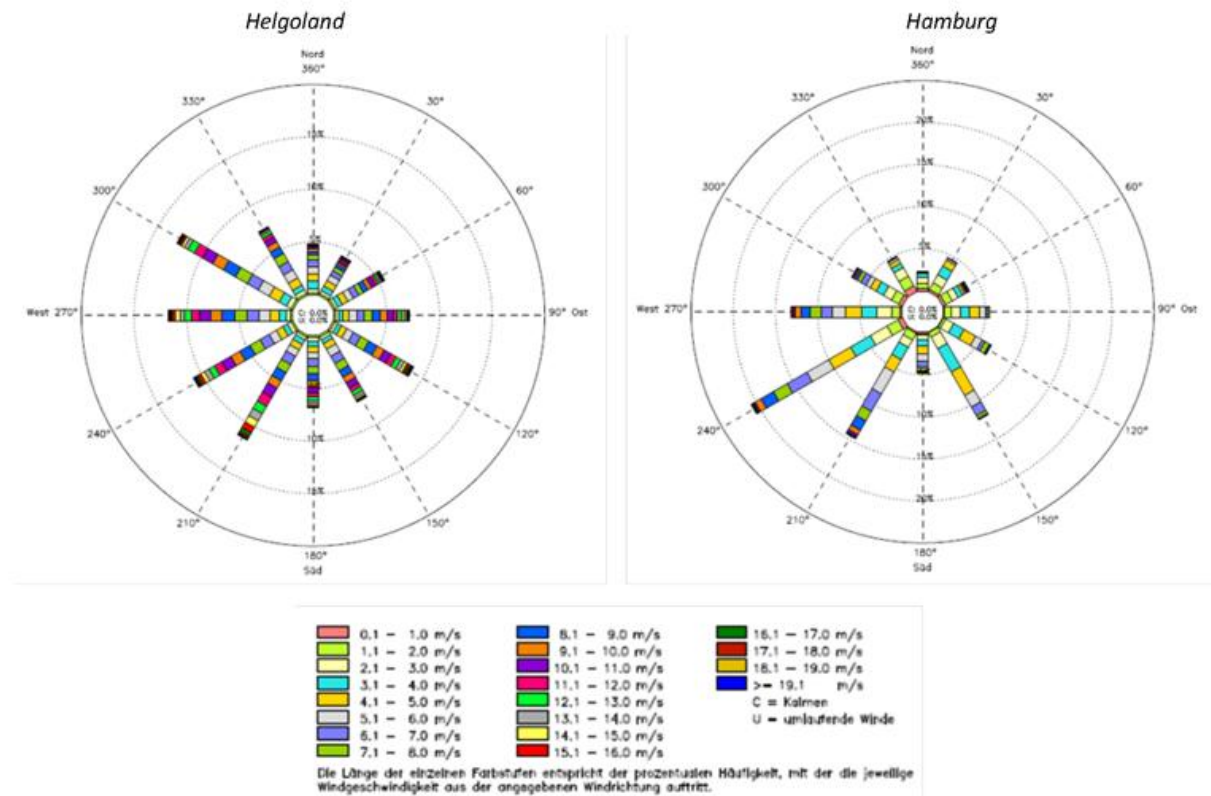


Abb. 37. Messdaten: Mittlere jährliche Stärkewindrose für Helgoland und Hamburg für den Bezugszeitraum 2002-2011.

In Hamburg (Bezugsstation Hamburg-Fuhlsbüttel) ist das Richtungsmaximum deutlich bei den südwestlichen Winden zu finden. West- und Südsüdwestwinde sowie Südsüdostwinde kommen ebenfalls häufig vor. Nordwestliche Winde sind dagegen weniger häufig anzutreffen. Für Helgoland (Deutsche Bucht) ergibt sich vergleichsweise eine leichte Rechtsdrehung der Windverteilung. Südsüdwest- bis Westnordwestwinde kommen etwa gleichermaßen vor, mit einer leichten Betonung der West- bis Westnordwestsektoren. Ebenfalls sind die Nordnordwestwinde sowie die Richtungen Ost bis Südsüdost noch recht stark vertreten.

„Auch andere Auswertungen, die sich insbesondere auf hohe Windgeschwindigkeiten aus für die Nordseeküste kritischen Windrichtungen West bis Nord befassen, zeigen keinen signifikanten Trend bezüglich der Häufigkeit und Intensität von Stürmen“ (ROSENHAGEN, G. 2007).

7.5.2 Analyse der Modellsimulationen für „Norddeutschland“

Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wurden für die vier Jahreszeiten die Modelldaten über 20 Modellgitterpunkte, die der Stadt Hamburg zugeordnet sind, mit den Beobachtungen an der Station Hamburg-Fuhlsbüttel verglichen (Tab. 5).

Tab. 5. Vergleich der mittleren jahreszeitlichen Windgeschwindigkeiten aus Messdaten und aus Modelldaten für die Station Hamburg-Fuhlsbüttel. Die jahreszeitlichen Mittelwerte wurden aus 20 Jahren der Evaluierungsperiode berechnet.

Jahreszeit	Messwert [m s ⁻¹]	Modellwert [m s ⁻¹]
Winter	4,4	3,7
Frühjahr	3,8	3,7
Sommer	3,1	3,5
Herbst	3,6	3,4

Das Modell unterschätzt die Windgeschwindigkeit im Winter um 0,7 m/s am deutlichsten. Diese Unterschätzung resultiert auch aus der Mittelung der stündlichen Modellwinddaten, in denen keine Windböen berücksichtigt werden, während die gemessenen Stundenwerte auf in Sekundenabständen aufgezeichnete und dann gemittelte Geschwindigkeiten beruhen. Somit wird die Windvariabilität durch zeitlich hochaufgelöste Messungen (einschließlich der Böigkeit) besser abgebildet.

Die Evaluierungssimulationen 198-2008 stellen die typischen regionalen Windgeschwindigkeitsmuster über Norddeutschland mit stärkeren Winden über den Seegebieten und geringeren über den Landflächen insgesamt von der Küste ins Binnenland abnehmend dar (Abb. 38a). Dabei treten die höchsten Windgeschwindigkeiten über dem Meer im Winter und im Herbst auf.

Die zukünftigen Änderungssignale ΔW der mittleren Windgeschwindigkeit berechnet sich aus:

$$\Delta W = W_{\text{Projektionsperiode}} - W_{\text{Referenzperiode}}$$

Die Änderung ΔW über Land ist für alle Jahreszeiten mit ≤ 1 m/s gering (Abb. 38b). Über dem Meer jedoch ist im Herbst eine Abnahme bis zu -0,4 m/s zu erwarten (zu dieser Jahreszeit wird auch die stärkste Erwärmung über Land erwartet) und eine Zunahme bis +0,2 m/s im Frühjahr. Für das Stadtgebiet Hamburgs zeigt sich keine wesentliche Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit bis zum Jahr 2050.

Eine Angabe zu den mittleren Windgeschwindigkeiten, die im vorliegenden Fall keine nennenswerten Änderungen aufweist, besagt noch nichts über die Häufigkeit und Intensität von Starkwinden und deren Änderung aus. Stürmische Winde kommen besonders häufig über den Meeren und dem Binnenland von Mitte Oktober bis Mitte März (später Winterperiode genannt) vor. Für eine Sturmflutgefahr in Hamburg sind vor allem starke Nordwestwinde von Bedeutung. Aus diesem Grund wird die Häufigkeit von Starkwind ≥ 10 m/s in der Winterperiode aus Richtungen West bis Nord (zwischen 270° und 360°) unter dem Aspekt des Klimawandels untersucht.

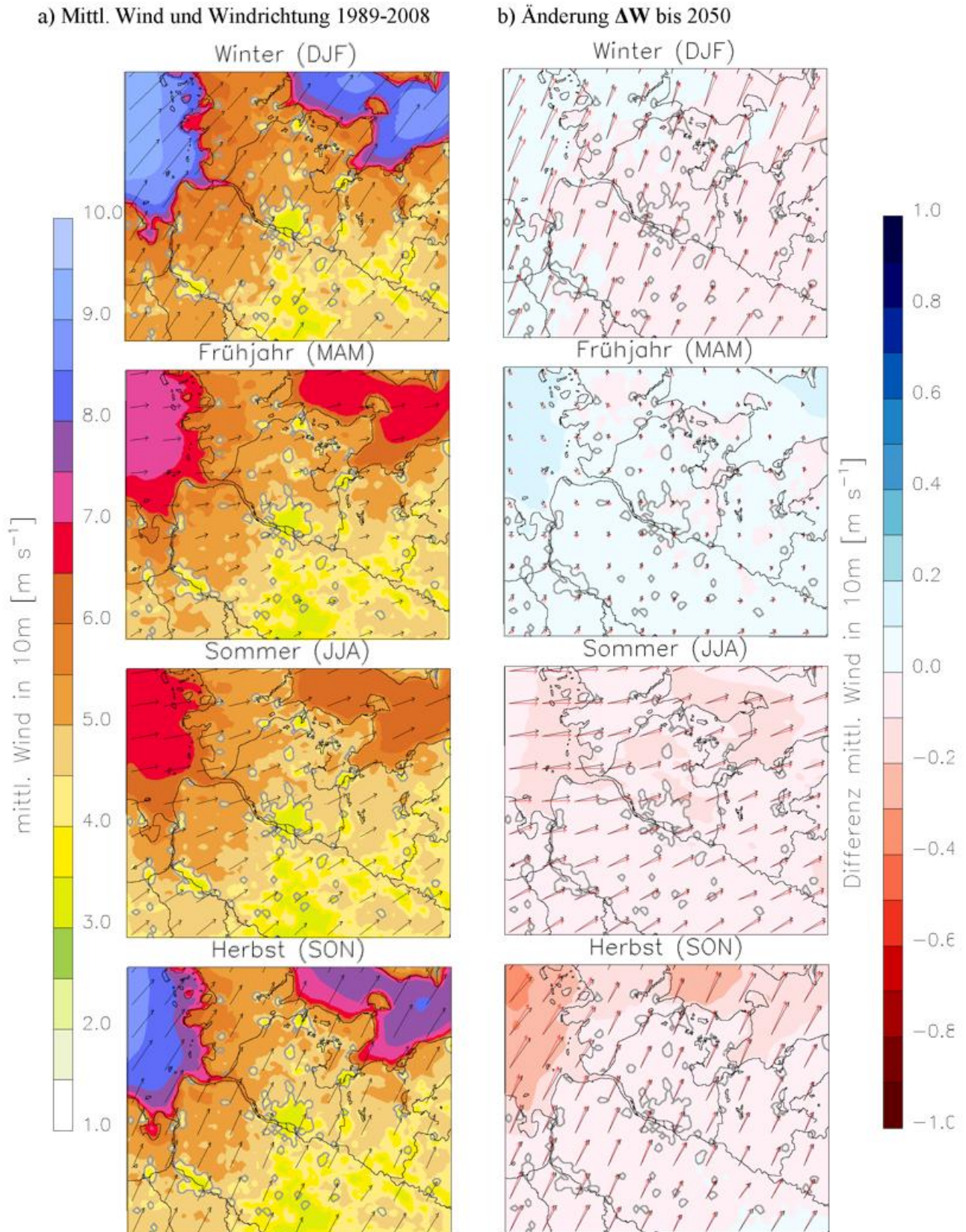


Abb. 38. Modellrechnung: Mittlere Windgeschwindigkeit und Windrichtungen (Pfeile) in 10 m ü. G. (a) und die projizierte Änderung (b) für die Jahreszeiten. Die Änderung der Windrichtung (b) kann aus der Differenz zwischen der Windrichtung in der Referenzperiode 1971-2000 (rote Pfeile) und der Projektionsperiode 2021-2050 (schwarze Pfeile) abgeschätzt werden.

a) $W_{10,NW,Oktober-März}$, Häufigkeit der Starkwinde ≥ 10 m/s 1989-2008, für Oktober-März, Windrichtung 270° - 360° .

b) Änderung $\Delta W_{10,NW,Oktober-März}$ bis 2050

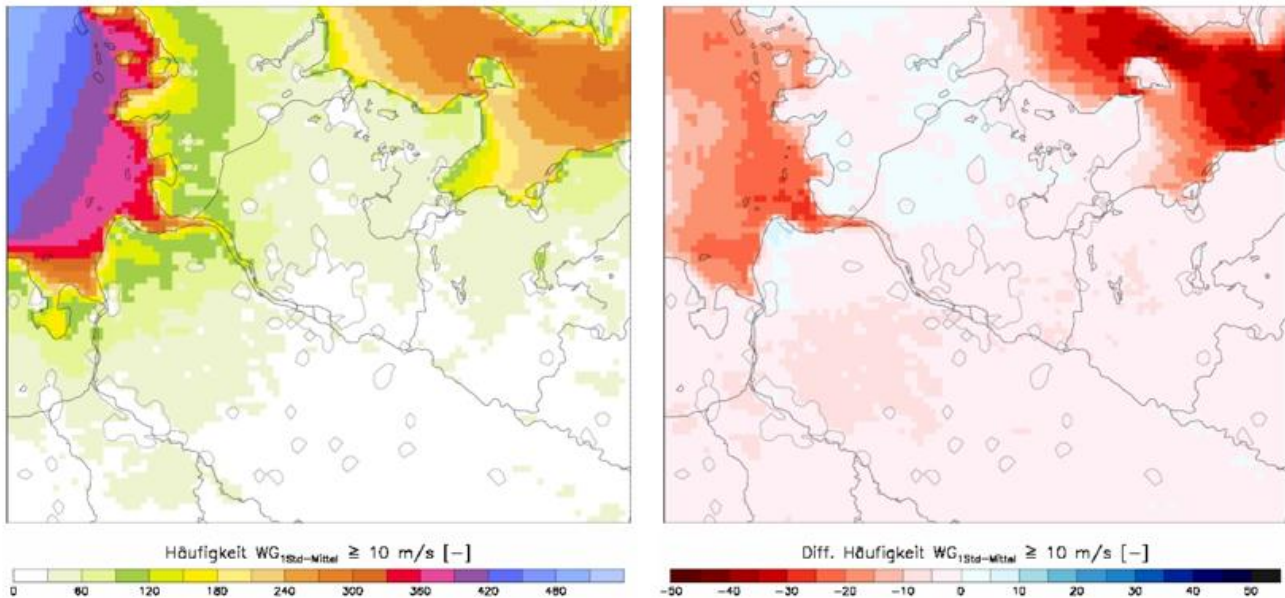


Abb. 39. Modellrechnung: Mittlere Häufigkeit der stündlichen Windgeschwindigkeiten ≥ 10 m/s aus dem Richtungsbereich 270° - 360° (a) und die Änderung dieser Häufigkeit (b) in der Zukunft bis zum Jahr 2050.

Aus Modelldaten wird die Häufigkeit der West- bis Nordwinde ≥ 10 m/s in der Winterperiode und die Änderung dieser Häufigkeit bis zum Jahr 2050 dargestellt (Abb. 39):

$W_{10,NW,Oktober-März}$ = Mittlere jährliche Häufigkeit der 10 m/s-Überschreitungen der mittleren stündlichen Windgeschwindigkeiten aus Richtungen West bis Nord (zwischen 270° und 360°), berechnet aus Modelldaten für die sechs Monate Oktober bis März.

$$\Delta W_{10,NW,Oktober-März} = W_{10,NW,Oktober-März,Projektionsperiode} - W_{10,NW,Oktober-März,Referenzperiode}$$

Am häufigsten kommen Starkwinde ≥ 10 m/s über der Nordsee und an der Nordseeküste (Abb. 39a) vor. Landeinwärts nimmt die Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten ≥ 10 m/s rasch ab. Nach den Klimaprojektionsrechnungen bis 2050 nimmt die Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten ≥ 10 m/s über der Ostsee (bis -50 Stunden in einer Winterperiode) und über der Nordsee (bis -30 Stunden) ab. Diese Angabe ist für die mittlere Häufigkeit der Starkwinde über die Winterperiode gültig. Die Mittelung über einzelne Monate lässt durchaus gegensätzliche Änderungen (Abb. 40) erkennen:

- In den Monaten Oktober, Januar und März nimmt die Häufigkeit von Starkwinden über der Nordsee ab,
- im November und Dezember nimmt die Häufigkeit zu,
- im Februar und März nimmt die Häufigkeit der Starkwinde über Land zu.

Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass allgemein die Häufigkeit von Starkwinden über der Nordsee in der Winterperiode bis zum Jahr 2050 abnimmt, allerdings die Häufigkeit von sehr intensiven Starkwinden in einzelnen Monaten zunehmen kann.

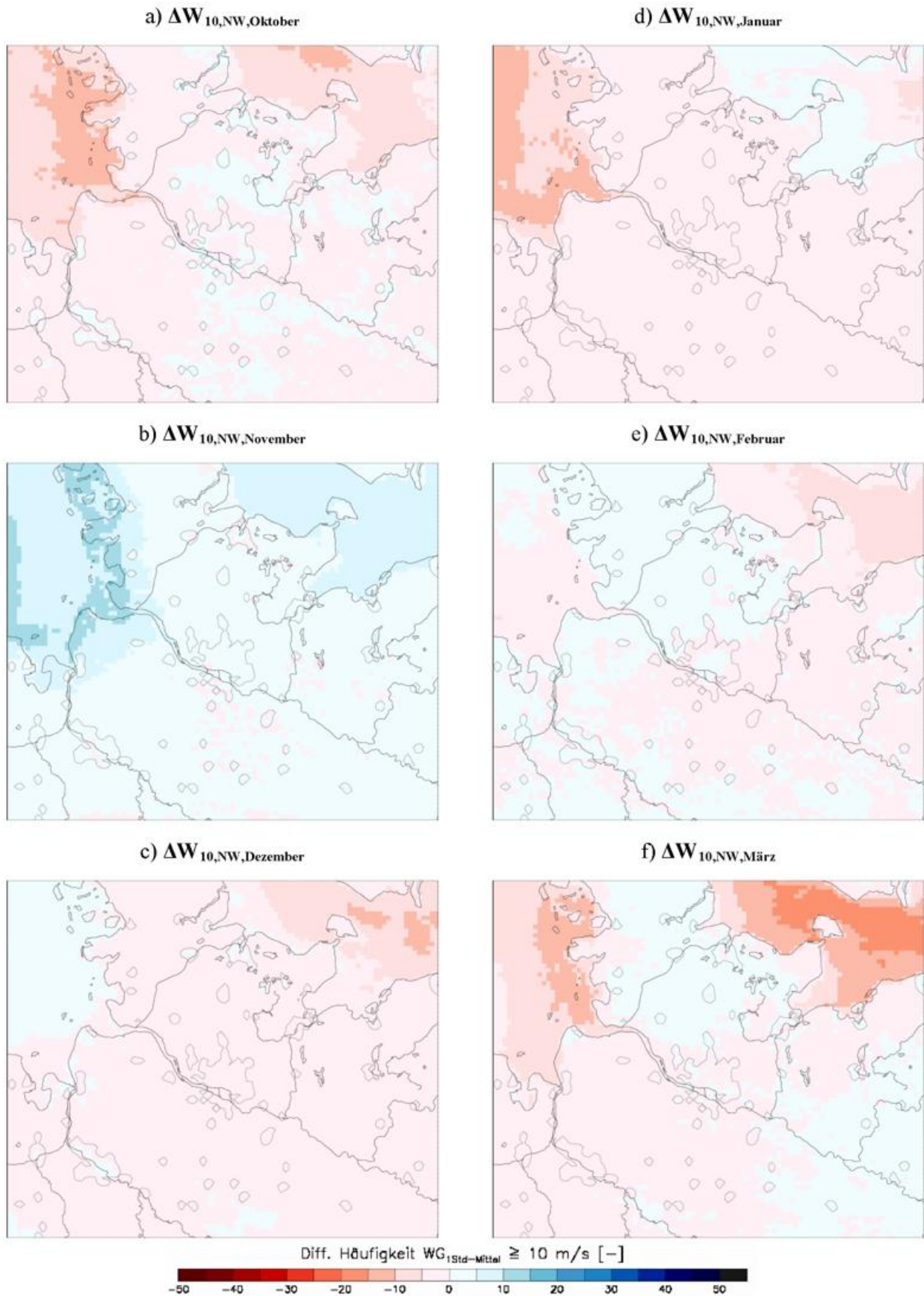


Abb. 40. Modellrechnung: Änderung der Anzahl der Stündlichen Windgeschwindigkeiten ≥ 10 m/s aus dem Richtungsbereich zwischen 270°(Westwind) und 360°(Nordwind) bis zum Jahr 2050 für einzelne Monate: Oktober (a), November (b), Dezember (c), Januar (d), Februar (e), und März (f).

7.5.3 Kurzfassung der Ergebnisse für die Klimavariablen Wind

Zukunft

- 1) Im Bereich Hamburg gibt es bis 2050 kaum Änderungen der mittleren Windgeschwindigkeit und Richtung.
- 2) Die stärkste Änderung der Windstärke in Norddeutschland findet über der Nordsee statt: Die mittlere Windgeschwindigkeit nimmt hier im Herbst bis zu -0,5 m/s ab und im Frühjahr bis zu +0,2 m/s zu.
- 3) Im Mittel nimmt die Häufigkeit von Windgeschwindigkeiten ≥ 10 m/s aus nordwestlichen Richtungen in der Winterperiode (Oktober bis März) über Nord- und Ostsee ab.
- 4) Es zeigt sich in einzelnen Wintermonaten eine Zunahme der Häufigkeit von Starkwinden aus Richtungen 270° bis 360° über der Nordsee und an der Nordseeküste.

8 Interpretation

8.1 Grenzen der Modellierung

Die Abschätzungen der Klimaänderungen in der vorliegenden Studie enthalten Unsicherheiten, die bei der Interpretation berücksichtigt werden müssen:

1. Die Unsicherheit der zukünftigen Treibhausgasemissionen: In der vorliegenden Studie wurden Klimaänderungen nur mit dem RCP4.5 Szenario (IPCC 2013) abgeschätzt. Damit zeigen die Ergebnisse die „mittleren“ Klimaänderungssignale, da das Szenario RCP4.5 einer mittleren Erwärmung entspricht (bis +2,6 Grad 2100 gegenüber dem vorindustriellen Wert). Unter Berücksichtigung anderer Szenarios für die wirtschaftlichen Entwicklungen können die projizierten Klimaänderungen schwächer (RCP2.6 Szenario mit einer Erwärmung bis +2 Grad bis 2100) oder stärker (RCP8.5 Szenario mit einer Erwärmung bis +6 Grad bis 2100) ausfallen.
2. Unsicherheiten der natürlichen klimabestimmenden Größen (z.B. Orographie, Pflanzenbestand): In der vorliegende Studie wurde die Landnutzungsklassifikation GLC2000-Landnutzungs-kategorisierung (engl.: Global Land Cover 2000) verwendet sowohl für die Referenzperiode 1971-2000 als auch für die Projektionsperiode 2021-2050 ohne Berücksichtigung von möglichen Landnutzungsänderungen in diesen Zeiträumen (z.B. Bebauung, Änderung der Vegetation).
3. Unsicherheiten der anthropogenen klimabestimmenden Größen (z.B. Aerosolemissionen, Raumplanung): In der vorliegenden Studie wurden die Abschätzungen der Aerosolkonzentrationen mit einer relativ groben räumlichen Auflösung berücksichtigt.
4. Die Unsicherheit durch Ungenauigkeiten in den globalen Klimamodellen, deren Ergebnisse als Randbedingungen bzw. Eingangsgrößen regionaler Klimamodelle dienen (Siehe Kapitel „6.4 Modellrechnungen“).
5. Die Unsicherheit durch Ungenauigkeiten in den regionalen Klimamodellen (Siehe Kapitel „Anhang B. Physikalische Parametrisierungen in Klimamodellen auf unterschiedlichen Gitterweiten“).
6. Die Unsicherheiten der Klimaabschätzung durch eine begrenzten Anzahl von Modelljahren (engl.: sampling uncertainty). Damit werden im Klimamodell „typische“ Wetterlagen abgebildet die das „typische“ Klima darstellen. Extremereignisse, wie z.B. das Hochwasser in Mitteleuropa im August 2002 oder die Hitzewelle in Europa 2003, können zwar für vergangenen Zeiträume analysiert und modelliert werden, jedoch nicht zeitgenau für die Zukunft vorhergesagt werden, sondern nur in Form einer Wahrscheinlichkeit als Abweichung vom „mittleren“ Klima.

9 Schlussbemerkung

Mit der Vorlage dieser Untersuchung des Deutschen Wetterdienstes zur Entwicklung des zukünftigen Klimas in der Metropolregion Hamburg wird das Land Hamburg in seinen Aktivitäten unterstützt, die attraktive Stadt mit ihrem lebenswerten Umfeld und als Wirtschaftsstandort nicht nur zu erhalten sondern auch fortzuschreiben. Die Angaben geben der Stadt Hinweise eine an den Klimawandel angepasste Stadtplanung zu entwickeln und negative Folgen für die Gesundheit und einen erhöhten Energiebedarf zu vermeiden. Das eingesetzte Regionale Klimamodell COSMO-CLM bezieht, im Gegensatz zu hochauflösenden Stadtklimamodellen, die Wechselwirkung zwischen der städtischen Wärmeinsel und dem weiteren freien Umland in die langfristige Klimabetrachtung ein. Mit der Implementierung der Hamburger Stadtstruktur wird somit ein Hamburg spezifischer Datensatz der Regionalmodellierung bereitgestellt.

Die einzelnen Untersuchungen zum Thema Stadtklima, Klimawandel stehen nicht allein für sich. Jede Studie bringt mit ihrer individuellen Fragestellung einen Mehrwert in Wissen um das Stadtklima bzw. des Stadtklima unter dem Aspekt des vorbeugenden Katastrophenschutzes im Rahmen der Klimawandelfolgen. Projekte wie INKAS¹⁰⁾ oder KLIMPRAX¹¹⁾ sind Beispiele, wie Erkenntnisse zusammengeführt werden. Eine vom Deutschen Wetterdienst dauerhaft in Hamburg im innerstädtischen Umfeld einzurichtende Klimastation wird mit ihren kontinuierlichen Messungen die Klimaentwicklung und die Wirkung von Anpassungsmaßnahmen begleiten.

Klima, Klimawandel, Klimaanpassung und Stadtplanung sind auch künftig vielfältig miteinander verknüpft. Die sich daraus entwickelnden Herausforderungen sind nur durch eine weiterhin enge Zusammenarbeit von der öffentlichen Hand und dem Deutschen Wetterdienst zu identifizieren und anzugehen.

¹⁰ Informationsportal KlimaAnpassung in Städten - interaktive Webanwendung des DWD zur Unterstützung der Städte und Kommunen bei einer klimawandelgerechten Stadtentwicklung (Freischaltung 1. Märzhälfte 2015).

¹¹ KLIMawandel in der PRAXis: Gemeinsames Projekt der Landeshauptstädte Mainz und Wiesbaden, des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie und des Deutschen Wetterdienstes zur Erstellung eines Handlungsleitfadens Stadtklima in der kommunalen Praxis.

Anhang A. Das regionale Klimamodell COSMO-CLM

Das Modell CCLM (ROCKEL, B. et al. 2008) wurde vom Netzwerk internationaler Wissenschaftler – Climate Limited-area Modelling-Community¹² – aus dem numerischen Wettervorhersagemodell COSMO (engl.: Consortium for Small-Scale Modelling) (STEPPELER, J. et al. 2003) des Deutschen Wetterdienstes entwickelt. CCLM ist ein nicht-hydrostatisches, räumlich abgegrenztes, atmosphärisches Vorhersagemodell. Das Modell ist für Anwendungen auf der Mesoskala (meso- β und meso- γ) bestimmt und beinhaltet primitive thermo-hydrodynamische Gleichungen für den kompressiblen Luftfluss in der feuchten Atmosphäre. Die Modellgleichungen sind in rotierten geographischen Koordinaten formuliert mit der generalisierten geländefolgenden Höhenkoordinate (DOMS, G. UND U. SCHÄTTLER 2002). Physikalische Prozesse verschiedener Art werden im Modell abgebildet und parametrisiert (Siehe „Anhang B. Physikalische Parametrisierungen in Klimamodellen auf unterschiedlichen Gitterweiten“) (DOMS, G. et al. 2011).

Der Austausch von Energie und Wasser zwischen der Atmosphäre und der Erdoberfläche im Modell CCLM wird mit dem Bodenmodul TERRA (DOMS, G. et al. 2011) modelliert. Das Bodenmodul TERRA beschreibt für jede Modellgitterzelle verschiedene Charakteristika der Oberfläche, wie die Rauigkeit und die Pflanzenbedeckung entsprechend dem vorgegebenen Landnutzungstyp (Tab. 6) aus dem Datensatz GCL2000¹³ (FRITZ, S. et al. 2003).

Tab. 6. Charakteristika der Landoberfläche für ausgewählte Landnutzungsklassen der GLC2000-Landnutzungs-kategorisierung (die Liste der Landnutzungsklassen ist nicht vollständig).

Beschreibung der Landnutzungsklasse	Rauigkeit [m]	Pflanzenanteil [-]		Blattflächenindex* [-]	
		minimal	maximal	minimal	maximal
Laubwald geschlossen	1,00	0,75	0,90	1,00	3,40
Laubwald offen	0,15	0,70	0,80	1,00	2,00
Immergrüner Nadelwald	1,00	0,80	0,80	1,30	3,80
Nadelwald	1,00	0,75	0,90	1,00	3,80
Agrarfläche	0,07	0,50	0,90	0,70	3,30
Freifläche	0,05	0,20	0,50	0,40	0,60

* Blattflächenindex BFI (engl.: LAI von „leaf area index“) ist definiert als Blattfläche pro Bodenoberfläche, $BFI = A(\text{Blatt}) / A(\text{Boden})$ [dimensionslos]. Der Blattflächenindex wird in Klimamodellen benutzt um den Einfluss von land- und forstwirtschaftlicher als auch natürlicher Vegetation auf die Atmosphäre zu beschreiben.

In der vorliegenden Studie wurden die Abschätzungen der Aerosolkonzentrationen auf Basis des NASA/GISS¹⁴-Global Aerosol Climatology Project mit einer relativ groben räumlichen Auflösung von nur $4^\circ \times 5^\circ$ verwendet.

¹² CLM-community: www.clm-community.eu

¹³ Global Land Cover 2000: <http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/glc2000.php>

¹⁴ engl.: National Aeronautics and Space Administration / Goddard Institute for Space Studies, <http://gacp.giss.nasa.gov>

Anhang B. Physikalische Parametrisierungen in Klimamodellen auf unterschiedlichen Gitterweiten

Klimamodelle wie auch Wettervorhersagemodelle beschreiben die wesentlichen meteorologischen Prozesse in der Atmosphäre und am Erdboden und ihren Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der Modellvariablen wie Luftdruck, Temperatur, Wind, Wasserdampf, Wolken und Niederschlag.

Die Lösung der Modellgleichungen erfordert die Definition eines Raum- und Zeitgitters. Diese Variablen sind an den diskreten Punkten dieses Raum- und Zeitgitters bzw. den durch sie gebildeten Gitterelementen darstellbar (skalige Variable). Einer direkten Vorhersage im Gitter des Modells sind nur solche Prozesse zugänglich, die charakteristische Abmessungen von mindestens dem doppelten Abstand zwischen den Punkten des Modellgitters haben (skalige Prozesse).

Viele physikalische Prozesse in der Atmosphäre oder am Boden finden aber auf so kleinen räumlichen Skalen statt, dass sie mit bestimmten Gitterweiten nicht explizit von den Modellen aufgelöst werden können. Das sind in Bezug auf das Modellgitter subskalige Prozesse im Gegensatz zu den direkt simulierbaren skaligen Prozessen. Der Einfluss dieser subskaligen Prozesse auf die Modellvariablen wird deshalb über Parametrisierungen näherungsweise berücksichtigt. Tab. 7 fasst die wichtigsten Prozesse zusammen, die in den verwendeten Modellen parametrisiert oder aufgelöst Eingang finden.

Tab. 7. Wichtige physikalische Atmosphären- und Bodenprozesse, die in den Modellen COSMO-CCLM aufgelöst oder parametrisiert werden.

Prozess[e]	Modellgebiet/ Gitterweite		
	„Europa“/ 12 km	„Norddeutschland“/ 2,8 km	„Hamburg“/ 140 m
Strahlungsprozesse in der Atmosphäre	parametrisiert	parametrisiert	parametrisiert
Wolkenmikrophysik	parametrisiert	parametrisiert	parametrisiert
Schauer- und Gewitterbildung (hochreichende Feuchtkonvektion)	parametrisiert	aufgelöst	aufgelöst
Bewölkung	aufgelöst	aufgelöst	aufgelöst
turbulenter Austausch von Impuls, fühlbarer und latenter Wärme zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre,	parametrisiert, 2-D	parametrisiert, 2-D	parametrisiert, 3-D Option
subskalige orografische Effekte	parametrisiert	aufgelöst	aufgelöst
Prozesse in den obersten Schichten des Erdbodens	parametrisiert	parametrisiert	parametrisiert
Energiebilanz der Gebäude	parametrisiert	aufgelöst	parametrisiert*

* im Modellgebiet „Hamburg“ wird die Stadtparametrisierung ausgeschaltet, da sie auf der entsprechenden räumlichen Skala noch nicht getestet wurde; die urbanen Oberflächen werden mit geringerem Pflanzenanteil und höherer aerodynamischen Rauigkeit dargestellt.

Anhang C. Die Stadtparametrisierung

Die Parametrisierung TEB (engl.: Town Energy Budget) (MASSON, V. 2000) wurde in das Modell CCLM eingebaut (TRUSILOVA, K. et al. 2013) um die Stadteffekte auf die Atmosphäre in regionalen Klimasimulationen zu berücksichtigen. Die typischen räumlichen Skalen der Modellanwendungen für das gekoppelte Modell CCLM+TEB sind 1 bis 5 km. Die Anwendung auf größeren räumlichen Skalen ist grundsätzlich möglich, kann aber bei relativ kleinem Effekt der Parametrisierung auf die Atmosphäre den Rechenaufwand stark erhöhen.

Energie ist erforderlich, um Wasser von der flüssigen in die gasförmige Phase zu überführen. Diese Energie wird der Umgebung entzogen und kühlt diese dabei ab. Freier nicht versiegelter wasserdurchlässiger (ohne Asphalt oder Beton) Boden mit oder ohne Pflanzenbedeckung erlaubt den Boden-Luft-Wasseraustausch: Niederschläge werden aufgenommen, gespeichert und eventuell später wieder verdunstet. Dies bewirkt eine natürliche Abkühlung des Bodens. Dagegen der versiegelte urbane wasserundurchlässige Boden stört den natürlichen Boden-Luft-Wasseraustausch in dem das Regenwasser durch das Abwassersystem von der Oberfläche entfernt wird. Dabei bleibt auf versiegelten Oberflächen nur wenig Wasser für die Evaporation und die Abkühlung ist gering.

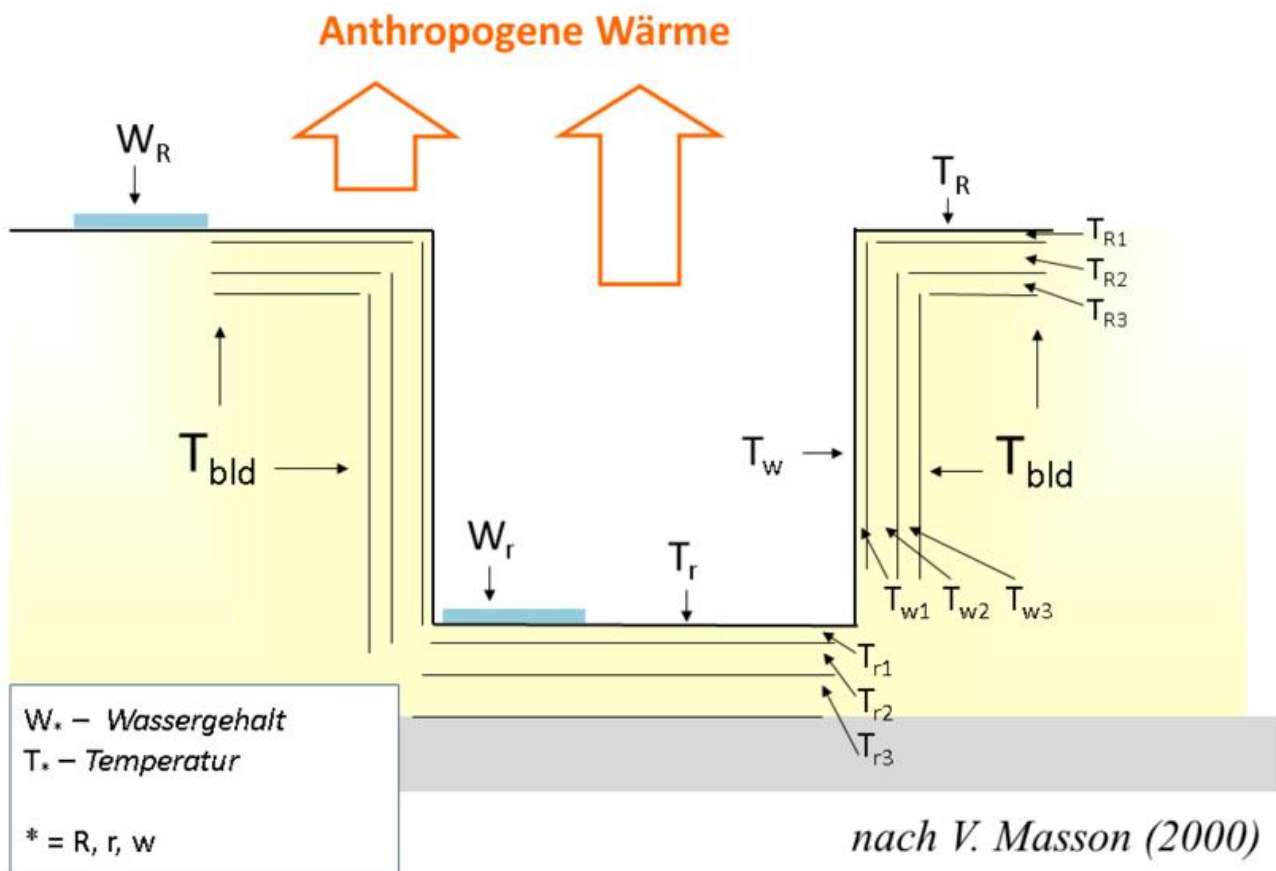


Abb. 41. Schematische Darstellung der Stadtparametrisierung TEB: Für jede Modellgitterzelle wird die Energiebilanz einer typischen repräsentativen Straßenschlucht gerechnet, wobei der Energietransfer durch Gebäudewände, Dächer und durch den Straßenbelag in mehreren Schichten (mind. drei) aufgelöst wird.

TEB berechnet den Energie- und Wasseraustausch zwischen der Atmosphäre und dem bebauten Boden spezifisch für Städte, wobei der Energietransfer durch Hauswände und den Straßenbelag sowie die Abschattung von Gebäude zu Gebäude berücksichtigt werden. Dabei werden für jede Modellgitterzelle Energieaustauschprozesse einer „typischen“ Straßenschlucht modelliert (Abb. 41).

Das neue Modell CCLM+TEB erfordert zusätzliche Daten für die Darstellung der Gebäude und Straßen z.B. Gebäudehöhe und Straßenbreite, Baumaterialien und Struktur (Tab. 8).

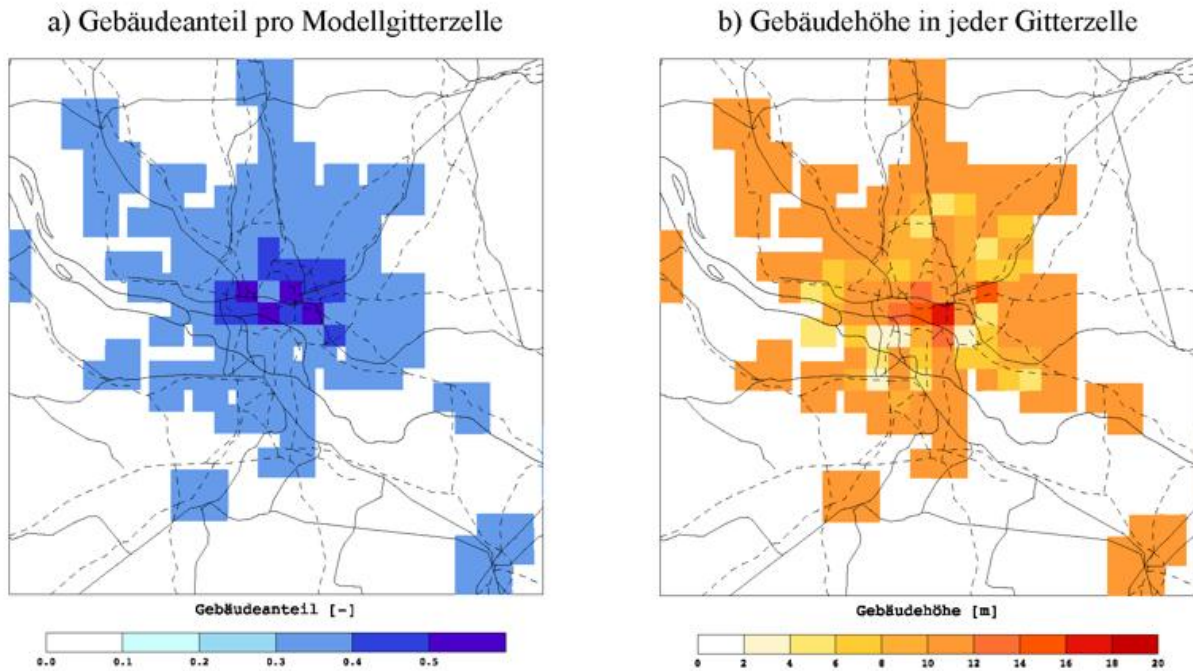


Abb. 42. Daten zur Bebauung der Stadt Hamburg: Gebäudeanteil (a) und mittlere Höhe der Gebäude (b). Die Daten wurden für das Modellgebiet „Norddeutschland“ auf das 2,8 km-Gitter aggregiert.

Die Daten über Gebäudehöhen und Straßenbreiten für das Modellgebiet Hamburg wurden im Rahmen einer Praktikumsarbeit an der BSU Hamburg von Herrn Tristan Laubenstein aus stadt-eigenen Daten vorbereitet (Abb. 42). Diese Daten sind im AcrGIS Format vorhanden und werden für das Modellgebiet „Norddeutschland“ (Abb. 4b) erst auf das 100 m Raster übertragen und danach auf die Skala von 2,8 km aggregiert.

Zur Vereinfachung der Modellsimulationen und auf Grund fehlender genauerer Informationen werden für alle Gebäude im Modellgebiet „Norddeutschland“ die gleichen Wand-, Dach- und Straßenstrukturen (z.B. die Wanddicke und die Anzahl der Modellschichten für die Wand) sowie die gleichen Baumaterialien angenommen (Tab. 8).

Tab. 8. Gebäudeparameter für die Stadtparametrisierung TEB. In Dreiergruppen werden entsprechende Werte für jede Modellschicht angegeben von außen (links) nach innen (rechts) geordnet. Damit ist die äußere Straßenschicht 0,05 m dick, hat eine Wärmekapazität von $1941,2 \times 10^3 \text{ J m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ und eine Wärmeleitfähigkeit von $0,75 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Parameter [Einheit]	Dach	Straße	Wand
Albedo [-]	0,25	0,18	0,30
Emissivität [-]	0,90	0,96	0,92
Anzahl der Schichten	3	3	3
Dicke der Schichten [m]	0,20	0,05	0,02
	0,15	0,10	0,24
	0,01	1,00	0,02
Wärmekapazität $\times 10^3 \text{ [J m}^{-1} \text{ K}^{-1}]$	1372,5	1941,2	1491,0
	1372,5	2112,0	1372,5
	1491,0	1344,0	1491,0
Wärmeleitfähigkeit $\text{[J m}^{-3} \text{ K}^{-1}]$	0,83	0,75	0,27
	0,83	1,51	0,81
	0,27	0,042	0,27

Literaturverzeichnis

- ANGSTRÖM, A. (1924) Report of the International Commission for Solar Research on actinometric investigation of solar and atmospheric radiation - Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 50, 121-125.
- DEE, D. P., UPPALA, S. M., SIMMONS, A. J., BERRISFORD, P., POLI, P., KOBAYASHI, S., ANDRAE, U., BALMASEDA, M. A., BALSAMO, G., BAUER, P., BECHTOLD, P., BELJAARS, A. C. M., VAN DE BERG, L., BIDLOT, J., BORMANN, N., DELSOL, C., DRAGANI, R., FUENTES, M., GEER, A. J., HAIMBERGER, L., HEALY, S. B., HERSBACH, H., HÖLM, E. V., ISAKSEN, L., KÄLLBERG, P., KÖHLER, M., MATRICARDI, M., MCNALLY, A. P., MONGE-SANZ, B. M., MORCRETTE, J. J., PARK, B. K., PEUBEY, C., DE ROSNAY, P., TAVOLATO, C., THÉPAUT, J. N., AND VITART, F. (2011) The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system - Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137, 553-597.
- DOMS, G., FÖRSTNER, J., HEISE, E., HERZOG, H.-J., MIRONOV, D., RASCHENDORFER, M., REINHARDT, T., RITTER, B., SCHRODIN, R., SCHULZ, J.-P., AND VOGEL, G. (2011) A description of the nonhydrostatic regional COSMO model. Part II: Physical parameterization. - 153.
- DOMS, G., AND SCHÄTTLER, U. (2002) A description of the nonhydrostatic regional COSMO model. Part I: Dynamics and Numerics. - 140.
- FRITZ, S., BARTHOLOME, E. M. C., BELWARD, A. S., HARTLEY, A., STIBIG, H.-J., EVA, H. D., MAYAUX, P., BARTALEV, S., LATIFOVIC, R., KOLMERT, S., SARATHIROY, P., AGGARWAL, S., BINGFANG, W., WENTING, X., LEDWITH, M., PEKEL, J. F., GIRI, C., MUCHER, S., DE BADTS, E., TATEISHI, R., CHAMPEAUX, J. L., AND DEFOURNY, P. (2003): Harmonisation, Mosaicing and Production of the Global Land Cover 2000 Database -
- HAMBURG, B. D. F. U. H. (2013) Aktionsplan Anpassung an den Klimawandel - Mitteilung des Senats an die Bürgerschaft, 20/8492
- HOFFMANN, P. (2009): Modifikation von Starkniederschlägen durch urbane Gebiete - Universität Hamburg, pp 1-111.
- IPCC. (2007) IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4) - The Physical Science Basis,
- IPCC. (2013) IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2013 (AR5) - The Physical Science Basis,
- KÖPPEN, W. (1918) Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf - Petermanns Geographische Mitteilungen, 64, 193-203 & 243-248.
- KÖPPEN, W., AND GEIGER, G. (1930-1939) Handbuch der Klimatologie - Gebrüder Borntraeger, Vol.
- KUTLER, W. (2009) Zum Klima im urbanen Raum - 1-12.
- LANDSBERG, H. E. (1981) The urban climate, By H. E. Landsberg. International Geophysics Series, Vol. 28. Academic Press, New York. 1981, Pp. 275 - Academic Press, Vol.
- MASSON, V. (2000) A PHYSICALLY-BASED SCHEME FOR THE URBAN ENERGY BUDGET IN ATMOSPHERIC MODELS - Boundary-Layer Meteorology, 94, 357-397.
- MÜLLER-WESTERMEIER, G. (1995): Numerisches Verfahren zur Erstellung klimatologischer Karten - Deutscher Wetterdienst, pp 17.
- RIECKE, W., UND ROSENHAGEN, G. (2010) Das Klima in Hamburg : Entwicklung in Hamburg und der Metropolregion (mit CD) - Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 234, 1-82.

- RIEDIGER, U. (2013) Wetterlagen ändern sich mit dem Klimawandel - KLIMASTATUSBERICHT 2012, 81-85.
- RIEDIGER, U., AND GRATZKI, A. (2014) Future weather types and their influence on mean and extreme climate indices for precipitation and temperature in Central Europe - Meteorologische Zeitschrift, 23, 231-252.
- ROCKEL, B., AND GEYER, B. (2008) The performance of the regional climate model CLM in different climate regions, based on the example of precipitation - Meteorologische Zeitschrift, 17, 487-498.
- ROCKEL, B., WILL, A., AND HENSE, A. (2008) The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM) - Meteorologische Zeitschrift, 17, 347-348.
- ROSENHAGEN, G. (2007) Extreme Sturmfluten an den deutschen Küste - Klimastatusbericht, 80-83.
- SCHLÜNZEN, K. H., HOFFMANN, P., ROSENHAGEN, G., AND RIECKE, W. (2009) Long-term changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg - International Journal of Climatology, 30, 1121-1136.
- STEPPELER, J., DOMS, G., SCHÄTTLER, U., BITZER, H. W., GASSMANN, A., DAMRATH, U., AND GREGORIC, G. (2003) Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM - Meteorology and Atmospheric Physics, 82, 75-96.
- TRUSILOVA, K., FRÜH, B., BRIENEN, S., WALTER, A., MASSON, V., PIGEON, G., AND BECKER, P. (2013) Implementation of an Urban Parameterization Scheme into the Regional Climate Model COSMO-CLM - Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52, 2296-2311.
- VON STORCH, H., UND CLAUSSEN, M. (2011) Klimabericht für die Metropolregion Hamburg - Springer, ISBN 978-3-642-16035-6.

Berichte des Deutschen Wetterdienstes

Nr. 246 Hänsel, Stephanie; Schucknecht, Anne; Böttcher, Falk; Bernhofer, Christian; Matschullat, Jörg:
Niederschlagsveränderungen in Sachsen von 1901 bis 2100 - Starkniederschlags- und Trockenheitstrends

Nr. 245 P. Winkler:
Untersuchung zu historischen und neuzeitlichen Dampfdruckmessungen am Observatorium Hohenpeißenberg

Nr. 244 Ch. Brendel; E. Brisson; F. Heyner; E. Weigl; B. Ahrens:
Bestimmung des atmosphärischen Konvektionspotentials über Thüringen

Nr. 243 K. Hoffmann; W. Bivour; B. Früh; M. Koßmann; P.-H. Voß:
Kimauntersuchungen in Jena für die Anpassung an den Klimawandel und seine erwarteten Folgen - ein Ergebnisbereich

Nr. 242 C. Stein; G. Maliltz:
Das Hochwasser an Elbe und Donau im Juni 2013: Wetterentwicklung und Warnmanagement des DWD: Hydrometeorologische Rahmenbedingungen

Nr. 241 A. Hoff; C. Drüe; H.-R. Sonnabend:
Messphysik und Datenverarbeitung der Verkehrsflugzeuge als meteorologische Sensorträger

Nr. 240 U. Sievers:
Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3. - Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung

Nr. 239 F. Herbert:
Die Erschließung der Rossby-Welle durch Lärmfilterung

Nr. 238 G. Augter:
Vergleich der Referenzmessungen des Deutschen Wetterdienstes mit automatisch gewonnenen Messwerten

Nr. 237 B. Frühauf, M. Koßmann, M. Roos:
Frankfurt am Main im Klimawandel: Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung

Nr. 236 G. Augter, M. Roos:
Berechnung von Sturmintensitäten für Deutschland

Nr. 235 U. Maier, G. Müller-Westermeier:
Verifikation klimatologischer Rasterfelder

Nr. 234 W. Riecke, G. Rosenhagen:
Das Klima in Hamburg: Entwicklung in Hamburg und der Metropolregion

Nr. 233 P. Winkler:
Wissenschaftshistorische Untersuchungen zur Geschichte und insbesondere zur Datenqualität der langen meteorologischen Reihen des Observatoriums Hohenpeißenberg

Gesamtliste der „Berichte des Deutschen Wetterdienstes“ unter www.dwd.de/bibliothek.



Deutscher Wetterdienst

Fachinformationsstelle und Deutsche Meteorologische Bibliothek
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach