

Klimauntersuchungen in Jena für die Anpassung an den Klimawandel und seine erwarteten Folgen

Ein Ergebnisbericht

von Kristin Hoffmann, Wolfgang Bivour, Barbara Früh, Meinolf Koßmann,
Peter-Hinrich Voß



243

Berichte des Deutschen Wetterdienstes

Klimauntersuchungen in Jena für die Anpassung an den Klimawandel und seine erwarteten Folgen

Ein Ergebnisbericht

von Kristin Hoffmann, Wolfgang Bivour, Barbara Früh, Meinolf Koßmann,
Peter-Hinrich Voß

Zitationsvorschlag:

Hoffmann, Kristin; Bivour, Wolfgang; Früh, Barbara; Koßmann, Meinolf; Voß, Peter-Hinrich (Hrsg.: Deutscher Wetterdienst):
Klimauntersuchungen in Jena für die Anpassung an den Klimawandel und seine erwarteten Folgen. Ein Ergebnisbericht.
Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 2014.
(Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 243)

ISSN der Online-Ausgabe: 2194-5969

ISBN 978-3-88148-471-8

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: Ursel Behrens, Kristin Hoffmann

Herausgeber und Verlag:

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

Anschrift der Autoren:

Kristin Hoffmann
Wolfgang Bivour

Deutscher Wetterdienst
Abt. Klima- und Umweltberatung
Michendorfer Chaussee 23
14473 Potsdam

Dr. Barbara Früh
Dr. Meinolf Koßmann
Peter-Hinrich Voß
Deutscher Wetterdienst
Abt. Klima- und Umweltberatung
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach

Zusammenfassung

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) initiierten Forschungsprogrammes „Experimenteller Wohnungs- und Städtebau“ (ExWoSt) mit dem Schwerpunkt „Kommunale Strategien und Potenziale zum Klimawandel“ führte der Deutsche Wetterdienst (DWD) umfangreiche stadtklimatologische Untersuchungen für die Stadt Jena mit ihrem Modellvorhaben „Jenaer Klima-Anpassungs-Strategie“ (JenKAS) durch. Die Untersuchungen des DWD hatten die Messung und Simulation der sommerlichen Temperaturverhältnisse und nächtlichen Kaltluftverhältnisse für die städtebauliche Ist-Situation und einen Planfall zum Ziel. Aus den Simulationsresultaten geht hervor, dass vor dem Hintergrund des voranschreitenden Klimawandels in Jena bis zur Mitte des Jahrhunderts mit einer zunehmenden Wärmebelastung zu rechnen ist, die lokal dort verstärkt auftreten kann, wo das Klimaänderungssignal durch städtebauliche Verdichtungsmaßnahmen überlagert wird. Die Schaffung neuer Grünflächen kann hingegen eher eine Minderung der Wärmebelastung bewirken. Die Existenz eines vermuteten, bislang aber nicht ausreichend belegten nächtlichen Saaletalwindes konnte im Rahmen der Untersuchungen nachgewiesen werden. Trotz seiner nur moderaten Windgeschwindigkeiten trägt er durch sein häufiges Auftreten signifikant zur nächtlichen Kühlung und Durchlüftung der Stadt Jena bei. Die Ergebnisse der DWD-Untersuchungen flossen in die Erstellung einer Klimafunktionskarte der Firma Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz (ThINK) ein, die für die Stadt Jena die Basis zur Erarbeitung einer klimaangepassten Stadtentwicklung darstellt.

Summary

In the context of the research programme “Experimental Housing and Urban Development” (ExWoSt) and the appendant research area “Urban Strategies and Potentials to Tackle Climate Change”, initiated by the Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development (BMVBS), the German Meteorological Service (DWD) conducted a thorough study for Jena and its project “Jena’s climate adaptation strategy” (JenKAS). The climatological investigations of DWD aimed at measuring and simulating thermal characteristics for the summer season and nocturnal cold air characteristics for the current urban-planning state and a hypothetical future urban-planning state. Climate simulations for recent and future regional climate conditions show that urban heat load will generally increase until mid-century for the case of negligible urban development. Simulations for the hypothetical urban-planning state prove that this increase in heat load will be strongly enhanced in areas of hypothetical urbanization, while conversion of built-up areas into green spaces will alleviate the effects of regional climate change. Moreover, the existence and moderate intensity of a so far assumed nocturnal down-valley wind, the so-called Saale Valley wind, was proven. Due to their frequent occurrence these down-valley winds significantly contribute to the ventilation and cooling of Jena during nighttime. Finally, the results of DWD’s investigations provided a basis for the “Thuringian Institute for Sustainability and Climate Protection” (ThINK) to generate a map of climate functions, which in turn served as a basis for Jena’s “Municipal Department of City Planning” to establish a climate-adapted urban development strategy.

Inhalt

1	Einleitung.....	7
1.1	Problemrahmen	7
1.2	Ziel	9
1.3	Aufbau.....	9
1.4	Vorgehen	10
2	Das Untersuchungsgebiet	11
2.1	Lage, Ausdehnung und bevölkerungsstatistische Angaben	11
2.2	Naturräumliche Einordnung.....	12
2.3	Flächennutzung	12
3	Das Untersuchungskonzept.....	13
3.1	Messnetz und Computersimulationen	13
3.2	Verwendete Wetterstationen	14
3.3	Profilmessfahrten, Schwachwindmessungen und Rauchpatronenexperiment ..	16
4	Datengrundlage.....	18
5	Untersuchungsergebnisse.....	19
5.1	Allgemeine Bemerkungen.....	19
5.2	Klimaanalyse.....	20
5.2.1	Lufttemperatur	20
5.2.2	Niederschlag und Schneebedeckung	23
5.2.3	Relative Luftfeuchte und Nebel.....	26
5.2.4	Sonnenscheindauer und Bewölkung.....	27
5.2.5	Windverhältnisse	29
5.2.6	Exkurs: Kaltluftflüsse	33
5.2.7	Exkurs: Inversion.....	37
5.3	Fünfmonatige Messungen im Zeitraum vom 01.05. – 30.09.2011	38
5.3.1	Vorbemerkungen	38
5.3.2	Analyse der Messungen an den temporären und stationären Wetterstationen	40

5.3.3	Analyse der thermischen Profilmessfahrten	54
5.3.4	Analyse der Schwachwindmessungen	61
5.3.5	Analyse zum Einsatz der Rauchpatronen	62
5.4	Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen	63
5.4.1	Messungen und KLAM_21-Simulationen	63
5.4.2	Messungen und MUKLIMO_3-Simulationen	66
6	Hinweise	68
6.1	Allgemeine Bemerkungen	68
6.2	Schlussbemerkungen	69
7	Literaturverzeichnis	71
8	Abkürzungsverzeichnis	77
9	Abbildungsverzeichnis	81
10	Tabellenverzeichnis	87
11	Glossar	89
Anlage 1	.....	93
12	Modellrechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21	96
12.1	Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21	96
12.2	Das Simulationsgebiet	97
12.3	Eingabedaten	100
12.4	Darstellung der Modellergebnisse	101
12.5	Modellergebnisse	105
12.5.1.	Der Istzustand	105
12.5.2	Der Planzustand	116
12.5.3	Zusammenfassung Ergebnisse Ist- und Planzustand	129
12.6	Vergleich Modellergebnisse mit Messungen	13030
12.7	Zusammenfassung	131
12.8	Hinweise	134

Anlage 2	137
13 Stadtklimasimulationen mit dem Modell MUKLIMO_3	140
13.1 Stadtklimasimulationen mit MUKLIMO_3 für die Stadt Jena	140
13.2 Methodik	141
13.2.1 Allgemeine Erläuterungen	141
13.2.2 Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3	142
13.2.3 Quadermethode.....	145
13.2.4 Klimazeitreihen für die Quadermethode.....	147
13.3 Modellkonfiguration für Jena.....	148
13.3.1 Das MUKLIMO_3-Modellgebiet.....	148
13.3.2 Der Quader	152
13.3.3 Verwendete Zeitreihen.....	153
13.3.4 Modellsimulation für einen Tag	154
13.4 Ergebnisse für den Zeitraum 1971/2000	158
13.4.1 Evaluierung der simulierten Klimaindizes	158
13.4.2 Analyse des Istzustandes 1971/2000	158
13.4.3 Auswirkungen unterschiedlicher Bebauungsstrukturen	161
13.4.4 Auswirkungen der geplanten Bebauung und eines Planspiels.....	163
13.4.5 Regionale Klimaprojektionen als Eingabe für die Quadermethode	165
13.5 Klimaänderungssignale in der Zukunft	169
13.5.1 Auswirkung der Klimaänderung bis zum Zeitraum 2021/2050	169
13.5.2 Auswirkung der geplanten Bebauung im Zeitraum 2021/2050.....	176
13.6 Vergleich der MUKLIMO_3-Simulationsergebnisse mit Ergebnissen aus Klimamessungen (Stationsmessungen und Profilmessfahrten) in Jena	179
13.7 Schlussbemerkungen.....	180

1 Einleitung

1.1 Problemrahmen

Die Auswirkungen der Urbanisierung, der postindustriellen Produktion und des technologischen Fortschritts spiegeln sich nicht nur im Wesen und Erscheinungsbild unserer modernen Städte wider, sondern schlagen sich auch in der Ausprägung ihres Klimas nieder: dem sog. Stadtklima, unter dem nachfolgend die anthropogen bedingte Modifikation des Lokalklimas gegenüber dem des unbebauten städtischen Umlandes zu verstehen ist (HELBIG und SCHIRMER 1999, KUTTLER 2009). Die Veränderung des Lokalklimas wird durch die komplexen Wechselwirkungen der Klimatelemente (Lufttemperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte etc.) mit den städtischen Raumnutzungen und -strukturen hervorgerufen (PARLOW 2007, KUTTLER 2009). Faktoren wie z. B. Bebauungsart, -dichte, Versiegelungsgrad, Vegetationsanteil, Emissionen und Abwärme aus Verkehr, Hausbrand, Industrie und Gewerbe sind diesbezüglich ausschlaggebend.

Allgemein grenzt sich das Stadtklima – u. a. auf Grund der dichteren Bebauung und des höheren Energieumsatzes von Verkehr, Wirtschaft und Haushalten – etwa durch höhere Lufttemperaturen, teils verringerte Windgeschwindigkeiten oder eine verminderte Luftfeuchtigkeit von dem Klima seines Umlandes ab (KUTTLER 1997, MATZARAKIS 2001, PARLOW 2007). Derartige Effekte verschärfen sich unter Umständen während extremer, austauscharmer Wetterlagen und wirken sich ggf. negativ auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Stadtbewohner aus (KUTTLER 2009).

Im Jahresmittel unterscheidet sich die Lufttemperatur zwischen Städten und ländlichen Regionen in Deutschland recht deutlich voneinander. Im Vergleich fällt sie im städtischen Raum um etwa 0,5 bis 2 °C höher aus (FRÜH, KOBMANN und ROOS 2011). Dieser Unterschied zum Umland, auch als städtischer Wärmeinseleffekt bekannt (Urban Heat Island, UHI), kann sich während sonnenscheinreicher, windschwacher Wetterlagen insbesondere in stark verdichteten Innenstadtbereichen verschärfen und macht sich vor allem während der Nachtstunden bemerkbar. Im Extremfall ergeben sich in der Innenstadt um mehr als 8 °C höhere Lufttemperaturen (ebd.).

Angesichts ihrer hohen Bebauungs- und Einwohnerdichte sowie komplexen Infrastruktursysteme sind urbane Räume besonders vulnerabel gegenüber wetterbedingten Extremsituationen (Hitzeperioden, Starkniederschläge und Sturmereignisse etc.), die zu einer enormen Belastung der Bewohner führen können, einzustufen (BRENNER und DOSCH 2010). Die Anforderungen der Stadtbewohner an urbane Infrastrukturen und Versorgungssysteme (z. B. Integration adäquater Belüftungs-, Abschattungs- und Kühlungssysteme in Gebäuden) werden daher künftig sicherlich wachsen. Zugleich wird die Berücksichtigung von präventiven Maßnahmen zur Reduzierung des Eintrags von Hitze in Stadtgebiete (z. B. Abwärme von Wohngebäuden, Industrie) in der Stadtplanung eine zunehmend größere Rolle spielen (MAYER 2011). Daneben werden Maßnahmen wie die Schaffung neuer und Aufrechterhaltung bestehender klimatisch wirksamer Ausgleichsflächen und Ventilationsschneisen zur Belüftung und der Einsatz klimafreundlicher Bausubstanzen gewiss an Bedeutung gewinnen.

Eine nicht-integrierte, nicht-vorausschauende Stadtplanung kann erhebliche klimatische Beeinträchtigungen nach sich ziehen, die sich nicht nur negativ auf die Leistungsfähigkeit einzelner Quartiere sondern auch auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bewohner auswirken können. Hinreichende Kenntnisse über die (Aus-) Wirkungen der städtischen (Bebauungs-) Strukturen (Ist- und Planzustände) auf das Lokalklima sind daher von essentieller Bedeutung.

Vor dem Hintergrund des voranschreitenden Klimawandels und seinen Folgen sind Städte jetzt gefordert, nachhaltige Strategien zur Anpassung (Adaptation), aber auch zum Schutz zu entwickeln (Mitigation), die ausbaufähig sind und bei Bedarf weiterentwickelt werden können (vgl. BBSR 2011). Dies stellt jedoch für viele Städte eine enorme Herausforderung dar. Zur Unterstützung der Kommunen förderte das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) im Rahmen des Ressortforschungsprogramms „Experimenteller Wohnungs- und Städtebau“ (ExWoSt) daher die Erarbeitung notwendiger Grundlagendaten (BMVBS 2010/2011).

Im Zuge des im BMVBS angesiedelten Forschungsprogrammes ExWoSt stand in den Jahren 2009 bis 2012 das Forschungsfeld „Urbane Strategien zum Klimawandel“ mit dem Schwerpunkt „Kommunale Strategien und Potenziale zum Klimawandel“ im Fokus. Während dieses Zeitraumes setzten sich bundesweit neun ausgewählte Städte (siehe Abbildung 1) in sogenannten Modellvorhaben intensiv mit dem Thema der zukunftsfähigen klimagerechten Stadtplanung und -entwicklung auseinander.



Abbildung 1: Lage der ExWoSt-Modellstädte im Bundesgebiet (Quelle: <http://www.bbsr.bund.de>)

In unterschiedlicher, innovativer Herangehensweise wurden in den neun Modellstädten exemplarisch zunächst mittel- bis langfristige Strategien und Konzepte zur kommunalen Adaptation bez. zu erwartender Auswirkungen des Klimawandels entwickelt und anschließend in der Praxis erprobt. Diejenigen Strategien und Konzepte, die sich im Ergebnis der Modellvorhaben als relevant und praxistauglich erwiesen, wurden und werden nach Möglichkeit dauerhaft in der Stadtplanungspraxis verankert.

Unterstützung erfuhren die Modellstädte bei der Realisierung ihrer Modellvorhaben u. a. durch den Deutschen Wetterdienst (DWD), der seine umfangreichen Klimaservices im Rahmen von ExWoSt und dem zugehörigen Forschungsfeld „Urbane Strategien zum Klimawandel“ zur Verfügung stellte.

Der DWD stellte dabei nicht nur Daten und Fachwissen bereit. Zum Teil wurden umfangreiche stadtklimatologische Untersuchungen in einigen Modellstädten durchgeführt, die u. a. temporäre Klimamessungen, den Einsatz von Klimamodellen und die Erstellung von Untersuchungsberichten umfassten. Die Stadt Jena ist eine Modellstadt, die der DWD bei der Realisierung ihres Modellvorhabens Jenaer-Klima-Anpassungs-Strategie (JenKAS) intensiv unterstützte. Mit JenKAS hatte sich die Stadt Jena zum Ziel gesetzt, ihre Datenbasis zur Umsetzung einer klimawandelgerechten Stadtentwicklung zu aktualisieren, die Bevölkerung für die Thematik „Klimawandel – Folgen und Handlungsoptionen“ zu sensibilisieren, Informationen zum Klimawandel mittels eines lokalen PC-gestützten Entscheidungsunterstützungswerkzeuges nutzbar zu machen sowie ein Handbuch zum Schutz und zur Anpassung an den Klimawandel und seine möglichen Folgen zu erarbeiten.

1.2 Ziel

Ziel des vorliegenden Berichtes (incl. seiner Anlagen 1 und 2) ist es, die klimatischen Besonderheiten, die thermische Belastungssituation und die nächtlichen Kaltluftverhältnisse Jenas für die derzeitige und mögliche künftige städtebauliche Situation aufzuzeigen. Als Basis wird zunächst der klimatische Istzustand der Stadt Jena beschrieben. Daran anknüpfend wird die Ausprägung ausgewählter Klimatelemente für windschwache Strahlungswetterlagen illustriert. Anschließend werden nächtliche Kaltluftabflüsse und die Auswirkungen simulierter städtebaulicher Veränderungen und angenommener regionalklimatischer Veränderungen auf das Lokalklima näher betrachtet. Die zu erwartenden lokalklimatischen Veränderungen werden dokumentiert. Einen weiteren Schwerpunkt stellt die Überprüfung der Existenz eines vermuteten, jedoch bislang nicht bestätigten Saaletalwindes dar.

Zu Beginn der Untersuchungen erfolgte über die Auswertung der Literatur sowie einer Orts- und Geländebesichtigung eine Annäherung an die Thematik. Als nächstes wurden untersuchungsrelevante Fragestellungen abgeleitet:

- Welche Ausprägungen zeigt das Lokalklima Jenas derzeit?
- Wie gestaltet sich die aktuelle thermische Belastungssituation in Jena?
- Wie verhält sich die nächtliche Kaltluftsituation in Jena?
- Existiert ein vermuteter, jedoch bis dato noch nicht verifizierter Saaletalwind?
- Wie schlagen sich die Auswirkungen des Klimawandels in unterschiedlich städtebaulich geprägten Strukturen Jenas nieder?
- Wie sah die Wärmebelastung Jenas in der Vergangenheit aus und wie wird sie – unter Berücksichtigung simulierter Änderungen der Bebauung und Flächennutzung sowie angenommener regionalklimatischer Veränderungen – in der Zukunft ausfallen?

Die Ableitung der Fragestellungen bildete die Basis zur Entwicklung eines adäquaten Untersuchungskonzeptes.

1.3 Aufbau

Der vorliegende Bericht gliedert sich in 11 Kapitel. In Kapitel 1 wird zunächst über eine allgemeine thematische Einleitung der Problemrahmen hergeleitet und die Verankerung des vorliegenden Berichtes mit dem Ressortforschungsprogramm StadtKlimaExWoSt und dem Modellvorhaben JenKAS aufgezeigt, bevor die Zielstellungen, das Vorgehen und die untersuchungsrelevanten Fragestellungen benannt werden. In Kapitel 2 wird der zu betrachtende Untersuchungsraum näher beschrieben. Kapitel 3 enthält Aussagen zum Messprogramm, Kapitel 4 zur Datenbasis. Im anschließenden Kapitel 5 wird zunächst das Klima des Untersuchungsraumes näher beschrieben, wobei auf regionalklimatische Bedingungen und Besonderheiten hingewiesen wird. Es folgt die Analyse der erhobenen Primärdaten und die Vorstellung der Resultate aller drei Teilkomponenten (Messungen und durchgeführte Modellsimulationen) in der Zusammenschau. Die Einzelergebnisse der Modellsimulationen mit dem mikroskaligen urbanen Klimamodell MUKLIMO_3 und dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 sind wegen ihres erheblichen Umfangs als „Teilberichte“ beigefügt (vgl. Anlagen 1 und 2). Kapitel 6 enthält allgemeine Hinweise und Schlussbemerkungen. Die verwendete Literatur ist im Kapitel 7 aufgelistet. Kapitel 8 sind Erläuterungen zu Abkürzungen zu entnehmen. An Kapitel 8 schließen sich das

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis (Kapitel 9 und 10). Wichtige Begriffe sind in einem Glossar erläutert (Kapitel 11).

In den Anlagen 1 und 2 sind in fortlaufenden Kapiteln (siehe Kapitel 12 und Kapitel 13) die ausführlich beschriebenen Ergebnisse zu den jeweiligen Computersimulationen beigelegt.

1.4 Vorgehen

Die Zielstellung der Untersuchung bedingte die Anwendung eines mehrschichtigen Verfahrens bei der Datengewinnung und -auswertung, wobei eine Kopplung unterschiedlicher Methoden (Datenerhebung im Gelände, Modellsimulationen, Auswertung vorliegender Daten) als geeignet erschien (vgl. KUTTLER und DÜTEMEYER 2003).

Der vorliegende Ergebnisbericht stützt sich demnach auf die Auswertung durchgeführter temporärer und mobiler Geländemessungen, die Analyse klimatologischer Zeitreihen von Wetterstationen durch das Regionale Klimabüro Potsdam (RKB PD). Ferner bilden die Ergebnisse von Modellrechnungen durch das Zentrale Klimabüro (ZKB) Offenbach einen zentralen Bestandteil dieses Berichtes. Die vorgestellten Ergebnisse der Modellrechnungen – erstellt mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des DWD – wurden im ZKB und RKB der Abteilung Klima- und Umweltberatung in Offenbach bzw. Potsdam beschrieben und analysiert. Diejenigen, die mit dem mikroskaligen urbanen Klimamodell MUKLIMO_3 des DWD erstellt worden sind, wurden im ZKB der Abteilung Klima- und Umweltberatung in Offenbach beschrieben und analysiert. Die KLAM_21-Modellsimulationen wurden durch Dipl.-Met. Peter-Hinrich Voß und die MUKLIMO_3-Modellsimulationen von Dr. Meinolf Koßmann und Frau Dr. Barbara Früh des ZKB in Offenbach realisiert.

2 Das Untersuchungsgebiet

2.1 Lage, Ausdehnung und bevölkerungsstatistische Angaben

Jena ist im Nordosten des Bundeslandes Thüringen im Städtedreieck Erfurt (ca. 38 km westnordwestlich), Gera (ca. 35 km ost-südöstlich), Rudolstadt (ca. 30 km südwestlich) zu finden (siehe Abbildung 2). Die größte Ausdehnung des Stadtgebietes zwischen den Ortsteilen Maua im Süden und Kunitz im Norden beträgt etwa 15 km. In Ost-West-Richtung sind es rund 12 km. Dabei erstreckt sich das gesamte Stadtgebiet über eine Fläche von etwa 114,48 km² (THÜRINGER LANDESAMT FÜR STATISTIK 2012).

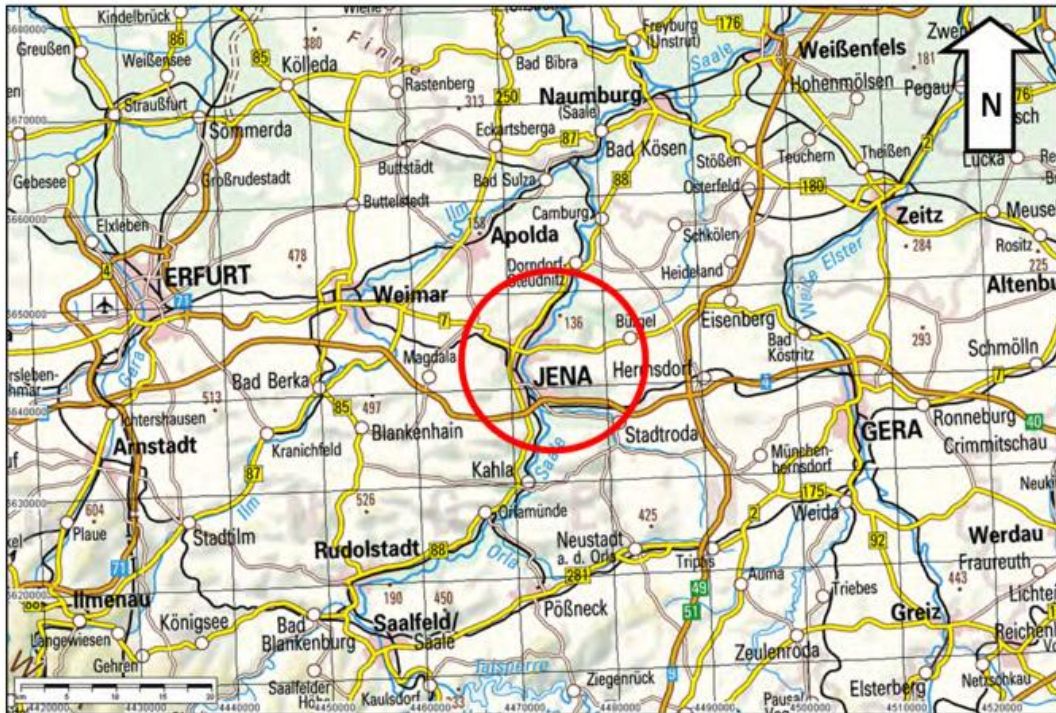


Abbildung 2: Lage der Stadt Jena (Quelle: TK 1:1 Mio. © GeoBasisDE / TL VermGeo (Karte verändert))

Mit 106.915 Einwohnern ist Jena zu den kleineren Großstädten Deutschlands zu zählen (THÜRINGER LANDESAMT FÜR STATISTIK, Stand: 31.12.2012). Im Vergleich mit anderen Städten Thüringens hat Jena allerdings eine recht hohe Bevölkerungsdichte (vergleiche Tabelle 1), was sich im Stadtbild folglich durch eine kompakte Urbanität sowie einen hohen Verdichtungsgrad in einigen Quartieren widerspiegelt.

Tabelle 1: Statistische Angaben Jenas im Vergleich mit anderen Städten Thüringens (THÜRINGER LANDESAMT FÜR STATISTIK, Stand: 31.12.2012)

	Jena	Erfurt	Gera	Suhl	Weimar
Einwohnerzahl	106 915	203 485	95 384	35 967	63 236
Fläche in km²	114,48	269,15	151,92	102,71	84,91
Bevölkerungsdichte (Einwohner je km²)	933	756	628	350	745

2.2 Naturräumliche Einordnung

Jena liegt inmitten des zentraleuropäischen Mittelgebirgs- und Stufenlandes und ist auf regionaler Ebene der östlichen Mittelgebirgsschwelle zuzuordnen. Aus naturräumlicher Sicht gehört Jena zum Thüringer Becken mit Randplatten und dessen Subeinheit Südliche Randplatten des Thüringer Beckens, an die grob im westlichen bis nordwestlichen Halbraum das Thüringer Becken und im östlichen Halbraum das Sächsische Hügel- und Erzgebirgsvorland grenzen (GELLERT 1953, LIEDTKE und MARCINEK 2002, BfN 2011). Im südöstlichen Halbraum tangiert die Saale-Elster-Sandsteinplatte unmittelbar den Jenaer Verdichtungsraum. Innerhalb der Haupteinheitengruppe Thüringer Becken mit Randplatten liegt Jena im Bereich der „Ilm-Saale- und Ohrdruffer Platte“. Die „Ilm-Saale- und Ohrdruffer Platte“ ist als relativ ebene, weit aufgefächerte Hochfläche zu beschreiben, die von steilwandigen, teils tief in das Relief eingeschnittenen Flusstälern (z. B. Ilm, Saale) durchbrochen wird. Sie erstreckt sich als recht breites Band etwa von Bad Kösen im Nordosten über Apolda, Weimar, Jena, Erfurt, Arnstadt und Ohrdruf nach Südwesten. Ferner hat der Betrachtungsraum Anteil am Naturraum Saaleaue (BfN 2011).

Das Jenaer Stadtgebiet liegt inmitten des „Mittleren Saaletals“ und erstreckt sich entlang der Saale – ausgehend vom Mündungsbereich des Leutrabaches im Südwesten bis etwas über den Mündungsbereich des Gembdenbaches im Nordosten. Die Saale ist stellenweise um mehr als 250 m tief in das Relief eingesenkt und durchfließt das Stadtgebiet in einem leichten Bogen von Südsüdost nach Nordnordwest und schließlich nach Nordnordost. Auf Grund der Lage Jenas im Tal der Saale und ihrer Zuflüsse (Mühlalleutra, Ammerbach, Gottichsgraben, Steinbach, Laasaner Bach, Gembdenbach, Pennickenbach, Roda usw.), welche sich ebenfalls im Laufe der Zeit tief in die Landschaft eingeschnitten und damit zur Ausbildung schluchtartiger Formationen beigetragen haben, ist der Untersuchungsraum durch eine mannigfaltig strukturierte Orografie gekennzeichnet. Außerhalb der Auen und Niederungen steigt das Gelände rasch an und gipfelt in langgestreckten, bewaldeten und von Kalk-Magerrasen geprägten Höhenzügen und Kuppen aus Muschelkalk und Buntsandstein der Triaszeit, die innerhalb des administrativen Stadtgebietes Höhen über 300 m NN erreichen (GELLERT 1953). Die höchste Erhebung innerhalb des Verdichtungsraumes stellt mit rund 397 m NN der Cospoth dar. Im Gegensatz dazu befindet sich der tiefste Geländepunkt in einer Höhenlage um ca. 136 m NN, im Bereich der Oberen Aue, nördlich von Kunitz. Insgesamt ergeben sich Höhenunterschiede im Stadtgebiet von bis zu 261 m.

2.3 Flächennutzung

Jena ist mit rund einem Drittel Waldfläche gemessen an der Gesamtfläche eine vergleichsweise „grüne“ Stadt. Daneben nehmen landwirtschaftlich genutzte Flächen v. a. im Nordwesten (Vierzehnheiligen, Lützeroda und Cospeda), aber auch im Nordosten (zwischen Kunitz und Laasan) und im Osten (Wogau) einen relativ großen Anteil ein. Markant sind die überschwemmungsgefährdeten Auenflächen, z. B. im Norden des Stadtgebietes. Großflächige Industrie- und Gewerbegebiete sind schwerpunktmäßig westlich der Saale auszumachen: Gewerbegebiet Zwätzen-Ost, Löbstedt-Ost und Saalepark im Norden, Gewerbe- und Industriepark Tatzendpromenade im Westen sowie Gewerbegebiet Göschwitz, Lobeda Süd, Maua Südwest und Süd im Süden. Größere Zusammenhängende Waldareale befinden sich im Osten und Westen des Stadtgebietes, vorrangig in den höheren Lagen (z. B. auf dem Jenzig, auf den Kernbergen, im Naturschutzgebiet Jenaer Forst zwischen dem Mühlthal und Ammerbacher Tal). Hier dominieren Laub- und Mischwald. Daneben sind einige Hangbereiche durch Kalkmagerrasen und Felssteppenvegetation charakterisiert.

Die Bebauung Jenas erstreckt sich beiderseits der Saale an den Hängen und entlang der Talsohlen. Historisch bedingt ist der Altstadtkern am stärksten verdichtet (Abbildung 3).



Abbildung 3: Ansichten von Jena

Mit Blick auf das überregionale Verkehrsnetz liegt Jena westlich der in Nord-Süd-Richtung verlaufenden BAB 9 (Berlin-München). Die BAB 4 (Dresden-Eisenach-Frankfurt/Main) führt in Ost-West-Richtung direkt durch das südliche Stadtgebiet. Der motorisierte Individualverkehr verläuft nahezu durch das gesamte Stadtgebiet: in Ost-West-Richtung über die B 7 sowie in Nord-Süd-Richtung über die B 88. Zudem verlaufen in grober Nord-Süd-Richtung Bahngleise durch Jena.

3 Das Untersuchungskonzept

3.1 Messnetz und Computersimulationen

Die Untersuchungen des DWD in Jena hatten die Messung und Simulation sommerlicher Temperaturverhältnisse für die Vergangenheit und Zukunft, unter Annahme regionalklimatischer und städtebaulicher Veränderungen (Anlage 2), sowie die Messung und Simulation der nächtlichen Kaltluftverhältnisse für die städtebauliche Ist-Situation und einen Planfall (Anlage 2) zum Ziel. In enger Abstimmung mit der Stadt Jena und ihrer lokalen Forschungsassistenz, dem Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz (ThINK), wurde ein umfangreiches Messkonzept erarbeitet. Dieses Messkonzept umfasst neben dem Einbezug der Daten von geeigneten Wetterstationen mit langen Messreihen und denen eines zusätzlich eingerichteten meteorologischen Sondermessnetzes sowie die Durchführung von temporären, mobilen Geländemessungen mit einem mit meteorologischer Messtechnik ausgestatteten Fahrzeug und Rauchpatronenexperimente während ausgewählter autochthoner Wetterlagen.

Auf Grund der Weitmaschigkeit des DWD-Messnetzes war es erforderlich, auf Klimadaten von Fremdnetzanbietern zurückzugreifen und ergänzend ein temporäres meteorologisches Sondermessnetz einzurichten. Da im Rahmen der Untersuchung nur bestimmte Phänomene des städtischen Klimas von Interesse waren, genügte die Betrachtung eines verkürzten Messzeitraumes (KUTTLER und DÜTEMEYER 2003).

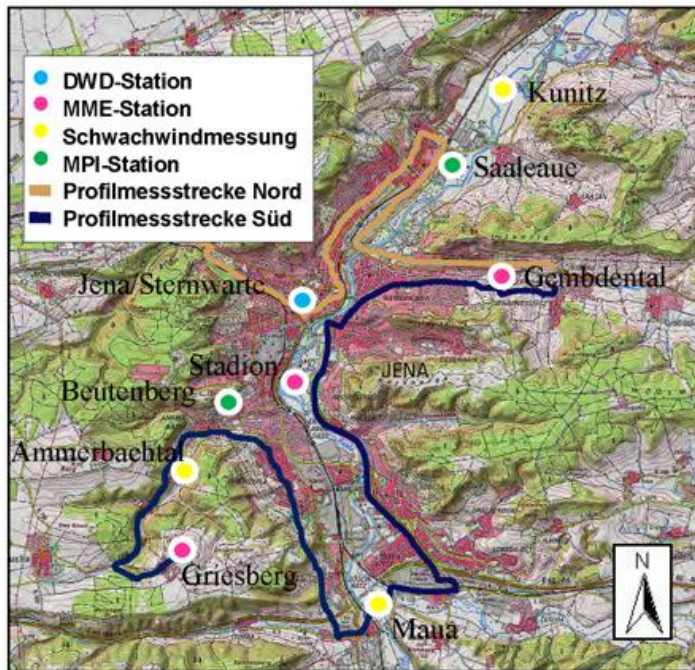


Abbildung 4: Lage der Messstationen und Profilmessrouten (Quelle: TK 1:50 000 © GeoBasisDE / TL VermGeo (Karte verändert))

Das temporär eingerichtete meteorologische Sondermessnetz umfasst drei mobile Wetterstationen: eine in zentraler Lage im Saaletal (Station Stadion), eine in einem Seitental (Station Gembdental) und eine in Gipfelage (Station Griesberg). Zusätzlich wurden in Kunitz, Maua und im Ammerbachtal während ausgewählter, schwachwindiger Wetterlagen Schwachwindmessgeräte positioniert. Darüber hinaus wurden Daten der Wetterstationen Beutenberg und Saaleaue des Max-Planck-Instituts für Biogeochemie (MPI-BGC), der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG)

sowie der DWD-Station Jena/Sternwarte in die Untersuchungen einbezogen. Die Lage der temporären und stationären Wetterstationen, an denen über fünf Monate im Sommerhalbjahr 2011 u. a. die Parameter Windrichtung in Grad, Windgeschwindigkeit in m/s, Lufttemperatur in °C und relative Luftfeuchte in % gemessen wurden, ist Abbildung 4 zu entnehmen. Außerdem ist in Abbildung 4 der Verlauf der Profilmessstrecken dargestellt.

Am 16. März 2011 wurden gemeinsam mit Vertretern der Stadt Jena und der lokalen Forschungsassistenz die vorab (nach Kartenlage) ausgewählten Standorte für die einzurichtenden, temporär zu betreibenden Wetterstationen geprüft und festgelegt. Ebenso wurden die zuvor ausgesuchten Streckenverläufe für die Profilmessfahrten geprüft und festgelegt. Außerdem wurden die o. g. vorhandenen Wetterstationen besichtigt und der Bezug von Klimadaten der Stationen der TLUG und des MPI-BGC erörtert.

Die Einrichtung des temporären Sondermessnetzes erfolgte in der Zeit vom 28. bis 29. April 2011 durch die Mobile Messeinheit (MME) Potsdam des DWD, der Abbau am 04. Oktober 2011. Über den gesamten Messzeitraum wurden die eingesetzten Messgeräte durch die MME Potsdam betreut, d. h. in regelmäßigen Abständen zu Kontroll- und Wartungs-zwecken sowie zur Datensicherung aufgesucht.

Die Messwerte der erhobenen meteorologischen Größen wurden zunächst als 10-Minuten-Mittel auf Datenloggern in UTC (Universal Time Coordinated) aufgezeichnet und zur weiteren statistischen Bearbeitung zeitlich verdichtet. Einbezogene Fremddaten wurden entsprechend angepasst.

3.2 Verwendete Wetterstationen

Tabelle 2 sind ausgewählte Merkmale zu den verwendeten Wetterstationen zu entnehmen.

Tabelle 2: Merkmale der verwendeten Wetterstationen

Station	Typ	Gauß-Krüger-Koordinaten	Lage	Stationsgelände und Stationsumgebung
Jena/ Sternwarte	Innenstadtstation (DWD/FSU)	Hochwert: 56 43 803 Rechtswert: 44 70 476	Westlich der Saale, am Rand des historischen Stadtzentrums, auf einer Rasenfläche, in ca. 155 m NN	Ebenes Stationsgelände, Rasenfläche, von kleineren Büschen, Bäumen und Gebäuden umgeben
Erfurt- Weimar	Stadtrandstation (DWD)	Hochwert: 56 50 325 Rechtswert: 44 27 200	Im Westen des Stadtgebietes von Erfurt, auf einem Rücken Hügel, in ca. 316 m NN	300 m nördlich vom Flughafenrollfeld, im Westen und Norden dominieren Landwirtschaftsflächen, Terrain fällt nach Osten zur Gera-Niederung ab
Beutenberg	Stadtrandstation (MPI-BGC)	Hochwert: 56 41 660 Rechtswert: 44 69 550	Auf einem Dach am westlichen Stadtrand Jenas, Beutenberg-Campusgelände, an einem Südosthang, in ca. 210 m NN	Umgebung im südlichen bis östlichen Halbraum städtisch geprägt, nördlicher bis westlicher Halbraum Grünland und bewaldete Hang-/Hochlagen
Saaleaue	Umlandstation (MPI-BGC)	Hochwert: 56 46 150 Rechtswert: 44 73 630	Auf Auenfläche, ca. 3,5 km nördlich der Jenaer Stadtbebauung, in ca. 140 m NN	Ebenes Stationsgelände, ca. 200 m östlich fließt Saale, im Nordwesten kleine Gewerbefläche, ansonsten Agrarflächen
TLUG- Station	Stadtstation (TLUG)	Hochwert: 56 38 800 Rechtswert: 44 71 722	Dachstation, im Süden Jenas, Göschwitz, Gewerbe-/Industriegebiet in ca. 180 m NN	Ca. 200 m fließt Saale im Osten vorbei, etwa 180 m westlich führen Bahnschienen vorbei, Gewerbe-/Industriegebäude
Gembden- tal	Temporär eingerichtete Stadtrand-/Umlandstation (DWD)	Hochwert: 56 44 247 Rechtswert: 44 74 603	Bodenstation im Gembdental in ca. 185 m NN	Terrain nach Süden zum Gembdenbach leicht abschüssig, frei von Bebauung, Rasen, B 7 im Norden, im Norden und Süden Baumreihen
Griesberg	Temporär eingerichtete Umlandstation (DWD)	Hochwert: 56 38 600 Rechtswert: 44 68 294	Bodenstation auf Griesberg in ca. 394 m NN	Ackerflächen, unbefestigte Wege, ca. 200 m südlich lockere Bebauung (Oßmaritz) 300 m nördlich und westlich folgt Wald

Station	Typ	Gauß-Krüger-Koordinaten	Lage	Stationsgelände und Stationsumgebung
Stadion	Temporär eingerichtete Stadtstation inkl. SODAR (DWD)	Hochwert: 56 41 934 Rechtswert: 44 70 812	Bodenstation, im Saaletal, Sportgelände, südlich vom Ernst-Abbe-Stadion, in ca. 155 m NN	Rasen (ebene Auenfläche), ca. 500 m westlich verläuft Saale, ca. 140 m östlich verläuft B 88, im Osten Baumreihen, Sportanlagen ringsum
Maua	Umlandstation – nur Messung von Schwachwind (DWD)	Hochwert: 56 37 301 Rechtswert: 44 72 162	Im Süden von Jena auf Ackerfläche	ebene Auenfläche, ca. 100 m westlich Bahntrasse, ca. 700 m nördlich Autobahnbrücke BAB 4, ca. 150 m östlich Saale, Kleingärten südlich ansonsten Acker und Grünland
Ammerbachtal	Umlandstation – nur Messung von Schwachwind (DWD)	Hochwert: 56 40 160 Rechtswert: 44 68 500	Im Südwesten Jenas im Ammerbachtal in ca. 221 m NN	Grünfläche ca. 50 m östlich vom Ammerbach an Nordwesthang, Umgebung ist frei, Wald in oberen Hangbereichen, einige 100 m nördlich einzelne Wohnhäuser
Kunitz	Umlandstation – Messung von Schwachwind inkl. Einsatz von Rauchpatronen (DWD)	Hochwert: 56 47 420 Rechtswert: 44 74 227 und Hochwert: 56 47 304 Rechtswert: 44 74 158	Im Norden Jenas auf Ackerfläche in ca. 137 m NN	Nördlich folgt Baumreihe, Terrain ist eben, steigt nach Osten zum Großen Gleisberg

3.3 Profilmessfahrten, Schwachwindmessungen und Rauchpatronenexperiment

In der Zeit vom 06. bis 07.05.2011 wurden bei autochthoner Witterung Profilmessfahrten durchgeführt. Einen Überblick dazu gibt Tabelle 3. Vom 22. bis 23.08.2011 wurden weitere Profilmessfahrten realisiert. Da die Bedingungen im August vergleichsweise weniger ideal waren, liegt der Fokus nachfolgend exemplarisch auf den Messungen des



Abbildung 5: Meteorologische Messtechnik an der Fahrzeugfront

Monats Mai. An der Fahrzeugfront des Messfahrzeugs waren an Geräteträgern meteorologische Messwertgeber in 2 und 0,7 m über Grund zur Erfassung der Trocken- und Feuchttemperatur installiert (Abbildung 5). Die Messwerte wurden kontinuierlich während der Fahrten erfasst und aufbereitet. Über einen Wegstreckenzähler war die nachträgliche räumliche Zuordnung der gemessenen Daten gewährleistet. Ein Luftdruckgeber diente als Höhenmesser und lieferte das Geländeprofil.

Unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit des Geländes wurden die Messstrecken so gewählt, dass typische Strukturen des Jenaer Stadtgebietes (z. B. verdichtete Innenstadt, aufgelockerte Randbereiche, Auenflächen) mit ihren jeweiligen lokalklimatischen Besonderheiten erfasst werden konnten (KUTTLER und DÜTEMEYER 2003). Aus arbeitstechnischen Gründen wurden die Messungen entlang einer Nord- (rund 19 km) und einer Südstrecke (rund 25 km) durchgeführt.

Tabelle 3: Übersicht zu den Profilmessfahrten im Mai 2011

Relative Luftfeuchte [%]	Lufttemperatur [°C]	Windrichtung [Grad]	Windgeschwindigkeit [m/s]	Bewölkung in Achtel und lateinische Bezeichnung (kurz)	Dauer der Fahrt	Tag der Fahrt	Art der Fahrt	Strecke
50	9,5	80	4,1	4/8 Ci fib	19:28 – 20:21	05.	Abend	Süd
84	4,3	330	4,3	3/8 Ci fib	20:38 – 21:25	05.	Abend	Nord
57	7,1	176	3,8	1/8 Ci fib	01:57 – 02:40	06.	Früh	Süd
92	-0,5	92	0,2	1/8 Ci fib	02:42 – 03:19	06.	Früh	Nord
29	18,2	139	2,3	6/8 Ci fib	12:10 – 13:05	06.	Mittag	Süd
23	21,1	110	1,6	6/8 Ci fib	13:22 – 14:15	06.	Mittag	Nord
32	16,2	149	2,3	7/8 Ci fib	18:57 – 19:50	06.	Abend	Süd
62	11,0	85	0,5	7/8 Ci fib	19:53 – 20:39	06.	Abend	Nord
44	11,3	149	2,8	2/8 Ci fib	01:31 – 02:19	07.	Früh	Süd
96	2,2	89	0,4	3/8 Ci fib	02:22 – 03:04	07.	Früh	Nord

Die Südfahrt begann an der temporären Wetterstation Griesberg und endete in Wogau auf dem Parkplatz im Westen des Ortes (Abbildung 4). An diesem Punkt startete die Nordstrecke, die sich bis nach Cospeda erstreckt (Abbildung 4). Für die Profilmessfahrten wurden Fixpunkte von A bis Q bzw. X festgelegt. Diese speziellen Signaturen erlauben nachträglich eine räumliche Zuordnung der gemessenen Werte. Bei einer mittleren Geschwindigkeit von etwa 30 km/h betrug die Fahrzeit in Abhängigkeit von der Verkehrslage für die Südstrecke 43 bis 55 Minuten, für die Nordstrecke 37 bis 53 Minuten.

Zusätzlich wurden zur Erfassung von Kaltluftflüssen über die Dauer der Profilmessfahrten an ausgewählten Standorten Schwachwindmessgeräte im Stadtgebiet positioniert und Rauchpatronen, die eine räumliche Visualisierung von Kaltluftflüssen erlauben, eingesetzt.

4 Datengrundlage

Zur Erstellung des vorliegenden Berichtes wurden vorrangig folgende Unterlagen verwendet:

- Amtliche Topografische Karten des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation 2008 (Thüringen, CD-ROM)
- Messdaten von mobilen Messstationen des DWD:
 - Ammerbachtal (Schwachwindmessungen, temporär)
 - Gembdental (mobile Klimamessstation, temporär)
 - Griesberg (mobile Klimamessstation, temporär)
 - Kunitz (Schwachwindmessungen, incl. Rauchpatroneneinsatz, temporär)
 - Maua (Schwachwindmessungen, temporär)
 - Stadion (mobile Klimamessstation, incl. SODAR, temporär)
- Messdaten von Profilmessfahrten des DWD
- Mess- und Beobachtungsdaten von Wetterstationen des DWD:
 - Jena/Sternwarte
 - Erfurt-Weimar (benannt nach Flughafen, ehemals Erfurt-Bindersleben)
 - Gera-Leumnitz
 - Artern
 - Weimar
- Mess- und Beobachtungsdaten von Wetterstationen des Max-Planck-Institutes für Biogeochemie (MPI-BGC):
 - Beutenberg
 - Saaleaue
- Mess- und Beobachtungsdaten der Wetterstation Jena Schillergässchen der Friedrich-Schiller-Universität (FSU)

- Mess- und Beobachtungsdaten der Wetterstation auf dem Dach der TLUG (TLUG)
- Geländehöhendatensätze für das Stadtgebiet des Auftraggebers
- Landnutzungsdatensätze für das Stadtgebiet des Auftraggebers und außerhalb davon
- CORINE-Landnutzungsdaten außerhalb des Stadtgebietes des Auftraggebers
- Fotos, Kartenmaterial, Planunterlagen, Informationen des Auftraggebers
- Erkenntnisse aus Orts-/Geländebesichtigungsterminen
- Einschlägige Literatur

5 Untersuchungsergebnisse

5.1 Allgemeine Bemerkungen

Unter dem Klima eines Ortes oder Gebietes wird die Gesamtheit der Wettererscheinungen, d. h. aller meteorologischen Zustände und Vorgänge in der Atmosphäre, während eines längeren Zeitraumes verstanden. Letzterer muss hinreichend lang sein, um die charakteristischen meteorologischen Bedingungen in ihrer Gesamtheit zu erfassen und typische statistische Kennwerte (z. B. Mittelwerte, Häufigkeitsverteilungen) festzulegen (HELBIG und SCHIRMER 1999, HUPFER und KUTTLER 2006, KUTTLER 2009).

Das Klima eines Ortes wird durch die Klimaelemente sowie die natürlichen und anthropogenen Klimafaktoren determiniert.

Für die Charakterisierung der allgemeinen klimatischen Verhältnisse Jenas dienen vorrangig Daten langjähriger Messungen und Beobachtungen der Station Jena/Sternwarte. Stellenweise wird zum Vergleich zusätzlich auf Daten der DWD-Station Erfurt-Weimar zurückgegriffen, da für die Station Jena/Sternwarte nicht alle notwendigen Parameter (z. B. Windrichtung und -geschwindigkeit, Bewölkung) lückenlos für die letzten drei Dekaden vorliegen.

Selbst wenn statistische Mittelwerte einer Messstation recht gut auf einen anderen Ort übertragbar sind, können sich – je nach Wetterlage – im zeitlichen Verlauf durchaus Abweichungen ergeben. Grundsätzlich ist deshalb zu beachten, dass sämtliche Messungen – streng genommen – nur für den Messort selbst ohne Einschränkungen repräsentativ sind. Dies gilt besonders in orographisch gegliedertem Gelände.

Für die Beschreibung der klimatischen Verhältnisse ist es international üblich, die Daten eines 30-jährigen Messzeitraums zugrunde zu legen. Im vorliegenden Bericht wird – soweit möglich – vorrangig auf den Zeitraum 1980/2010 (ohne 1997; Mittelwertperiode) zurückgegriffen, abweichend wird in Abhängigkeit der Datenverfügbarkeit auch ein verkürzter Zeitraum zugrunde gelegt (z. B. 2001/2010). Um mögliche Extrema aufzuzeigen, werden stellenweise auch Werte der Jahre 1997 und 2011 angegeben, sofern zum Zeitpunkt der Datenabfrage entsprechend geprüfte Daten vorlagen. Zudem ist auf rundungsbedingte Abweichungen hinzuweisen, die sich beispielsweise bei Betrachtung von Jahreswerten ergeben können.

In den nachfolgenden tabellarischen Darstellungen bedeuten „Punkte“, dass keine Werte für den betreffenden Parameter vorliegen bzw. ein Ereignis nicht vorkam.

5.2 Klimaanalyse

Gemäß der Einteilung der Klimate der Erde nach W. KÖPPEN und R. GEIGER ist Jena großraumklimatisch dem warmgemäßigten, ständig feuchten Mittelbreitenklima zuzuordnen (KOTTEK et al. 2006). Regionalklimatisch fällt Jena in das Klimagebiet Mitteldeutsches Berg- und Hügellandklima, nimmt aber hier wegen seiner geschützten Lage im Saaletal (und dadurch bedingter sehr milder und durchschnittlich feuchter Bedingungen) eine Sonderstellung ein (BÖER und SCHMIDT 1970).

Großraumklimatisch ist Jena dem warmgemäßigten Mittelbreitenklima, regionalklimatisch dem Mitteldeutschen Berg- und Hügellandklima zuzuordnen. Auf Grund der Zugehörigkeit zum Saaletal fällt Jena jedoch eine Sonderstellung zu, die sich in recht milden, durchschnittlich feuchten klimatischen Verhältnissen ausdrückt: So beträgt das mittlere Jahresmittel der Lufttemperatur der Wetterstation Jena/Sternwarte (155 m NN) im Zeitraum 1983/2012 rund 10 °C (DWD-Wetterwarte Artern ca. 55 km nordnordwestlich, 164 m NN, 1983/2012: rund 9 °C), die mittlere Jahressumme der Niederschlagshöhe liegt im selben Bezugszeitraum bei rund 604 mm (Artern rund 489 mm).

Großräumig herrschen in Thüringen im Mittel die westlichen bis südwestlichen Windrichtungen vor. Auf Grund der Beeinflussung durch das Saaletal und seiner Seitentäler, die das großräumige Windfeld durch Ablenkungs- und Kanalisierungseffekte sowie thermische Windsysteme modifizieren, treten innerhalb Jenas – in Abhängigkeit vom jeweiligen Standort – davon abweichende Hauptwindrichtungen auf.

Im Mittel ist in Jena in Bodennähe mit Windgeschwindigkeiten zwischen 1,5 bis etwa 3 m/s zu rechnen. Die höheren Werte werden sich je nach Standort für Bereiche in freier Plateau-, Hang- und Kuppenlage ergeben, während die geringeren Werte u. a. in den dicht bebauten Tallagen auftreten.

5.2.1 Lufttemperatur

Die Temperatur der bodennahen atmosphärischen Schicht hängt nicht nur von den großräumig vorherrschenden Wetterbedingungen ab; sie wird auch von der lokalen Beschaffenheit des Untergrundes und der Art und Intensität der Flächennutzung beeinflusst. Unterschiedliche Temperaturen bei geringer horizontaler Distanz und gleichem Höhenniveau sind Ausdruck unterschiedlicher Energiebilanzen über den jeweiligen Flächen. Die Lufttemperatur wird in 2 m Höhe über Grund, vor direkter Sonnenstrahlung geschützt, gemessen.

Für die Wetterstation Jena/Sternwarte sind in Abbildung 6, Tabelle 4 und Tabelle 5 einige Parameter dargestellt (1980/2010 (ohne 1997)).

In Jena beträgt das mittlere Jahresmittel der Lufttemperatur im Bezugszeitraum 1980/2010 (ohne 1997) rund 9,9 °C (Jena/ Sternwarte, ca. 155 m NN). Im Vergleich dazu liegen die Werte der Stationen Gera (ca. 311 m NN) und Erfurt (ca. 316 m NN) im selben Zeitraum bei 8,6 und 8,5 °C.

Die mittleren Monatsmittel (entspricht dem mittleren Tagesmittel im jeweiligen Monat) fluktuieren im positiven Bereich zwischen 1,3 °C im Januar, dem durchschnittlich

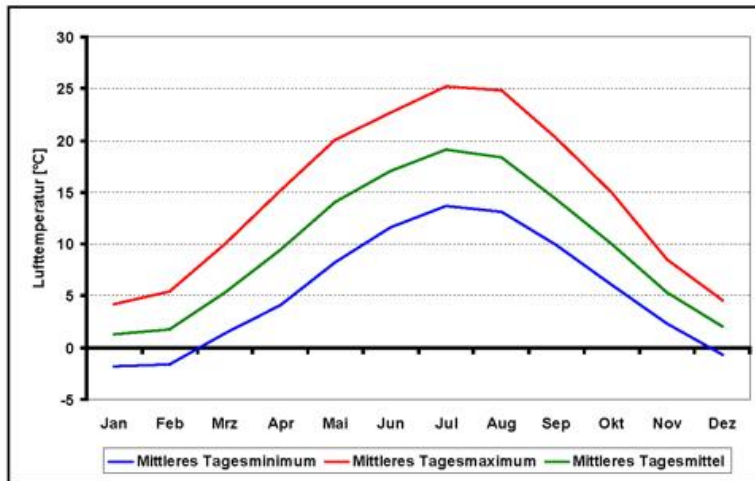


Abbildung 6: Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur, Jena/Sternwarte 1980/2010 (ohne 1997)

kältesten Monat, und 19,2 °C im Juli, dem im Durchschnitt wärmsten Monat (Tabelle 4). Es ergibt sich ein typischer Jahresverlauf der mittleren Lufttemperatur, gekennzeichnet durch ein Maximum in den Sommermonaten und ein Minimum in den Wintermonaten. Die Auswertungen ergaben, dass die absolut höchsten Tagesmaxima der Lufttemperatur im Bezugszeitraum die

30-°C-Grenze in den Monaten Mai bis September übersteigen können (z. B. 27. Mai 1982, 17. September 1982, 17. und 18. Mai 1997, 01. September 1997, 28. und 30. Mai 1999, 13. und 14. September 1999, 05. Mai 2003, 20. September 2003). Das absolute Maximum der Lufttemperatur von 37,9 °C wurde am 09.08.1992 gemessen, das absolute Minimum von -23,5 °C am 14.01.1987.

Das absolut höchste Monatsmittel der Lufttemperatur ist für den Juli 2006 (23,2 °C) ermittelt worden, das absolut tiefste für den Februar 1986 (-6,5 °C). Das Monatsmittel kann im Juli aber auch Werte um 17 °C (16,8 °C im Juli 2000) annehmen und im Februar Werte nahe 8 °C (z. B. 7,4 °C im Jahr 1990).

Die Schwankungsbreite der Monatsmitteltemperaturen ist i. d. R. in den Wintermonaten größer als in den Sommermonaten. Die Differenz zwischen dem höchsten und tiefsten Monatsmittel im Februar beträgt rund 14 K. Bezogen auf den Juli ergibt sich eine vergleichsweise geringe Differenz von rund 6 K.

Die Anzahl der Tage, an denen bestimmte Schwellenwerte der Lufttemperatur über- bzw. unterschritten werden, kann in den einzelnen Jahren sehr unterschiedlich sein und dabei auch innerhalb einzelner Monate stark schwanken. Im langjährigen Mittel ist in Jena mit rund 53 Sommertagen (Maximum der Lufttemperatur ≥ 25 °C) pro Jahr zu rechnen, die meist auf die Monate Juli und August entfallen. Die größte Anzahl an Sommertagen (78) erreichte im o. g. Zeitraum das Jahr 2003, die wenigsten Sommertage (27) traten im Jahr 1984 auf (Tabelle 5).

Heiße Tage (Maximum der Lufttemperatur ≥ 30 °C) treten dagegen wesentlich seltener auf und kommen längst nicht jedes Jahr vor. Im langjährigen Mittel sind in Jena ca. 13 heiße Tage pro Jahr zu erwarten. Die meisten heißen Tage entfallen im betrachteten Zeitraum auf das Jahr 2003 (32), die wenigsten auf die Jahre 1980 und 1993 (je 3).

Aus Tabelle 4 geht hervor, dass Frosttage (Minimum der Lufttemperatur < 0 °C) im Bezugszeitraum in Jena hauptsächlich von Oktober bis April vorkommen. Vereinzelt können Frosttage in freien Lagen noch im Mai auftreten. In Bodennähe kann es in freien Lagen u. U. bereits im September zu Bodenfrost kommen. Die mittlere Anzahl der Frosttage liegt bei rund 73 Tagen pro Jahr. In extremen Jahren können durchaus fast alle Tage der Monate Dezember bis März Frosttage sein. Das Extreme, die größte Anzahl an Frosttagen, liegt für den Raum Jena im Zeitraum 1980/2010 (ohne 1997) bei 103 Tagen im Jahr 2010. Die wenigsten Frosttage wurden im Jahr 2000 verzeichnet (41).

Tabelle 4: Angaben zur Lufttemperatur, Jena/Sternwarte 1980/2010 (ohne 1997)

Parameter / Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Jahr
Mittleres Tagesmittel [°C]	1,3	1,8	5,3	9,4	14,1	17,0	19,2	18,4	14,4	10,0	5,3	2,0	9,9
Mittleres Tagesmaximum [°C]	4,2	5,5	10,0	15,2	20,1	22,7	25,2	24,8	20,3	14,9	8,5	4,6	14,7
Mittleres Tagesminimum [°C]	-1,8	-1,6	1,3	4,1	8,3	11,6	13,6	13,1	9,9	6,1	2,3	-0,7	5,5
Mittleres Monats- und Jahresmaximum [°C]	11,5	13,6	18,5	24,1	28,1	30,8	32,7	32,3	27,2	22,7	15,4	12,4	35,2
Mittleres Monats- und Jahresminimum [°C]	-11,7	-10,2	-5,4	-1,8	2,2	6,0	8,8	7,4	4,5	-0,8	-4,5	-10,1	-14,4
Höchstes Monats- und Jahresmaximum [°C]	16,7	20,7	25,4	28,9	34,8	35,4	37,7	37,9	32,9	29,0	19,5	16,2	37,9
Tiefstes Monats- und Jahresminimum [°C]	-23,5	-20,9	-20,7	-7,4	-0,2	3,0	6,6	4,1	0,8	-5,7	-11,6	-20,9	-23,5
Ereignistagart / Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Jahr
Mittlere Anzahl der Sommertage (Tagesmaximum $\geq 25,0$ °C)	.	.	.	1	5	10	16	15	5	1	.	.	53
Mittlere Anzahl der heißen Tage (Tagesmaximum $\geq 30,0$ °C)	.	.	.	.	1	2	6	4	0	.	.	.	13
Mittlere Anzahl der Frosttage (Tagesminimum $< 0,0$ °C)	17	16	11	3	0	.	.	.	.	2	8	16	73
Mittlere Anzahl der Eistage (Tagesmaximum $< 0,0$ °C)	6	4	1	.	.	.	.	.	.	.	1	5	17

Die jährliche Anzahl der Eistage (Maximum der Lufttemperatur $< 0\text{ °C}$) variiert zwischen 2 Tagen im Jahr 1988 und 53 Tagen im Jahr 2010 – bei einer mittleren jährlichen Anzahl von rund 17 Tagen.

Im Mittel sind die niedrigeren jährlichen Mittelwerte gewiss in den höheren Lagen (z. B. Jenzig, Kernberge, Lichtenhainer Höhe) anzutreffen, die höheren im stark bebauten Stadtgebiet. Für kurze Zeiträume können sich aber auch andere Verhältnisse ergeben. Während windschwacher Strahlungswetterlagen werden sich besonders in geschützten Lagen und an Südhängen vor allem im Sommer etwas höhere Tagesmaxima einstellen (z. B. Wenigenjena, Lobeda, Kunitz). Nachts und bei anhaltenden Inversionswetterlagen ist es in den Tälern oft kälter als auf den Höhen und im Stadtgebiet (Zentrumslagen und andere stark bebaute Bereiche). Außerdem ist die Gefahr von Früh- und Spätfrösten auf offenen Flächen und Lichtungen größer als im Waldesinnern und stark bebauten Gebieten.

Tabelle 5: Angaben zu Ereignistagen, Jena/Sternwarte 1980/2010 (ohne 1997)

Ereignis	Häufigkeit des Auftretens (absolut)
Größte Anzahl der Sommertage (Tagesmaximum $\geq 25,0\text{ °C}$)	78 (im Jahr 2003)
Kleinste Anzahl der Sommertage (Tagesmaximum $\geq 25,0\text{ °C}$)	27 (im Jahr 1984)
Größte Anzahl der heißen Tage (Tagesmaximum $\geq 30,0\text{ °C}$)	32 (im Jahr 2003)
Kleinste Anzahl der heißen Tage (Tagesmaximum $\geq 30,0\text{ °C}$)	3 (in den Jahren 1980 und 1993)
Größte Anzahl der Frosttage (Tagesminimum $< 0,0\text{ °C}$)	103 (im Jahr 2010)
Kleinste Anzahl der Frosttage (Tagesminimum $< 0,0\text{ °C}$)	41 (im Jahr 2000)
Größte Anzahl der Eistage (Tagesmaximum $< 0,0\text{ °C}$)	53 (im Jahr 2010)
Kleinste Anzahl der Eistage (Tagesmaximum $< 0,0\text{ °C}$)	2 (im Jahr 1988)

5.2.2 Niederschlag und Schneebedeckung

Die mit einem Regenschirm oder Regenschreiber gemessene Niederschlagsmenge wird als Niederschlagshöhe in mm angegeben. Eine Niederschlagshöhe von 1 mm entspricht dabei einer Wassermenge von 1 Liter auf 1 Quadratmeter.

In Jena ist das sommerliche Maximum gut ausgeprägt (Abbildung 7). In den Monaten Mai bis August fällt im jährlichen Mittel der meiste Niederschlag, dabei fällt das Maximum des Niederschlags mit rund 73 mm in den Juli (1980/2010 (ohne 1997)). Das sekundäre Maximum im November ist mit rund 54 mm gut ausgeprägt. Der geringste

Niederschlag ist im Mittel mit rund 35 und 34 mm in den Monaten Januar und Februar zu erwarten. Insgesamt ergibt sich für den Bezugszeitraum eine mittlere Jahressumme der Niederschlagshöhe von rund 610 mm.

In trockenen bzw. nassen Monaten oder Jahren sind erhebliche Abweichungen von den Mittelwerten möglich. So können Monatssummen über 150 mm (z. B. April 1980, 161,5 mm), in Extremfällen gar über 200 mm (z. B. Juli 1997, 202,2 mm), aber auch solche von weniger als 10 mm auftreten (z. B. Januar 1996, 1,9 mm und April 2007, 4,4 mm). Im Extremfall kann ein Monat unter Umständen auch nahezu gänzlich niederschlagsfrei bleiben (z. B. November 2011, 0,1 mm).

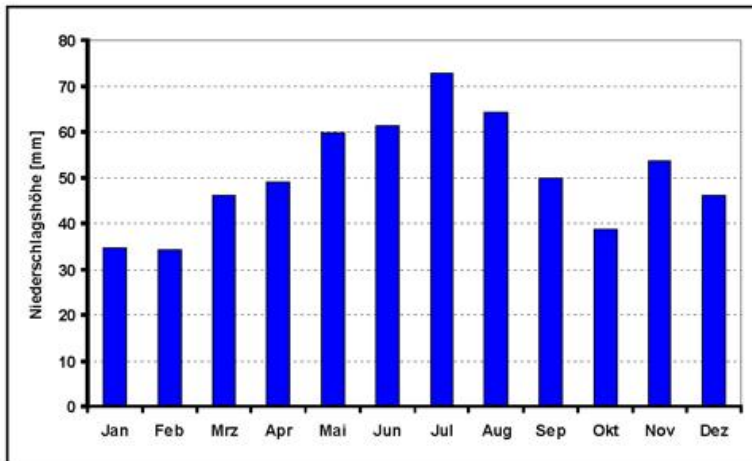


Abbildung 7: Mittlere Monatssummen der Niederschlagshöhe, Jena/Sternwarte 1980/2010 (ohne 1997)

Im Bezugszeitraum wurde im Jahr 1981 mit rund 833 mm die größte Jahressumme erfasst und mit rund 389 mm im darauf folgenden Jahr die geringste (Tabelle 6).

In Jena sind in den einzelnen Monaten ca. zwischen 12 und 18 Tage mit messbarem Niederschlag ($\geq 0,1$ mm) zu erwarten, wobei das Maximum in den

Dezember fällt. Im Jahr sind es im Gebiet rund 180 Tage. Kleiner sind die jeweiligen Werte für den eher relevanten Schwellenwert ≥ 1 mm, wobei hier die Spanne bei relativ geringer Differenzierung von ca. 8 Tagen im September und Oktober bis 11 Tage im Juni reicht.

Bei weiterer Erhöhung des Schwellenwertes verschiebt sich das Maximum in den Sommer. Die entsprechenden Werte für den Schwellenwert ≥ 10 mm schwanken zwischen 2 Tagen von Mai bis August und rund 1 Tag in den übrigen Monaten.

Die Werte in Tabelle 7 geben einen Überblick über die Schneeverhältnisse im Untersuchungsgebiet.

Schneehöhen sind von verschiedenen Faktoren abhängig: von der Höhe über NN, den topografischen Bedingungen und der Sonneneexposition sowie nicht zuletzt vom Niederschlagsangebot. Maßgeblich für die Bildung einer Schneedecke und deren Erhalt über einen längeren Zeitraum sind jedoch die von den Wetterlagen abhängigen Temperaturverhältnisse. In den einzelnen Wintern treten in Abhängigkeit von der Andauer der verschiedenen Großwetterlagen erhebliche Unterschiede in den Schneeverhältnissen auf. Außerdem können die Schneedeckenverhältnisse in der Umgebung von Jena in Abhängigkeit von der Höhenlage und Exposition erheblich variieren.

Die mittlere Anzahl der Tage mit einer Schneedecke von mindestens 1 cm Höhe liegt bei rund 35. Typischerweise nimmt die Anzahl der Tage mit Schneebedeckung mit zunehmender Höhenlage zu. Die meisten Tage mit einer Schneedecke treten naturgemäß in den Monaten Dezember bis März auf. Dies bestätigt sich auch für Jena. Im März liegt gelegentlich – besonders in schattigen Lagen – noch Altschnee. Auch kann sich nochmals

Tabelle 6: Angaben zum Niederschlag, Jena/Sternwarte 1980/2010 (ohne 1997)

Parameter / Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Jahr
Mittlere Monats- und Jahressumme/n der Niederschlagshöhe [mm]	35	34	46	49	60	61	73	64	50	39	54	46	610
Größte Monats- und Jahressumme/n der Niederschlagshöhe [mm]	64	86	92	162	107	118	127	154	145	89	125	96	833
Kleinste Monats- und Jahressumme/n der Niederschlagshöhe [mm]	2	4	16	4	15	10	18	13	8	7	8	13	389
Größte Tagessummen [mm]	19	27	23	58	37	42	66	41	59	41	30	24	66
Mittlere Anzahl der Tage mit mindestens 0,1 mm Niederschlag	17	15	16	14	14	15	14	13	12	14	16	18	180
Mittlere Anzahl der Tage mit mindestens 1,0 mm Niederschlag	9	9	10	9	10	11	10	9	8	8	10	10	113
Mittlere Anzahl der Tage mit mindestens 10,0 mm Niederschlag	0	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	15

Tabelle 7: Angaben zur Schneedecke und zur Schneehöhe, Jena/Sternwarte 1980/2010 (ohne 1997)

Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Jahr
Mittlere Anzahl der Tage mit einer Schneedecke ≥ 1 cm	11	9	4	1	.	.	.	.	.	.	3	7	35
Größte Schneehöhe [cm]	27	20	25	12	.	.	.	.	.	.	13	40	40

eine eher dünne Neuschneedecke bilden. Naturgemäß tritt die Ausbildung einer Schneedecke den Wintermonaten im Vergleich zum Frühjahr etwas häufiger auf. Das jährliche Maximum der Schneehöhe fällt meist in die Monate Januar bis März. Die größte Schneehöhe (40 cm) wurde allerdings am 27.12.2010 gemessen (Tabelle 7).

5.2.3 Relative Luftfeuchte und Nebel

Neben Lufttemperatur und Niederschlag stellt die relative Luftfeuchte eine wichtige Klimagröße dar. Als Luftfeuchte wird das Wasser, das in gasförmiger Phase (Wasserdampf) in der Luft der Erdatmosphäre enthalten ist, bezeichnet. Der Wasserdampf wird über die Verdunstung, d. h. die Evapotranspiration und die Transpiration feuchter Oberflächen (insbesondere Gewässer und Vegetationsflächen) der Atmosphäre zugeführt. Industrie, Hausbrand und Verkehr zählen zu anthropogenen Wasserdampfproduzenten.

Der Tagesgang der relativen Luftfeuchte verläuft im Wesentlichen spiegelbildlich zur Lufttemperatur. Deshalb ist es auch in der bodennahen Luftschicht am frühen Nachmittag relativ trocken, zur Zeit des Sonnenaufgangs hingegen relativ feucht. Ebenso zeigt der mittlere Jahresgang der relativen Luftfeuchte einen zum Jahresgang der Lufttemperatur inversen Verlauf. Die durchschnittlichen Monatswerte sind im Sommerhalbjahr am kleinsten (Tabelle 8), die tageszeitlichen Veränderungen jedoch wesentlich größer als im Winter.

Tabelle 8: Angaben zur relativen Luftfeuchte und zum Nebel, Jena/Sternwarte 1980/2010 (ohne 1997)

Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Jahr
Mittlere/s Monats- und Jahresmittel der relativen Luftfeuchte [%]	77	75	71	67	67	68	67	69	75	78	80	80	73
Mittlere Anzahl der Tage mit Nebel	6	8	7	6	4	3	2	5	8	10	7	6	72

Das Maximum der relativen Luftfeuchte liegt in den Wintermonaten und das Minimum im Sommer. Der Grund hierfür liegt in der o. g. temperaturabhängigen Wasserdampfaufnahme der Luft, nach der bei gleichbleibendem Wasserdampfgehalt die relative Luftfeuchte mit zunehmender Temperatur abnimmt.

Als langjähriger Mittelwert ergibt sich für Jena eine relative Luftfeuchte von rund 73 %, wobei die vieljährigen Monatsmittelwerte zwischen 67 und 68 % von April bis Juli und 80 % im November und Dezember schwanken.

Die Nebelbildung erfolgt durch Kondensation des Wasserdampfes an Kondensationskernen (Aerosole) natürlicher oder anthropogener Herkunft. Sie wird im Wesentlichen durch drei physikalische Prozesse verursacht, die im Einzelfall auch zusammenwirken können:

- Abkühlung feuchter Luft bis zum Sättigungspunkt (Taupunkt oder Reifpunkt),
- Zunahme des Wasserdampfgehaltes der Luft durch Verdunstung, bis Sättigung eintritt,
- Mischung von feuchtwarmer und kalter Luft.

Nach internationaler Vereinbarung wird von Nebel gesprochen (unabhängig von dessen Andauer), wenn die Sichtweite in 1,80 m Höhe über der Erdoberfläche weniger als 1000 m beträgt.

In der Tabelle 8 ist die mittlere Anzahl der Tage mit Nebel für Jena angegeben. Danach treten im vieljährigen Mittel rund 72 Tage mit Nebel auf – unabhängig von dessen Andauer und Intensität an diesen Tagen. Die meisten Tage mit Nebel treten allgemein von September bis März auf. Im Sommer sind Nebelereignisse weniger häufig und allgemein von deutlich geringerer Dauer als in den Wintermonaten. Im Jahresgang sind in Jena die Monate Mai bis August die nebelärmsten, die Herbstmonate hingegen die nebelreichsten – mit dem Maximum im Oktober.

Aufliegende Wolken können die das Jenaer Saaletal umgebenden Höhenlagen beeinflussen, während etwas tiefer liegende Ortsbereiche eher nicht betroffen sind.

5.2.4 Sonnenscheindauer und Bewölkung

Die Sonnenscheindauer ist die Zeit, in der die direkte Sonnenstrahlung auf die Erdoberfläche auftrifft. Entsprechend einer Vereinbarung der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) wird von Sonnenschein gesprochen, wenn die Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung mindestens 120 W/m^2 beträgt. Die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer ist von der Jahreszeit und der geographischen Breite eines Standortes abhängig. Die tatsächliche Sonnenscheindauer hängt hingegen von den topografischen Gegebenheiten, die Horizonteinschränkungen verursachen können, sowie von der Bewölkung und der Lufttrübung ab. Je größer der Anteil der mit Wolken bedeckten Himmelsfläche ist, desto kürzer ist auch die aktuelle Sonnenscheindauer.

Für die Station Jena/Sternwarte liegen für den Bezugszeitraum 1980/2010 (ohne 1997) nur sehr lückenhaft Daten zur Sonnenscheindauer vor. Tabelle 9 gibt daher nur einen knappen Überblick zur Sonnenscheindauer und zum Bedeckungsgrad.

Das Maximum der Sonnenscheindauer im mittleren Jahresgang lässt sich erwartungsgemäß für die Sommermonate ausmachen, das Minimum für den Winter (Abbildung 8). Gleiches gilt für die größten und kleinsten Monatssummen der Sonnenscheindauer (Tabelle 9).

In Jena ist mit durchschnittlich 31 heiteren Tagen und 154 trüben Tagen zu rechnen.

Tabelle 9: Angaben zur Sonnenscheindauer, Jena/Sternwarte 1981/2003 (ohne 1997), und zum Bedeckungsgrad, Jena/Sternwarte 1980/2010 (ohne 1997)

Parameter/Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Jahr
Mittlere Monats- und Jahressumme/n der Sonnenscheindauer [Stunden]	56	77	104	154	192	173	203	204	133	108	58	41	1.503
Größte Monats- und Jahressumme/n der Sonnenscheindauer [Stunden]	95	113	139	226	279	288	284	302	204	158	97	79	1.929
Kleinste Monats- und Jahressumme/n der Sonnenscheindauer [Stunden]	24	43	58	87	106	111	98	140	73	72	19	22	1.225
Mittlere Anzahl der heiteren Tage (mittlerer Bedeckungsgrad < 1,6 Achtel)	2	2	3	4	4	2	4	3	2	2	1	2	31
Mittlere Anzahl der trüben Tage (mittlerer Bedeckungsgrad > 6,4 Achtel)	16	15	15	11	11	11	10	9	11	13	16	18	154

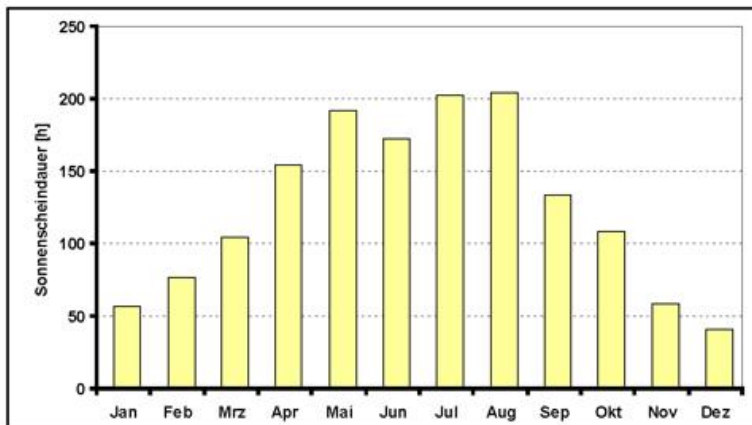


Abbildung 8: Mittlere Monatssummen der Sonnenscheindauer, Jena/Sternwarte 1981/2003 (ohne 1997)

5.2.5 Windverhältnisse

In der freien Atmosphäre werden Windrichtung und -geschwindigkeit durch das Druckfeld und die Erdrotation bestimmt. Die Gradientkraft, die senkrecht zu den Isobaren vom hohen zum tiefen Luftdruck gerichtet ist, und die auf die Erdrotation zurückzuführende Corioliskraft halten sich die Waage. Dadurch weht der aus diesem Kräftegleichgewicht resultierende geostrophische Wind parallel zu den Isobaren. Seine Geschwindigkeit ist umso größer, je mehr sich die Isobaren drängen, d. h. je stärker sich der Luftdruck in horizontaler Richtung ändert.

Im Einflussbereich des Erdbodens, der so genannten atmosphärischen Grenzschicht, wird eine Kraft wirksam, die in der freien Atmosphäre keinen Einfluss auf den Wind hat, nämlich die Reibung. Durch sie wird sowohl die Windgeschwindigkeit abgebremst als auch die Windrichtung gegen den Uhrzeigersinn aus der Richtung des geostrophischen Windes abgelenkt.

Die mittlere Verteilung des Windes wird durch die großräumige Luftdruckverteilung bestimmt. Hieraus ergibt sich für Mitteleuropa das Vorherrschen der westlichen bis südwestlichen Richtungskomponente. Der Wind kann durch die topografischen Gegebenheiten am konkreten Standort abgelenkt und kanalisiert, verstärkt oder abgeschwächt werden. Das Gesamtwindfeld wird auch dadurch modifiziert, dass sich besonders bei windschwachen und wolkenarmen Wetterlagen in Gebieten mit deutlichen Unterschieden in Relief, Bebauung und Bewuchs lokale Windsysteme herausbilden, die z. B. im Gebirge als Berg- und Talwindssystem oder an der Küste als Land- und Seewindsystem bekannt sind.

Sehr hohe Windgeschwindigkeiten führen zu einer Verstärkung der Abkühlungsreize. Geringe Windgeschwindigkeiten erhöhen hingegen (insbesondere bei sommerlichen Hochdrucklagen) die Wärmebelastung.

In Thüringen herrschen allgemein südwestliche bis westliche Winde vor. Ein sekundäres Maximum ist in den östlichen bis nordöstlichen Sektoren zu erwarten. Das Saaletal wird das großräumige Windfeld durch Kanalisierungseffekte besonders im Tal beeinflussen und modifizieren. So ist aufgrund des gegen die Hauptwindrichtung ausgerichteten Saaletals (annähernder Nord-Süd-Verlauf) eine stärkere südliche Komponente entlang des Flusses zu erwarten.

Die Übertragung von Windmessungen auf einen anderen Standort ist insbesondere in stärker gegliedertem Gelände problematisch. Aber auch in weniger orographisch strukturierten Gebieten wird das Windfeld durch Hindernisse (Gebäude, Bäume, Dämme usw.) beeinflusst und modifiziert. Schon auf kleinstem Raum wirken sich die lokalen Gegebenheiten erheblich differenzierend auf das lokale Windfeld aus.

Für die Auswirkungen des Windes sind besonders die Windverhältnisse im normalen Lebensraum vom Boden bis etwa 2 m Höhe über Grund entscheidend. Innerhalb dieses Höhenbereiches werden die Windverhältnisse sehr stark von der Geländegegestaltung und Hindernissen beeinflusst. Für einen Standort ermittelte Windverteilungen, insbesondere Windrichtungsverteilungen, können streng genommen nur als repräsentativ für die unmittelbare Umgebung des Messstandortes gelten. Windmessungen erfolgen allgemein an Wetterstationen in hindernisfreiem Gelände in einer Höhe von etwa 10 m über Grund, in bebautem bzw. bewachsenem Gelände, jedoch so hoch, dass die Windverhältnisse dort denen in etwa 10 m Höhe über Grund in freiem Gelände entsprechen.

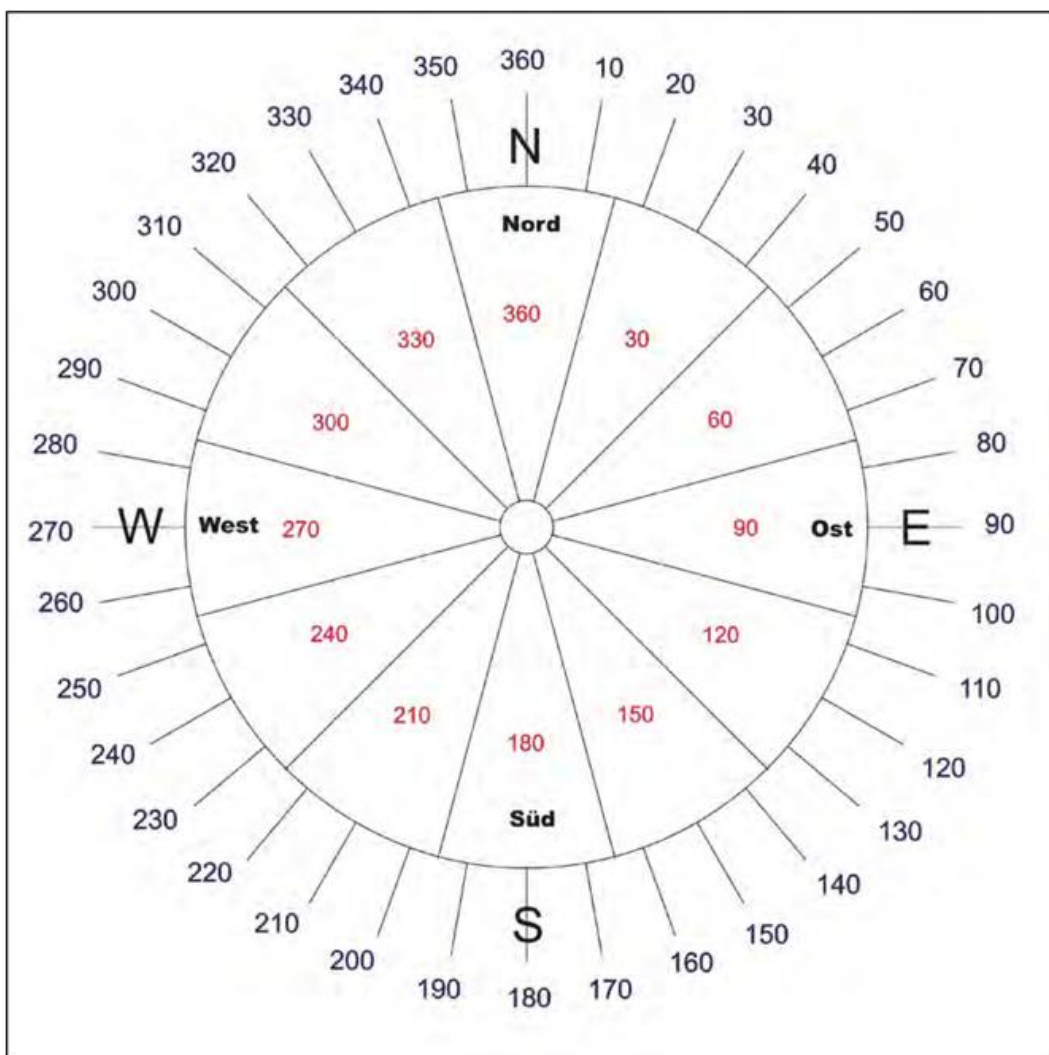


Abbildung 9: Einteilung der Windrichtungen (Windtafel: außen 10°-Einteilung, innen 30°-Sektoren)

Dargestellt werden die Daten i. Allg. mittels einer Windrose, in der die Windrichtung in 12 Sektoren zu je 30° angegeben wird (Abbildung 9). Dabei entspricht die Sektorenmitte 360° dem Sektor 345° bis 014° (entspricht der Richtung Nord), die Sektorenmitte 030° dem Sektor 015° bis 044° usw.

Die lokalen Gelände-, Bewuchs- und Bebauungsstrukturen lassen ein komplexes System von Einflussfaktoren und damit kleinräumige Modifizierungen der großräumigen Luftströmungen für den Raum Jena erwarten.

Für die Station Jena/Sternwarte liegen Winddaten für den Zeitraum 1980/2010 (ohne 1997) nur lückenhaft vor. Daher ist in Abbildung 10 als Beispiel für die mittleren Strömungsverhältnisse die mittlere Windrichtungsverteilung für die Station Erfurt-Weimar (2001/2010) dargestellt.

An der Station Erfurt-Weimar sind die bevorzugten Windrichtungen für den Zeitraum 2001/2010 von 210° bis 270° zu finden (Maximum bei 240°). Das sekundäre Maximum ist hingegen um 030° zu konstatieren. Das Minimum liegt bei 120° . Daneben sind die Sektoren um 150° , 330° , 360° und 090° äußerst wenig vertreten (Abbildung 10).

Der statistische Istwert des Jahresmittels der Windgeschwindigkeit für die Referenzstation Erfurt-Weimar (10 m über Grund) liegt für den Bezugszeitraum 2001/2010 bei ca. 4 m/s.

Aufgrund der geschützten Lage der Stadt Jena und wegen der erhöhten Umgebungsrauigkeiten wird der statistische Sollwert des Jahresmittels der Windgeschwindigkeit im Jenaer Stadtgebiet in 10 m über Grund sehr wahrscheinlich geringer ausfallen als derjenige der Vergleichsstation Erfurt-Weimar und etwa zwischen 1,5 und 3 m/s liegen.

Die geringsten mittleren Windgeschwindigkeiten (< 2 m/s) sind in den stark bebauten Tallagen Jenas (z. B. historisches Stadtzentrum, Ziegenhainer Tal, Wenigenjena) zu erwarten. Höhere Jahresmittel der Windgeschwindigkeit sind dagegen im Norden der Stadt zu vermuten (auf den freien Aueflächen), im locker bebauten Süden (zwischen Maua und Göschwitz) und auf den Plateauflächen sowie Kuppen der umgebenden Anhöhen. Darüber hinaus ist anzunehmen, dass die mittleren Windgeschwindigkeiten einiger Seitentäler (z. B. Gembdental) lokal merklich geringer ausfallen können als entlang des Saaletals. Andererseits treten in einigen breiteren Seitentälern lokal auch höhere mittlere Windgeschwindigkeiten als im Saaletal auf, z. B. vermutlich im Leutratal.

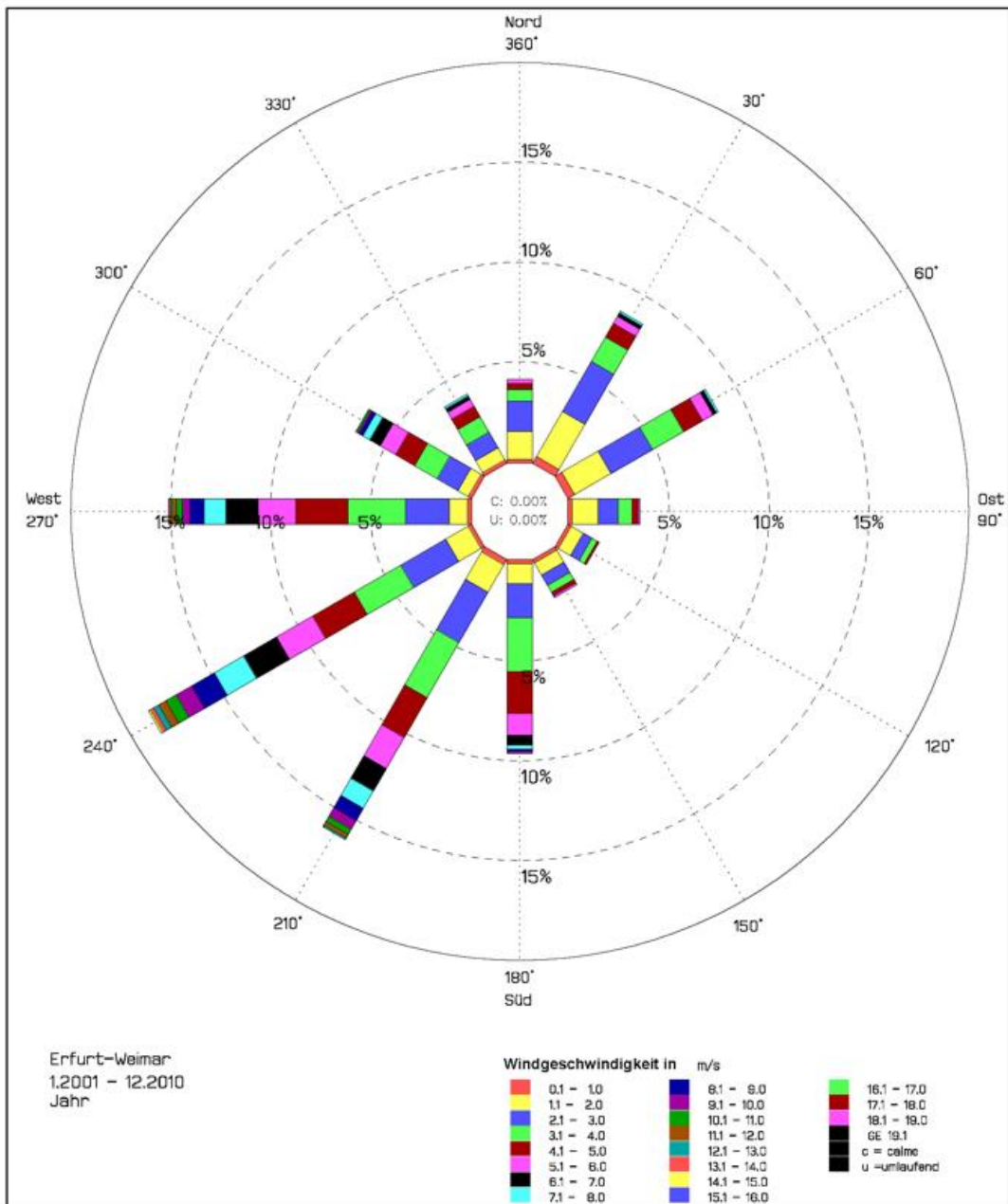


Abbildung 10: Relative Häufigkeit der Windrichtung und Windgeschwindigkeit, Erfurt-Weimar 2001/2010 (Basis: Stundenwerte)

Der für Erfurt-Weimar ermittelte statistische Istwert der jährlichen Schwachwindhäufigkeit (prozentualer Anteil der Schwachwindfälle < 1 m/s) liegt im Zeitraum 2001/2010 wegen der exponierten und frei anströmbaren Lage bei nur ca. 2 %. Der statistische Soll-Wert der Schwachwindhäufigkeit für das Jenaer Stadtgebiet dürfte – ausgenommen, die frei anströmbaren Hochlagen – deutlich höher ausfallen und mindestens Werte zwischen 15 und 25 % erreichen, im historischen Innenstadtbereich ggf. sogar darüber hinaus – bis ca. 30 %.

In den einzelnen Monaten sind Abweichungen gegenüber der mittleren jährlichen Verteilung nicht auszuschließen.

5.2.6 Exkurs: Kaltluftflüsse

5.2.6.1 Autochthones Klima

Der großräumige zirkulationsbedingte Ablauf der Witterung ist in unseren Breiten durch die Zufuhr von Luftmassen unterschiedlicher Herkunft bestimmt und wird zudem durch verschiedene Einflussfaktoren in seiner Ausprägung modifiziert – z. B. Relief, Jahreszeiten (HENDEL 2002). Deutschland wird häufig von Tiefausläufern, Frontensysteme vom Atlantik, überquert, die in die großräumige Zirkulation eingebettet und oftmals mit auffrischendem, zumeist westlichem Wind verbunden sind. Derartige Wetterlagen kennzeichnen die allochthone, d. h. fremdbürtige Witterung, die eine Ausbildung von lokalklimatischen Besonderheiten behindert bzw. unterdrückt. Ein eigenständiges (autochthones) Lokalklima, bei dem sich örtliche Besonderheiten am deutlichsten ausprägen, entwickelt sich nur im Zusammenhang mit windschwachen und wolkenarmen Wetterlagen, d. h. mit intensiver kurzweiliger Einstrahlung am Tag und ungehinderter langweiliger Ausstrahlung in der Nacht (BECK 2007). Wegen der unterschiedlichen Erwärmung und Abkühlung der Erdoberfläche können sich während solcher Strahlungswetterlagen lokale, thermisch induzierte Zirkulationssysteme (z. B. Berg- und Talwinde) ausbilden (ebd.).

Von besonderer Bedeutung ist während autochthoner Wetterlagen die Bildung bodennaher Kaltluft, die als Folge der Ausstrahlung vorzugsweise über Freiflächen (z.B. Wiesen und Wiesenhängen) entsteht und der Geländeneigung folgend – je nach ihrer Steigung und aerodynamischen Rauigkeit mehr oder weniger langsam – in tiefer gelegene Bereiche abfließt. Solche Kaltluftflüsse sind als Frischluftquelle und Medium zur Verdünnung und zum Abtransport von Luftbeimengungen für Siedlungsbereiche vorteilhaft, sofern keine Staueffekte in Verbindung mit Schadstoffanreicherung über Quellen auftreten. In der Regel haben diese Kaltluftflüsse nur eine geringe vertikale Mächtigkeit und sammeln sich an Geländetiefpunkten zu Kaltluftseen an (HUPFER 1996).

Solche lokalen Windsysteme können i. A. nur durch Messungen am Standort erkundet, im Falle von nächtlichen Kaltluftflüssen aber auch durch Modelle erfasst werden.

5.2.6.2 Windschwache Strahlungsnächte im Raum Jena

Unterschiedliche Strahlungseigenschaften der Erdoberfläche können nur dann die horizontale Verteilung der Lufttemperatur wesentlich beeinflussen, wenn die Ausstrahlungsbedingungen gut und die horizontale Durchmischung der Luft gering sind. Die Bedingungen für derartige Entwicklungen sind besonders während schwachwindiger Strahlungsnächte gegeben, die sich durch geringe horizontale Windgeschwindigkeiten und wenig bis fehlende Bewölkung auszeichnen. In diesen Nächten entstehen aufgrund der unterschiedlichen Strahlungseigenschaften verschiedener Landnutzungen horizontale Differenzen der Lufttemperatur (GROß und ETLING 2003).

Im vorliegenden Bericht gilt eine Nacht als windschwache Strahlungsnacht, wenn in der Zeit von 17 bis 5 Uhr UTC mindestens 7 zusammenhängende Stunden oder mindestens 10 Gesamtstunden auftreten, in denen die Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund kleiner oder gleich 2,6 m/s, die stündliche Temperaturabnahme größer oder gleich 0,3 Kelvin je Stunde, und der Bedeckungsgrad kleiner oder gleich 4 Achtel sind.

Die mittlere jährliche Häufigkeit von Strahlungsnächten, das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit sowie die mittlere Schwachwindhäufigkeit für den Raum Jena wurden anhand von stündlichen Beobachtungsdaten der Wetterstation Erfurt-Weimar des Deutschen Wetterdienstes für den Bezugszeitraum 2001/2010 abgeleitet, da für Jena selbst entsprechende Daten nicht vorliegen.

Innerhalb des Bezugszeitraumes 2001/2010 lässt sich für die Referenzstation Erfurt-Weimar ein mittlerer Wert von etwa 30 Strahlungsnächten pro Jahr konstatieren, d. h. im Durchschnitt der ausgewerteten Jahre (2001 bis 2010 für Erfurt-Weimar) war etwa jede elfte bis zwölfte Nacht eine Strahlungsnacht. Der Bereich des Saaletals in Jena liegt im Vergleich zur exponierten Bezugsstation Erfurt-Weimar eher geschützt, so dass in Jena generell sowie innerhalb des Bezugszeitraumes 2001/2010 im Durchschnitt sehr wahrscheinlich eine größere Anzahl an Strahlungsnächten zu erwarten ist. Im Mittel sind für Jena im o. g. Bezugszeitraum etwa 36 bis 45 (Schätzwerte) Strahlungsnächte pro Jahr anzunehmen. Jede achte bis zehnte Nacht dürfte in Jena im Bezugszeitraum 2001/2010 demnach eine durch geringe Bewölkung, eine entsprechende Temperaturabnahme und schwachen Wind definierte Strahlungsnacht gewesen sein.

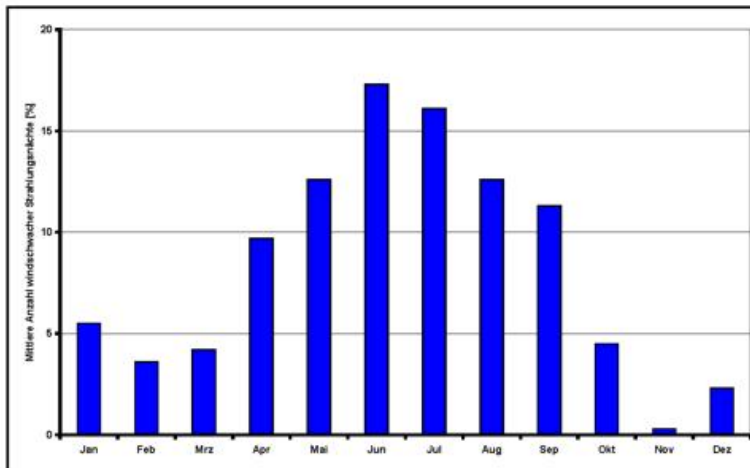


Abbildung 11: Mittlere monatliche Anzahl windschwacher Strahlungsnächte, Erfurt-Weimar 2001/2010

Die mittlere jährliche Anzahl der Strahlungsnächte ist aber nicht gleichförmig auf das Jahr verteilt, sondern zeigt deutliche Maxima von Mai bis September (Tabelle 10 und Abbildung 11). Zudem kann diese Anzahl von Jahr zu Jahr erheblich schwanken (Abbildung 12). So traten an der Station Erfurt-Weimar im o. g. Beurteilungszeitraum im Jahr 2007 etwa nur halb so viele

Strahlungsnächte auf wie im Jahr 2003. Die relativ hohe Anzahl von Strahlungsnächten im Jahr 2003 beruht beispielsweise auf den im damaligen Sommer aufgetretenen lang anhaltenden und stabilen wolkenarmen Hochdruckwetterlagen.

Tabelle 10: Mittlere monatliche und jährliche Häufigkeit des Auftretens windschwacher Strahlungsnächte, Erfurt-Weimar 2001/2010

Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Jahr
Mittel [%]	5,5	3,6	4,2	9,7	12,6	17,3	16,1	12,6	11,3	4,5	0,3	2,3	5,5

Während des Messzeitraumes (vom 01.05. bis 30.09.2011) wurden 15 windschwache Strahlungsnächte an der Referenzstation Erfurt-Weimar registriert. Wegen der etwas abweichenden orographischen Bedingungen werden in Jena für den o. g. Zeitraum mehr Strahlungsnächte angenommen. Zudem sind leichte Abweichungen zwischen beiden Standorten bzgl. der Häufigkeit des Auftretens in den einzelnen Monaten des Messzeitraumes auf Grund variierender Gelände- und Raumnutzungsstrukturen etc. nicht auszuschließen.

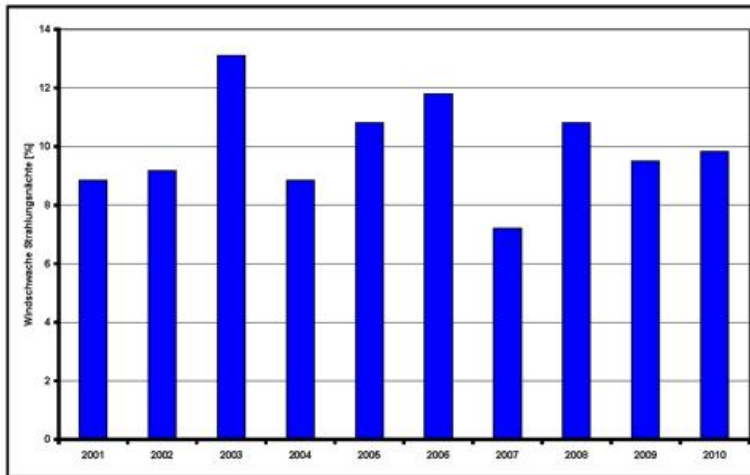


Abbildung 12: Relative Häufigkeit des Auftretens windschwacher Strahlungsnächte, Erfurt-Weimar 2001/2010

5.2.6.3 Kaltluftentstehung

In klaren, windschwachen Nächten, bei autochthonen Wetterlagen, kühlen sich die Erdoberfläche und die bodennahe Luftschicht besonders gut ab. Ursache für die Abkühlung ist die effektive Ausstrahlung, d. h. die Differenz zwischen der Wärmeausstrahlung der aktiven Oberfläche und der (bei klarem Himmel verminderten) langwelligen Gegenstrahlung der Atmosphäre. Letztere ist zu gering, um die Ausstrahlung zu kompensieren, so dass ein Wärmeverlust entsteht. Der Wärmetausch zwischen der sich abkühlenden aktiven Oberfläche und der Atmosphäre führt schließlich dazu, dass die abgestrahlte Wärme, wenigstens zum Teil, der bodennahen Luftschicht entzogen wird, d. h. es kommt zur Produktion von Kaltluft.

Während windschwacher Wetterlagen ist die nächtliche Auskühlung und damit die Kaltluftproduktion über Freiflächen am größten (HUPFER 1996). Freie Flächen mit entsprechendem Kaltluftbildungspotenzial (Brachen, Wald, Wiese, Areale mit Vegetation von geringer Höhe) finden sich in Jena z. B. auf umgebenden Anhöhen, Plateauflächen, in Niederungen sowie an den unbebauten Hängen der Seitentäler. Die hier gebildete Kaltluft gerät bei geneigter Oberfläche in Bewegung. Sie fließt – der Geländeneigung folgend – in die jeweiligen Talgründe ab und folgt hier dem Talverlauf. Die saalewärts gerichteten Strömungen werden zusätzlich durch die Kaltluft des Saalehaupttals (süd-nord-gerichteter Strom) verstärkt. Gemeinsam unterstützen sie die Kaltluftzufuhr in die Ortslage von Jena.

Die Menge der entstehenden Kaltluft hängt einerseits von der Jahreszeit (Andauer der Nacht) und andererseits von der Art der Landnutzung (Bewuchs und Bebauung) ab (ebd.). Bei vegetationsbedecktem Boden erfolgt die Ausstrahlung hauptsächlich von den Blättern des Bewuchses, wobei der Wärmetausch mit der Atmosphäre (wegen der Größe der gesamten Blattfläche in Verbindung mit ihrer geringen Wärmekapazität) besonders gut funktioniert. Wiesen, Weide- und Ackerland erweisen sich deshalb als gute Kaltluftproduzenten.

Bei Waldgebieten liegen die Verhältnisse etwas komplizierter, weil die Ausstrahlung – und damit die primäre Abkühlung – nicht aus der unmittelbaren Bodennähe, sondern hauptsächlich aus dem oberen Kronenbereich der Bäume erfolgt. Die dort produzierte Kaltluft sinkt ab und vermischt sich mit der wärmeren Luft des Stammraumes. Die am Boden messbare Abkühlung der Atmosphäre ist deshalb im Wald, jedenfalls bei geschlossenem Bestand, zumeist geringer als über vegetationsbedeckten Freiflächen. In

Lichtungen, die besonders windgeschützt sind und bei denen die Ausstrahlung aus niedriger Vegetation erfolgt, kann es aber auch empfindlich kalt werden. Wälder auf stark geneigten Flächen haben jedoch eine sehr hohe Kaltluftproduktion, weil die ausstrahlende Oberfläche sehr groß ist und die Kaltluft gut der Geländeneigung folgend abfließen kann.

Für praktische Zwecke wird die Stärke der Kaltluftproduktion unterschiedlicher Flächen durch empirische Kaltluftproduktionsraten charakterisiert, die in $\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$ (Kubikmeter Kaltluft pro Quadratmeter Oberfläche und pro Stunde) angegeben werden. Nach KING (1973) haben Freiflächen (Wiese, Acker, Brachland etc.) eine Kaltluftproduktionsrate von etwa $12 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Demgegenüber liefern Gewässer, versiegelte Oberflächen und dicht bebaute Siedlungs-, Gewerbe- und Industriegebiete keinen Beitrag zur Kaltluftbildung. Die Materialien derartiger Flächen (Wasser, Beton, Asphalt etc.) speichern tagsüber große Wärmemengen, die sie nachts sukzessive wieder an die Atmosphäre abgeben. Areale solcher Flächennutzung sind deshalb während windschwacher Strahlungs Nächte wärmer als ihr Umland.

5.2.6.4 Kaltluftflüsse und Lokalwindzirkulation

Auf unbebauten Hügeln entwickelt sich bei nächtlicher Abkühlung aufgrund des höheren spezifischen Gewichtes der kälteren Luft nach Überwindung der Bodenrauigkeit ein mehr oder weniger starker, hangabwärts gerichteter Kaltluftfluss, dessen Fließgeschwindigkeit von der Hangneigung, der Bodenrauigkeit und der Größe des Kaltlufteinzugsgebietes (Gebiet, in dem die Kaltluft produziert wird) abhängt. Die Hangneigung muss erfahrungsgemäß wenigstens 1 bis 2 Grad (entsprechend etwa 1 bis 3 m Gefälle auf 100 m Strecke) betragen. Die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft erreicht i. Allg. Werte von 0,5 bis 2 m/s (KING 1973). Die vertikale Mächtigkeit dieser Kaltluftflüsse ist dabei auf wenige Dekameter beschränkt. Bei entsprechenden Bedingungen können auch Fließgeschwindigkeiten über 5 m/s und eine vertikale Mächtigkeit von über 100 m erreicht werden. Kaltluftflüsse können bereits kurz vor Sonnenuntergang einsetzen (HUPFER 1996). Ihre Fließrichtung wird durch Hindernisse modifiziert. Bei guten Abflussmöglichkeiten und schwachwindigen Strahlungsbedingungen kann ein Kaltluftfluss die ganze Nacht andauern und erst nach dem Sonnenaufgang versiegen (ebd., GROSS und ETLING 2003). Ebene Flächen produzieren gleichermaßen Kaltluft, diese kann dann aber nicht abfließen, so dass die Höhe der Kaltluftschicht rasch ansteigt.

Kaltluftstaus bilden sich im Luv von natürlichen und anthropogenen Hindernissen (Wald- und Siedlungsrand, Straßendamm, Talsperre u. a.). Die kalte Luft staut sich bis zur Hindernishöhe auf, und bei weiterem Nachfließen von Kaltluft wird das Hindernis schließlich überströmt. Kleinere Hindernisse werden von der abfließenden Kaltluft ohne nennenswerte Staubbildung um- oder überströmt. Kaltluftseen entstehen durch Ansammlung kalter Luftmassen in Mulden und Senken (ebd.). Bedingt durch die fortdauernde Ausstrahlung und den geringen Austausch mit den höheren Luftschichten kühlen sich die (im Kaltluftstau oder Kaltluftsee) stagnierenden Luftmassen weiter ab. In diesen Bereichen ist daher (insbesondere im Frühjahr und Herbst) mit erhöhter Frost- und Nebelhäufigkeit zu rechnen (ebd.).

Kaltluftproduktion und Geländere relief sind die treibenden Kräfte für lokale, thermisch bedingte Windsysteme, auch Lokalwindzirkulationen genannt. Diese entstehen bei autochthonen Wetterlagen durch horizontale Temperaturunterschiede (ROEDEL 2000). Da kältere Luft (bei gleichem Druck) schwerer ist als warme, beginnt sie abzusinken. Die Folge ist ein Druckanstieg am Boden unter dem Absinkbereich und eine Druckabnahme in der Höhe, was wiederum zu Ausgleichsströmungen mit zirkulierendem Charakter führt. Solche thermischen Windsysteme sind beispielsweise Hangwinde oder Berg- und Talwinde (ebd.).

5.2.6.5 Topografisch bedingte lokale Windsysteme

Eine kleinräumige Zirkulation bzw. ein lokales Windsystem entsteht losgelöst von der großräumigen Luftdruckverteilung. Auslöser für die Entstehung eines solchen lokalen Windsystems sind kleinräumige Druckdifferenzen, hervorgerufen durch topografische, orographische oder anthropogen bedingte Einflüsse (BECKRÖGE 1999, ROEDEL 2000).

Zu topografischen Windsystemen zählen Hangauf- und -abwinde, Talauf- und -abwinde sowie Berg- und Talwinde (BECKRÖGE 1999).

Unter Hangwinden ist das nächtliche Abfließen der über Bodenerhebungen abgekühlten Luft (Hangabwinde) bzw. das Aufsteigen der an einem Hang erwärmten Luft bei Tage (Hangaufwinde) zu verstehen (ROEDEL 2000). Dabei bewegt sich die auf Anhöhen (Kuppen, Rücken) und Hängen strahlungsbedingt nächtlich abgekühlte Luft infolge der Schwerkraft in Richtung der Gefälle- bzw. Hangneigung, d. h. bei Hängen, die ein Tal seitlich begrenzen, senkrecht zur Talachse hangabwärts (tagsüber entsprechend hangaufwärts). Die Spitzen von Anhöhen können dabei über die komplette Andauer einer Strahlungsnacht aus einer über der Kaltluft ausgebildeten Inversionsschicht hinausragen. Nach dem Zusammenfließen der Kaltluft im Talgrund erzeugen die nächtlichen Hangabwinde den zum Talausgang gerichteten Bergwind oder Talabwind (FOKEN 2003).

Beide Lokalwindzirkulationen unterscheiden sich von der grundströmungsbedingten Komponente des bodennahen Windes durch den für sie typischen Tagesgang der Windgeschwindigkeit (KLOSE 2008): Zunahme der Windgeschwindigkeit im Verlauf des Vormittags bis kurz nach dem Sonnenhöchststand und anschließende Abnahme (ebd.).

5.2.7 Exkurs: Inversion

Unter dem Begriff Inversion ist die Umkehr des mit der Höhe abnehmenden Temperaturverlaufs in der Atmosphäre zu verstehen, d. h. die Temperatur nimmt im Gegensatz zu der im Mittel geltenden Abnahme der Temperatur mit der Höhe zu (BECKRÖGE 1999). Der Bereich, in dem solch ein Phänomen auftritt, wird als Inversionsschicht bezeichnet. Vom Erdboden aufsteigende erwärmte Luft kann eine Inversionsschicht, die sich in der Höhe gebildet hat, nicht durchdringen, da erstere wärmer ist als die darunter liegenden Luftschichten. Inversionsschichten stellen eine besonders stabile Schichtung dar. Sie werden auch als Sperrschicht bezeichnet, denn ein Austausch zwischen tief liegender und hoch liegender Luft wird verhindert (ebd.).

Bodeninversionen liegen unmittelbar auf der Erdoberfläche auf, Höheninversionen oder abgehobene Inversionen sind i. d. R. durch eine Schicht vertikaler Temperaturabnahme vom Boden getrennt. In Abhängigkeit der Entstehungsursache ist zwischen Absink-, Advektions- und Strahlungsinversionen zu unterscheiden.

Absinkinversionen bilden sich bei Hochdruckwetterlagen durch das Absinken – und die damit verbundene adiabatische Erwärmung – von Luftmassen in niedrigere Höhen aus. Absinkinversionen bilden sich meist in größeren Höhen aus. An ihrer Unterseite wird die vertikale Ausbreitung von Wolken begrenzt, wodurch solch eine Sperrschicht im Raum zu erkennen ist. Bildet sich eine Absinkinversion in geringerer Höhe aus, kann es in stärker strukturiertem Gelände dazu kommen, dass Talbereiche im Vergleich zu Kuppenlagen, die sich inmitten der Absinkinversion befinden, merklich geringere Temperaturen aufweisen (ebd.).

Advektionsinversionen, auch Aufgleitinversion genannt, entstehen durch die Advektion (horizontale Verlagerung) von unterschiedlich temperierten Luftmassen. Dabei schiebt sich eine Warmluftmasse in der Höhe über eine bodennahe Kaltluftmasse. An der Unterseite einer Advektionsinversion bildet sich meist stratiforme Bewölkung oder Cumulusbewölkung aus (ebd.).

Strahlungsinversionen bauen sich i. d. R. in Erdbodennähe auf und werden daher auch als Bodeninversion bezeichnet. Während wolkenloser Nächte (Strahlungsnacht) kühlen sich die Erdoberfläche und damit die Atmosphäre besonders gut ab. Die Strahlungsinversion kann am frühen Morgen vom Boden bis in einige hundert Meter über Grund reichen. Am Tage löst sich eine Bodeninversion bei ausreichender Sonneneinstrahlung jedoch relativ schnell wieder auf (ebd.).

Generell ist in stärker reliefiertem Gelände – insbesondere in den Tallagen – mit einem vermehrten Auftreten von Inversionen zu rechnen. Grund hierfür liegt zum einen in der durch erhöhte Umgebungsrauigkeiten insgesamt herabgesetzten Windgeschwindigkeit. Zum anderen stellen unbebaute Hangbereiche gute Produzenten von Kaltluft dar, die der Geländeneigung folgend in die Talbereiche fließt (ebd.).

5.3 Fünfmonatige Messungen im Zeitraum vom 01.05. – 30.09.2011

5.3.1 Vorbemerkungen

5.3.1.1 Witterungsverhältnisse im Mai

Zu Beginn des Messzeitraumes lag die Kaltfront eines Tiefs über Osteuropa quer über Deutschland und sorgte anfangs für eine kalte Phase, teils mit leichtem Schneefall in den Niederungen. Im Untersuchungsraum trat in den Nächten vom 02. bis 06. Mai örtlich Bodenfrost auf. Im weiteren Verlauf setzte sich zunehmend der Einfluss eines über Skandinavien gelegenen Hochs durch. Letzte Wolkenfelder und schauerartiger Regen zogen ab und es heiterte auf. Tagsüber schien die Sonne. Bei trockenen Bedingungen wurden im Jenaer Raum Temperaturen um 20 °C erreicht. Der Schwerpunkt des hohen Luftdrucks verschob sich im Laufe der Zeit mehr zur Ostsee und der Skandinavischen Halbinsel und sorgte weiterhin für sonnenscheinreiche, niederschlagsfreie Tage und Temperaturen bis zu 26 °C. Von Westen näherte sich zur Monatsmitte eine Kaltfront mit Quellbewölkung, die Schauer und etwas kühlere Luft mit sich brachte. Hochdruckgebiete sorgten über den restlichen Monat immer wieder für viel Sonnenschein und Temperaturen bis zu 30 °C.

5.3.1.2 Witterungsverhältnisse im Juni

Zwischen einem Hoch über dem Atlantik und einem über Osteuropa bildete sich Anfang Juni eine Brücke aus. Diese wurde jedoch kurzzeitig von einem über Mitteleuropa ins zentrale Mittelmeer abtropfenden Trog unterbrochen. Nach einem Temperatureinbruch mit starker Bewölkung und teils schauerartigem Regen am 01. Juni in Jena heiterte es an den Folgetagen zunehmend auf. Es war meist heiter oder sonnig und trocken. Der Wind wehte in den Hochlagen z. T. lebhaft. Die Temperaturen lagen am Tage im sommerlichen Bereich. Mit einer südlichen Höhenströmung floss vom 05. bis 08. Juni subtropische Warmluft ein, die auch teils starke Schauer und örtlich Gewitter mit sich brachte. Die Tageshöchstwerte der Lufttemperatur erreichten in Jena bis zu 30 °C. Nachts fiel das Minimum auf Werte zwischen 9 und 15 °C. Ein langgestreckter Trog über Westeuropa und ein Hoch über Skandinavien sorgten in der Folgezeit für eher unbeständiges Wetter. Mehrere Fronten zogen über Mitteleuropa hinweg. Trogvorderseitig stellte sich dabei stets vorübergehend teils sommerlich warme Witterung ein, die aber rasch vom nächsten Einbruch maritimer Luftmassen beendet wurde. Um die Monatsmitte und darüber hinaus

wurden in Jena nur noch Tageshöchstwerte von 17 bis 23 °C erreicht. Sonnige und regenreiche Abschnitte wechselten sich ab, bis sich ein Hoch zwischen Frankreich und Deutschland zum Monatsende etablierte und zunächst für wolkenloses Wetter und sommerliche Temperaturen sorgte, das am 30. Juni durch einen nordatlantischen Tiefausläufer mit Regen und einem Temperatursturz von ca. 12 K beendet wurde.

5.3.1.3 Witterungsverhältnisse Juli

Tiefdruckgebiete ließen im Juli insgesamt nur wenig Sonnenschein zu und brachten teils viel Niederschlag mit sich. Eine Hochdruckzone über Fennoskandinavien verstärkte sich zum Monatswechsel, während ein Tiefausläufer sein Zentrum nach und nach von Nordwesten bis ins östliche Mitteleuropa verschob. Am 01. Juli zog dabei feuchte Meereskaltluft aus Nordosten nach Deutschland. Verbunden war die Witterung in Jena bis etwa zum 04. Juli mit Tageshöchsttemperaturen zwischen 12 und 19 °C, starker Bewölkung und Regen. Mit dem Abzug des nordatlantischen Troges nach Südosten setzte sich zunächst ein Tiefdruckgebiet über den Britischen Inseln fest, so dass einzelne Tiefausläufer das Wetter der Folgetage in Deutschland determinierten und teils unbeständig gestalteten. Bei anhaltender Advektion warmer Luftmassen stiegen die Tageshöchsttemperaturen in Jena zwischen dem 06. und 13. Juli wieder über die 25-°C-Marke, örtlich sogar über 30 °C. Teils sehr sonnige und wolkige Abschnitte mit leichtem oder starkem Regen wechselten sich dann bis über die Monatsmitte hinaus ab, unterstützt durch schwülwarme Luft, die auf der Vorderseite eines von der Iberischen Halbinsel über Britannien bis nach Skandinavien reichenden Troges eingeführt wurde. Am 14. Juli befand sich das Zentrum eines Tiefs unmittelbar über Deutschland, verlagerte sich aber nach Skandinavien und kurzzeitig setzte sich Hochdruckeinfluss durch. Von Westen her zogen erneut wolken- und regenreiche Fronten heran. Die Tageshöchsttemperaturen in Jena schwankten bis zum 29. Juli zwischen 16 und 27 °C, fielen am Monatsende bei starker Bewölkung und Regen im Stadtgebiet unter 13 °C ab.

5.3.1.4 Witterungsverhältnisse im August

Der August begann mit kurzzeitig trockenem Sommerwetter. Der Wind wehte schwach aus unterschiedlichen Richtungen. Die ersten beiden Augusttage starteten nach Auflösung von örtlichem Dunst oder Frühnebel mit trockener und heiterer bis wolkiger Witterung und es wurde wärmer. Über Mitteleuropa stellte sich zunehmend eine südwestliche Strömung ein, geprägt von eingelagerten Frontensystemen, die teils ergiebigen, gewittrigen Regen mit sich brachten. So setzten sich im Raum Jena zwischen dem 03. und 09. August mit zunehmender Bewölkung täglich mehr oder minder starke Regenabschnitte durch. Die Tageshöchsttemperaturen stiegen in Jena bis zum 06. August bis auf Werte um 29 °C. Nachts fiel die Temperatur bei gelegentlich klarem Himmel nicht unter die 10-°C-Marke. Zwischen dem 07. und 11. August nahm die Bewölkung stark zu und es kühlte sich tagsüber auf 17 bis 22 °C leicht ab. Regen blieb in Jena bis zum 10.08. zunehmend aus. Der Wind wehte schwach bis mäßig aus südlichen bis westlichen Richtungen. Zur Monatsmitte hin begannen die Temperaturen (Tagesmaxima) und Sonnenscheinstunden in Jena wieder etwas zu steigen, erlebten mit dem Durchzug von Tiefausläufern und damit verbundener Bewölkung aber immer wieder Einbrüche. Vom 19. bis 23. August begann sich ein Trog über der europäischen Atlantikküste zu intensivieren. Die Strömung drehte auf Südwest und sehr heiße, teils feuchte Luft floss bei 5 bis 13 h Sonnenscheindauer ein. Teils fiel im Tagesverlauf schauerartiger Regen. Bis zum 26. August wurden bei Strahlungswetter Temperaturmaxima von mehr als 30 °C erreicht. Anschließend stellte sich die Witterung zum Monatsende um. Über Mitteleuropa stellte sich auf der Südseite eines Tiefdruckkomplexes über Skandinavien eine westliche Grundströmung ein, wobei die Mitte Deutschlands unter dem Einfluss einer schwach ausgeprägten Hochdruckbrücke vom Atlantik bis nach Osteuropa stand. Die Tageshöchsttemperaturen fielen in Jena auf 15 bis 20 °C ab. Nachts kühlte es sich

stellenweise auf 8 bis unter 4 °C ab. Bei zunehmender Bewölkung, ansonsten aber trockenen Bedingungen, schien die Sonne nur zwischen 3 und 7 h.

5.3.1.5 Witterungsverhältnisse im September

Die wechselhafte Witterung der vorangegangenen Sommermonate setzte sich im September zunächst fort. Heftige Gewitter mit Starkregen beendeten während der ersten Monatshälfte immer wieder kurze Vorstöße schwülwarmer Luft aus dem Mittelmeerraum. Über der Nordsee und den Britischen Inseln bildete sich zunächst vorübergehend eine bis nach Mitteleuropa reichende Hochdruckzone. Die ersten Septembertage begannen in Jena teils wolkig oder sonnig, lokal mit Frühnebel und Tageshöchstwerten um 20 °C. In den Folgetagen näherte sich vom Ostatlantik her ein Trog, während sich zugleich ein Keil über Mitteleuropa erstreckte und für eine südwestliche bis südliche Strömung sorgte, wobei Einzelstörungen nordwärts geführt wurden. Bis zum 04. September wurde die 30-°C-Marke erreicht. Anschließend zog ein Trog rasch nach Osten und verdrängte das osteuropäische Hochdruckgebiet hinter den Ural. Eine straffe Westströmung stellte sich ein, bei der Randtröge die Witterung wechselhaft und relativ kühl gestalteten. In Jena fielen die Tageshöchstwerte auf unter 15 °C ab. Örtlich fiel teils schauerartiger Regen und die Sonne schien teilweise nur wenige Stunden. In den Folgetagen stellte sich eine südwestliche Grundströmung ein, während weiterhin Radtiefs die Witterung unbeständig gestalteten, aber das Temperaturniveau stieg allmählich an und in Jena wurden bei wolkigen und sonnigen Abschnitten erneut Maxima um 30 °C erreicht.

5.3.2 Analyse der Messungen an den temporären und stationären Wetterstationen

5.3.2.1 Lufttemperatur an den Wetterstationen

Tabelle 11 zeigt die Monatsmittel der Lufttemperatur (entspricht dem mittleren Tagesmittel im jeweiligen Monat) an den sechs Jenaer Stationen über den Zeitraum der Messkampagne. Mit Umstellung der Witterung von einer außergewöhnlichen Häufung von Hochdruckgebieten über Mitteleuropa im Frühjahr auf den Durchzug ausgeprägter Tiefdruckgebiete im Sommer fiel der Juli im Jahr 2011 – bezogen auf die internationale Referenzperiode 1961/1990 – zu kühl aus.

Tabelle 11: Vergleich der Monatsmittel der Lufttemperatur [°C] an den Jenaer Stationen (01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel)

Monat	Beutenberg	Gembdental	Griesberg	Saaleaue	Stadion	Sternwarte
Mai	13,8	13,7	14,0	14,3	14,4	15,1
Juni	16,6	16,8	16,3	17,4	17,6	18,0
Juli	16,1	16,5	15,7	17,1	17,3	17,6
August	17,7	17,7	17,9	18,2	18,5	18,9
September	15,0	14,8	15,8	15,3	15,7	16,2
Durchschnitt	15,8	15,9	15,9	16,5	16,7	17,2

Die Innenstadt-Station Sternwarte ist im Mittel die wärmste, gefolgt an zweiter und dritter Stelle von den Stationen Stadion und Saaleaue. Die im Durchschnitt kälteste Station ist Beutenberg, dicht gefolgt von den Stationen Gembdental und Griesberg.

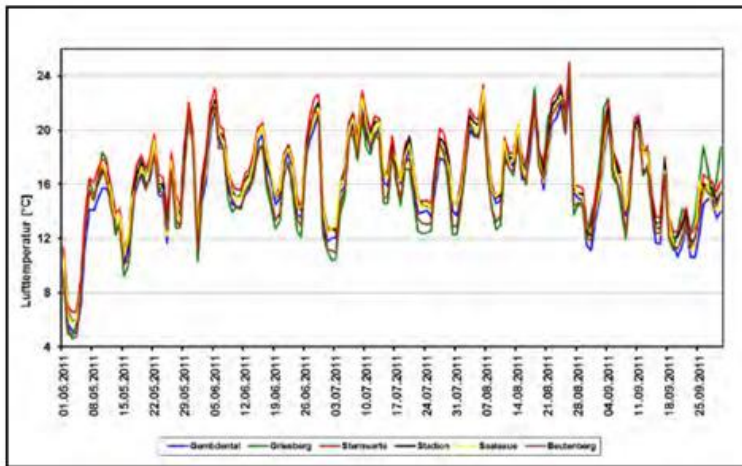


Abbildung 13: Verlauf der Tagesmittel der Lufttemperatur an den Jenaer Stationen (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel)

Ein- bzw. Ausstrahlung, wolkenlosem Himmel und Austauschermut besonders deutlich hervortreten. Während autochthoner Witterungsabschnitte im Mai und September überragt beispielsweise die mittlere Lufttemperaturkurve für die Station Griesberg alle anderen Stationskurven, was sich u. a. über ihre Topografie, Orografie und das thermische Verhalten der Geländeoberfläche erklärt.

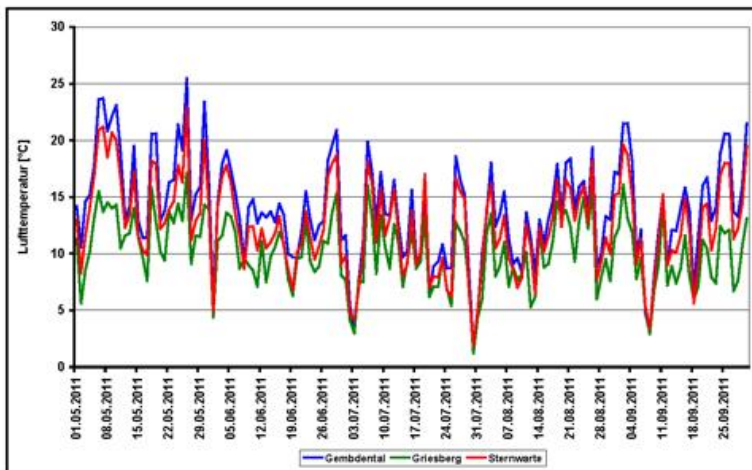


Abbildung 14: Vergleich der Amplituden der Lufttemperatur der Jenaer Stationen, an denen das Minimum und Maximum der Lufttemperatur erfasst wurde (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel)

Insgesamt zeigt die Station Griesberg im Vergleich zu den Stationen Gembdental und Sternwarte wegen geringerer Tagesamplituden jedoch eine eher ausgeglichene, moderatere Temperaturkurve. Für die Station Griesberg wurde über den Messzeitraum an rund 92 % der Tage (GG: 153) die geringste tägliche Temperaturamplitude ermittelt, während der Wert für die Stationen Sternwarte und Gembdental bei nur ca. 7 bzw. 1 % liegt (Abbildung 14). Invers dazu stellt sich die Situation bei Betrachtung der größten täglichen Amplituden der Lufttemperatur dar: Über den gesamten Messzeitraum weist die Station Gembdental im Vergleich zu den Stationen Griesberg und Sternwarte in rund 92 % der Fälle (GG: 153) die größte Tagesamplitude der Lufttemperatur auf (Abbildung 14).

Die Station Gembdental zeichnet sich in Phasen von Temperatureinbrüchen und warmer Hochphasen im Vergleich zu den anderen Talstationen als kälteste aus. An ihr wurde an rund 83 % aller Tage (GG: 153) das tiefste Tagesminimum der Lufttemperatur gemessen sowie auch das absolut tiefste Tagesminimum der Lufttemperatur registriert: $-2,8\text{ °C}$, am 04. Mai 2011. Die Ursachen für die geringen Tagesamplituden und tiefen Temperaturminima sind:

Ein Blick auf den Verlauf der Tagesmittel der Lufttemperatur an den sechs Stationen bestätigt die Trends der Monatsmittel (Abbildung 13). Der Verlauf der Tagesmittel der Lufttemperatur lässt auf mikroklimatische Unterschiede zwischen den hinsichtlich Orografie, Topografie, Begrünung und Bebauung verschieden geprägten Standorten schließen, die an Tagen mit hoher

Ein- bzw. Ausstrahlung, wolkenlosem Himmel und Austauschermut besonders deutlich hervortreten. Während autochthoner Witterungsabschnitte im Mai und September überragt beispielsweise die mittlere Lufttemperaturkurve für die Station Griesberg alle anderen Stationskurven, was sich u. a. über ihre Topografie, Orografie und das thermische Verhalten der Geländeoberfläche erklärt.

- Die Lage im Süden des Muschelkalkhanges des Jenzig (guter Wärmespeicher, gute Erwärmung am Tag);
- Lage in einem Ost-West-gerichteten Seitental (Südhang) mit Gefälleneigung zum Saaletal, so dass sich im Sommer etwas höhere Tagesmaxima einstellen können;
- Kaltluft strömt im Talgrund um den Gembdenbach zusammen und sorgt für eine ausgeprägte Abkühlung insbesondere während windschwacher Strahlungsächte;
- Die niederungsartige Lage unterstützt die Gefahr des Auftretens von Früh- und Spätfrösten.

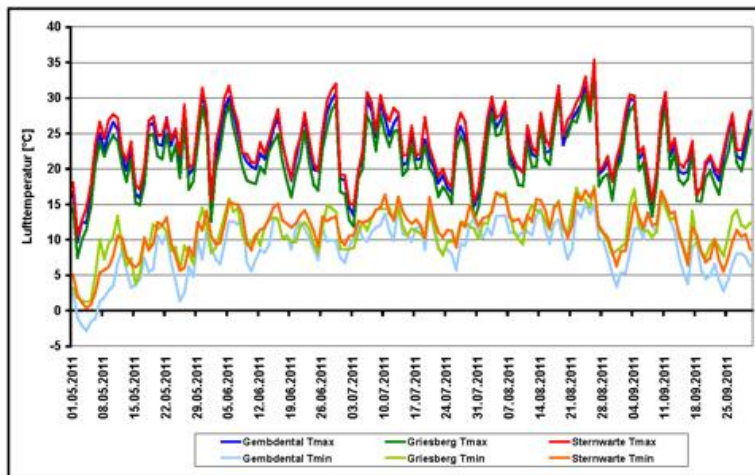


Abbildung 15: Verlauf der Tagesminima und -maxima der Lufttemperatur an den temporären Jenaer Stationen (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel).

An der Station Jena/ Sternwarte wurde über den Messzeitraum an rund 96 % aller Tage (GG: 153) das höchste Tagesmaximum der Lufttemperatur erreicht. Das absolut höchste Tagesmaximum der Lufttemperatur des Messzeitraumes wurde am 26. August 2011 am Standort Sternwarte gemessen (35,4 °C, Abbildung 15). Der Umstand, dass die Station Sternwarte im

Vergleich die wärmste ist, erklärt sich u. a. über folgende Aspekte:

- Die Umgebung der Station Sternwarte zeichnet sich durch erhöhte Umgebungsrauigkeiten aus. Dadurch sind die Komponenten Windgeschwindigkeit und atmosphärische Austauschbewegungen vergleichsweise eingeschränkt. Einmal erwärmte Luft kann schlecht entweichen. Kühlere Austauschluftmassen von außen können schlecht in die bebauten Areale vordringen.
- Der erhöhte Anteil versiegelter Flächen im Bereich um den Standort der Station Sternwarte führt zu einer verringerten Verdunstung. Folglich erhöht sich der fühlbare Wärmestrom gegenüber dem latenten Wärmestrom.
- Zusätzlich produziert und speichert die anthropogen geschaffene Umwelt sensible Wärme und gibt sie an ihre Umgebung ab.

Im Zeitraum vom 05. bis 10. Mai 2011 stellte sich eine autochthone Witterung in Jena ein. Abbildung 16 ist ein für autochthone Wetterlagen typischer Tagesgang der Lufttemperatur mit Tageshöchstwerten am Nachmittag und Tiefstwerten am Morgen zu entnehmen. Mikroklimatische Unterschiede zwischen unterschiedlich geprägten Standorten konnten sich während dieser Wetterlage recht gut ausbilden: Die Temperaturunterschiede zwischen der Innenstadtstation (Sternwarte) und der Umlandstation (Gembdental) fielen tagsüber – mit einer Differenz von bis zu etwa 2 K gegenüber einer Differenz von bis zu 4 K während der Nachtstunden – erwartungsgemäß geringer aus (Abbildung 16). Der Griesberg erwärmte sich tagsüber gut. Allerdings heizte sich der Stationsstandort nicht so sehr auf wie derjenige in der Innenstadt und am

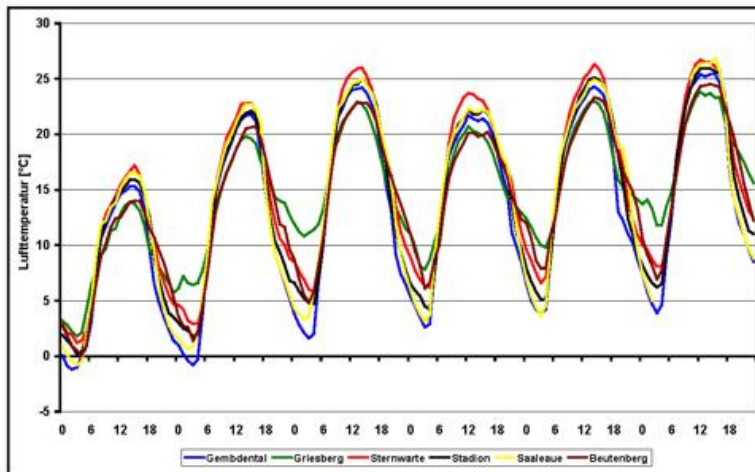


Abbildung 16: Tagesgänge der Lufttemperatur an den temporären Jenaer Stationen während einer Strahlungswetterlage (vom 05.05. bis 10.05.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel)

stromaufwärts aus dem Saaletal bis zu einem Minimum in der zweiten Nachthälfte ab. Der Standort Griesberg hingegen ragte offenbar nachts aus der Kaltluft – die sich u. a. auf freien Flächen umgebender Anhöhen bildete und in die Täler abfloss – und in eine Temperaturinversionsschicht hinein, wodurch die Temperaturamplitude während sommerlicher Strahlungswetterlagen im Vergleich insgesamt geringer ausfällt (Tabelle 12).

Tabelle 12: Amplitude der Lufttemperatur [°C] für ausgewählte Tage (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel)

Datum	Gembdental	Griesberg	Sternwarte
06.05.2011	23,6	15,5	20,9
07.05.2011	23,7	13,7	21,2
25.05.2011	19,1	12,9	16,3
05.06.2011	17,4	13,3	16,3
28.06.2011	19,6	13,7	18,0
26.07.2011	18,6	12,8	16,7
27.07.2011	16,5	12,0	15,5
03.08.2011	18,0	13,5	16,2
20.08.2011	18,0	13,8	16,5
03.09.2011	21,5	13,1	18,7
25.09.2011	20,6	11,8	18,0

Für die Station Sternwarte wurden über den Messzeitraum die meisten Sommertage (62) ermittelt, an der Station Griesberg die wenigsten (37). Das Gleiche gilt für die heißen Tage, die insgesamt erwartungsgemäß weniger häufig vorkamen. Frosttage wurden lediglich im Gembdental erfasst. Tropennächte und Eistage wurden an keiner Station registriert (Tabelle 13).

Stadtrand. Dies findet seine Begründung u. a. in dem unterschiedlichen thermischen Verhalten anthropogen geschaffener und natürlicher Oberflächen sowie den verschiedenen Durchlüftungsverhältnissen der Standorte.

Nachts kühlten sich das urbane und randstädtische Stationsareal teils unter Kaltluftzufluss aus den Seitentälern und

Tabelle 13: Anzahl an Ereignistagen (absolut, GG: 153) an den Jenaer Stationen (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel)

Station	Sommertage ($T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$)	Heiße Tage ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$)	Frosttage ($T_{\min} < 0 \text{ °C}$)
Gembdental	52	6	5
Griesberg	37	3	.
Sternwarte	62	15	.
Durchschnitt	50	8	2

Aus der Betrachtung der Temperaturwerte und Ereignistage an den Stationen ergibt sich für den Zeitraum 01.05. bis 30.09.2011 zusammenfassend der Hinweis auf Temperaturunterschiede im Untersuchungsgebiet: Innerstädtische, stark bebauten Bereiche heben sich gegenüber begrünten, gewässer-nahen, freien oder locker bebauten Arealen als thermisch belastete Gebiete ab. Dies zeigt sich z. B. anhand einer auffallend höheren Anzahl an heißen Tagen und Sommertagen bzw. fehlenden Frosttagen an der Innenstadtstation Sternwarte gegenüber der Umlandstation Gembdental. Der moderateste Temperaturverlauf während einer sommerlichen Strahlungswetterlage mit den geringsten Tagesamplituden ist der Station Griesberg zuzuordnen, der extremste mit den größten täglichen Amplituden der Station Gembdental. Letztere, im Bereich eines Kaltluftproduktions- und -abflussbereiches gelegen, kühlte sich jeweils am stärksten ab. An ihr wurden im betrachteten Zeitfenster die tiefsten absoluten täglichen Minima gemessen, an der Innenstadtstation Sternwarte hingegen die absolut höchsten täglichen Maxima. Ferner wurde ermittelt, dass die Mitteltemperatur der Innenstadt (Sternwarte, 17,2 °C) um ca. 1,3 K gegenüber der des freien Umlandes (Gembdental, 15,9 °C) erhöht war. Die mittlere tägliche Höchsttemperatur zwischen den Stationen Sternwarte und Gembdental betrug eine Differenz von rund 0,97 K, die mittlere tägliche Tiefsttemperatur unterschied sich um ca. 2,45 K. An knapp 30 % aller Tage innerhalb des Messzeitraumes (GG: 153 Tage) betrug die Differenz der täglichen Temperaturminima zwischen der Innenstadt (Sternwarte) und dem Umland (Gembdental) zwischen 3,0 und 4,3 K.

5.3.2.2 Relative Luftfeuchte an den Wetterstationen

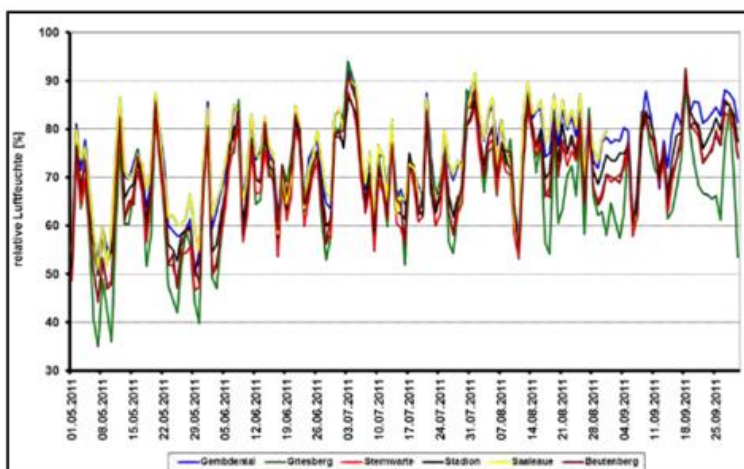


Abbildung 17: Verlauf der Tagesmittel der relativen Luftfeuchte an den Jenaer Stationen (vom 01.05. bis 30.09.2011 – ausgenommen Station Saaleaue (Messausfall), Basis: 10-Minuten-Mittel)

Invers zum Verlauf der Lufttemperatur zeichnet sich der Gang der Tagesmittel der relativen Luftfeuchte an den Jenaer Stationen ab (Abbildung 17).

Bedingt durch die Kuppenlage und damit gute Durchlüftungssituation ist für die Station Griesberg im Schnitt über den Messzeitraum die geringste mittlere relative Luftfeuchte zu

konstatieren (67,5 %), gefolgt von der Station Sternwarte. Erwartungsgemäß ist die relative Luftfeuchte an den Stationen, die im Bereich der Auen gelegen sind, am höchsten. An der Station Gembdental, nur knapp 50 bis 100 m vom Gembdenbach entfernt, wurde die höchste mittlere Luftfeuchte für den Messzeitraum ermittelt (74,6 %), gefolgt von der Station Saaleaue (knapp 200 m von der Saale entfernt). Wegen der feuchten, teils geschützten Bedingungen auf den Auenflächen wurden die größten mittleren Feuchtwerte i. d. R. an den Stationen Gembdental und Saaleaue erreicht (Tabelle 14).

Tabelle 14: Monatsmittel der relativen Luftfeuchte [%] an den Jenaer Stationen (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel)

Monat	Beutenberg	Gembdental	Griesberg	Saaleaue	Stadion	Sternwarte
Mai	61,6	66,3	57,4	67,3	63,7	59,9
Juni	69,6	73,1	68,6	73,4	69,7	66,9
Juli	71,2	74,8	71,6	74,6	70,9	68,8
August	73,9	78,6	70,2	79,5	75,1	72,5
September	76,2	80,3	69,9	Messausfall	77,6	74,9
Durchschnitt	70,5	74,6	67,5	73,7	71,4	68,6

5.3.2.3 Windverhältnisse an den Wetterstationen

Die Ergebnisse der Windmessungen sind differenziert zu betrachten, wobei die Werte der Stationen nur bedingt miteinander vergleichbar sind. Gründe hierfür sind z. B. die unterschiedlich geprägten Standortumgebungen, Höhenlagen und teils verschiedene Messwertgeberhöhen. Allgemein sind die Hauptwindrichtungen an den Stationen stark durch die lokale Orografie und Topografie determiniert (Abbildung 18).

Die im ost-west-gerichteten Gembdental gelegene gleichnamige Station zeigt eine dem Talverlauf angepasste straffe Ost-West-Verteilung. Das primäre Maximum liegt bei 270°, das sekundäre bei 090°, das Minimum bei 360°. Am Standort Saaleaue liegt das primäre Windrichtungsmaximum um 210°, das sekundäre bei 60°. Das Minimum liegt bei 330°. Geleitet durch die umgebenden Anhöhen wird der Wind im Saaletal auf Südwest abgelenkt. Die Aufweitung des Saaletals vom Stadtkern in Richtung Norden zum vorgenannten Stationsstandort zeichnet sich recht gut ab. Die Station am Standort Stadion zeigt ebenfalls eine dem Verlauf des Saaletals angepasste Windrichtungsverteilung. Die Hauptwindrichtung ist hier für den Südsektor (180°) zu bemerken. Das sekundäre Maximum liegt bei 360°, das Minimum bei 060°. Die Verengung des Saaletals auf Höhe der Station spiegelt sich in der zugehörigen Windrose wider, die im Gegensatz zu derjenigen Windrose für den Standort Saaleaue in den Südsektoren eine weniger starke Auffächerung zeigt, dafür jedoch eine starke Belegung der Sektoren um 180° und 150°. Die Windrichtungsverteilung der Station Beutenberg ist vorrangig durch den Verlauf des Ammerbachtals beeinflusst. Hier liegt das Windrichtungsmaximum für den Messzeitraum bei 210°. Das sekundäre Maximum liegt im Sektor um 030° und ist wahrscheinlich auf nördlich abgelenkte (Hangab-) Winde zurückzuführen. Das Minimum ist für den Sektor um 330° zu erkennen. Die Innenstadtstation Sternwarte zeigt eine dreigipflige Verteilung mit dem primären Maximum um 210°, einem sekundären Maximum um 330° und einem – wenn auch nur schwach ausgeprägten – tertiären Peak um 030°. Dieser Standort wird zunächst hauptsächlich von Winden, die durch das Saaletal eine Kanalisierung auf südsüdwestliche und nordnordöstliche Richtungen erfahren, geprägt. Des Weiteren spiegelt sich im Sektor um 330° der Einfluss des Mühltais wider. Offensichtlich von der

Orografie unbeeinflusst zeigt sich die Windrose der Station Griesberg. An diesem Standort, der wegen geringer Umgebungsrauigkeiten und in Kuppenlage frei angeströmt wird, setzt sich die überregionale Komponente (mittlere Richtung des Höhenwindes aus Südwest bis West) durch. Das primäre Richtungsmaximum liegt erwartungsgemäß bei 240°, das sekundäre bei 030° und das Windrichtungsminimum bei 330°.

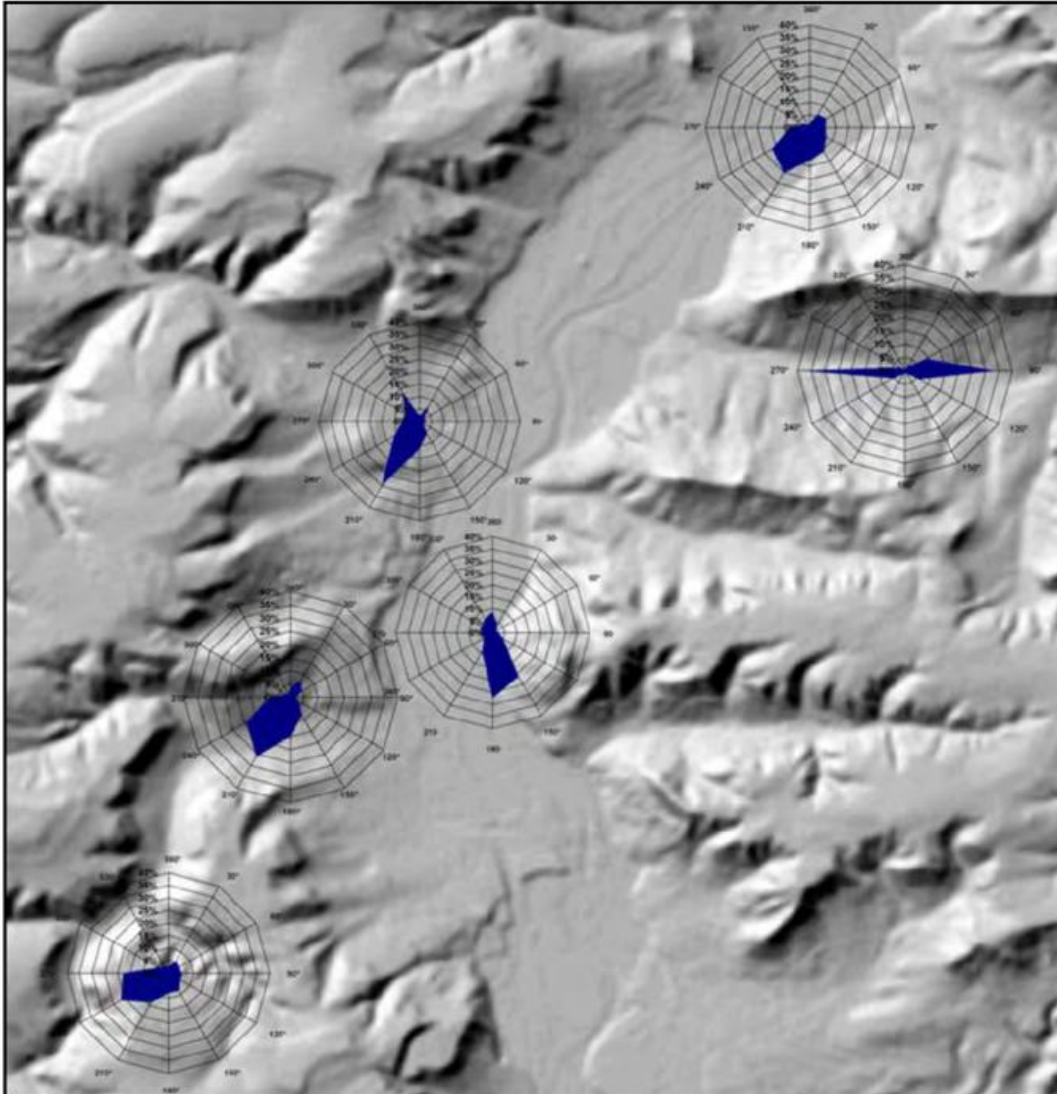


Abbildung 18: Windrosen der Jenaer Stationen, (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel)

Bei Betrachtung autochthoner Wetterlagen treten lokale Eigenheiten an den einzelnen Stationen besonders hervor. Es zeigt sich eine Veränderung bei den jeweiligen Hauptwindrichtungen, beispielhaft dargestellt für die Stationen Gembdental und Stadion (Abbildung 19 und Abbildung 20). Die Verhältnisse an den Stationen Saaleaue, Beutenberg und Griesberg werden lediglich verbal beschrieben, da für einige der vorgenannten Standorte u. a. die Datenbasis zur Erstellung einer repräsentativen Windrose zu gering war.

Während windschwacher Strahlungsächte dominierte an der Station Gembdental erwartungsgemäß der 090°-Sektor, mit schwachen Winden bis zu etwa 1,5 m/s. Es ist davon auszugehen, dass dieser talabwärts gerichtete Wind hauptsächlich durch die in der Talsohle des Gembdentals zusammenfließende nächtliche Kaltluft von den Nord- und Südhängen der umgebenden Anhöhen sowie des Langen Grundes gespeist wird. Die

Häufigkeit des Auftretens der Westkomponente wird während nächtlicher windschwacher Strahlungsbedingungen minimal.

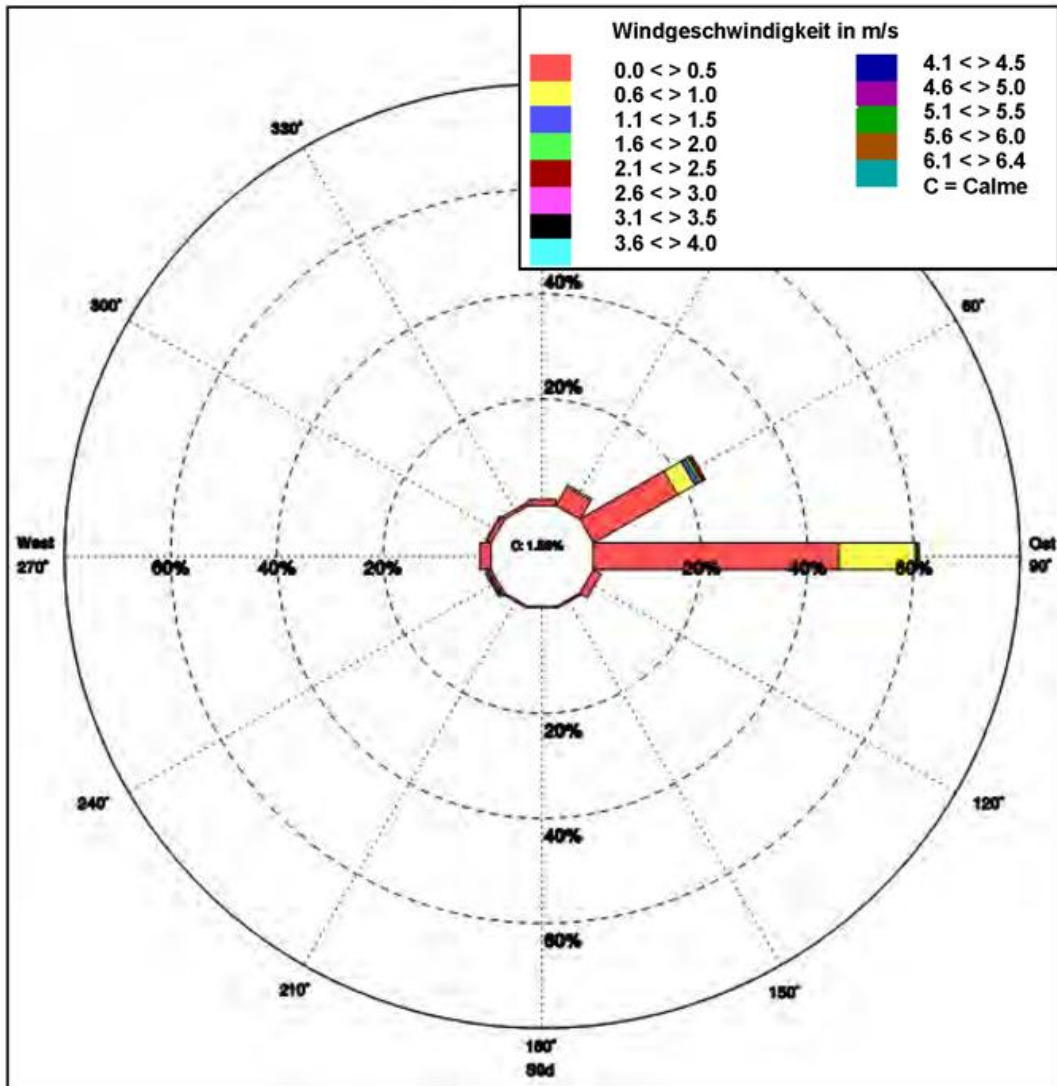


Abbildung 19: Relative Häufigkeit der Windrichtung und -geschwindigkeit für windschwache Strahlungsnächte (19:30 - 06:00 Uhr UTC), Station Gembdental (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel)

Die Station Stadion zeigt unter den Bedingungen einer windschwachen Strahlungsnacht eine Nord-Süd-Verteilung, mit dem primären Maximum um 180° und dem sekundären Maximum um 360°. Das Minimum liegt bei 270°. Abgesehen von den Sektoren um 180° bis 150° sowie 090° bis 030° sind nahezu alle anderen Sektoren gegenüber der Verteilung des Gesamtzeitraumes deutlich geringer belegt. Wegen der erhöhten Umgebungsrauigkeit westlich des Standortes, dringen Hangabwinde bzw. Kaltluftflüsse von Bergen und Seitentälern aus dieser Richtung (z. B. Lichtenhainer Höhe, Mädertal) kaum bis zum Standort vor. Es dominieren talabwärts gerichtete Strömungen, kanalisiert durch das Saaletal.

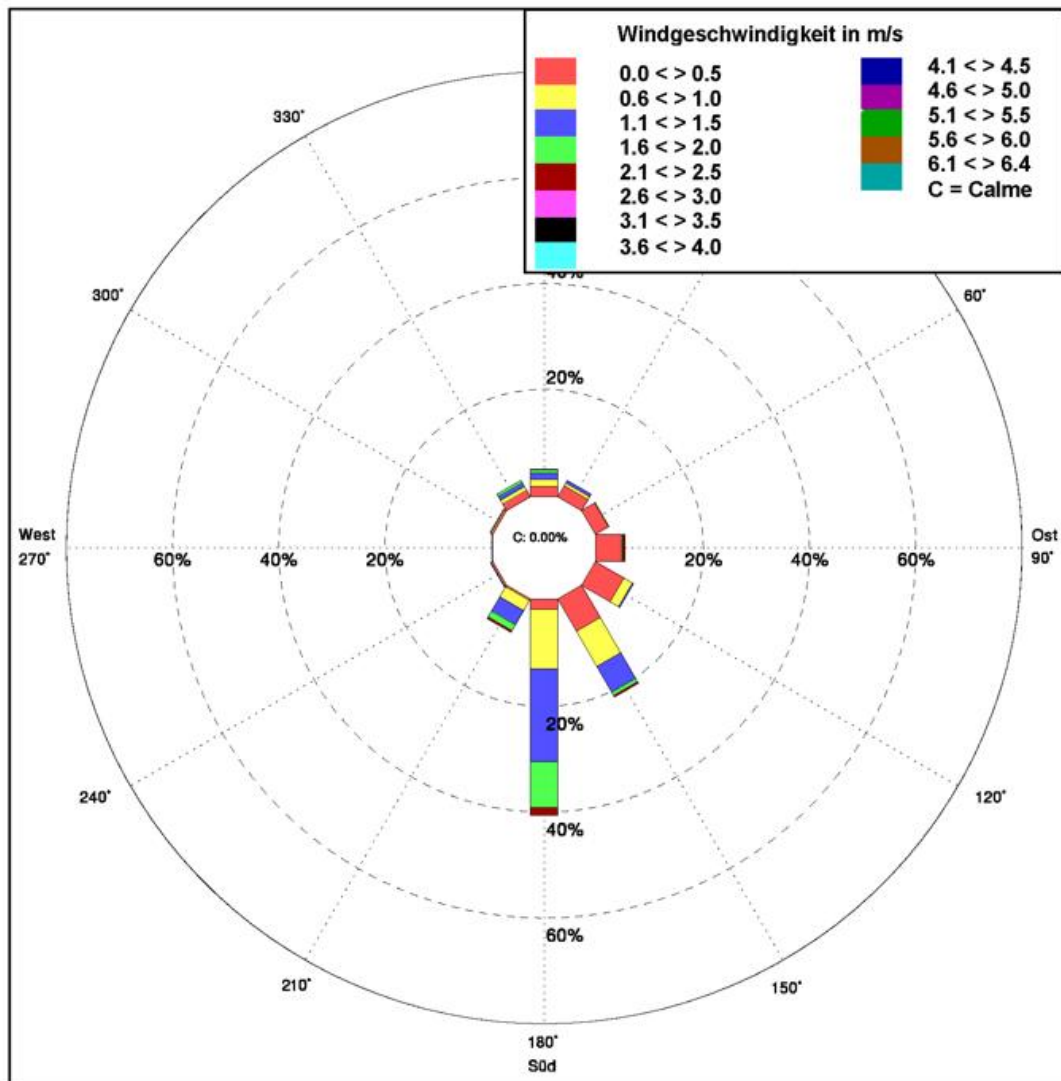


Abbildung 20: Relative Häufigkeit der Windrichtung und -geschwindigkeit für windschwache Strahlungsächte (19:30 - 06:00 Uhr UTC), Station Stadion (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel)

An der Station Saaleaue gewinnen während windschwacher Strahlungsächte die südlichen bis östlichen auf Kosten der westlichen bis südwestlichen und nordöstlichen Richtungen an Dominanz. Das Maximum liegt bei 180°. Es zeigt sich eine recht ausgeglichene Windrose – die Sektoren zwischen dem 270°- und 360°-Sektor sind im Vergleich aber deutlich geringer belegt. Dies resultiert gewiss aus der freien Lage in der Unteren Aue. Am Standort dauert die Umstellung des Tageswindregimes auf das nächtliche untrüglich etwas länger als beispielsweise im Ammerbachtal. Daher werden zum Beginn und Ende einer Strahlungsacht gewiss nördliche Richtungen bedient, die wahrscheinlich vorrangig durch Zuflüsse des Saaletals und Gleistals gespeist werden. Die östlichen Richtungen resultieren vermutlich von Kaltluftabflüssen des Hufeisen-Jenzig. Die Südsektoren werden anscheinend durch einfließende Kaltluft aus dem Saaletal und Laasaner Tal bedient. Von westlichen Hängen und Tälern einfließende Kaltluft wird vermutlich durch die vorgelagerten Stadtgebiete abgebremst.

Am Standort Beutenberg dominiert in Strahlungsächten der Sektor um 210°. Das sekundäre Maximum liegt wie bei der Windrichtungsverteilung des Gesamtzeitraumes um 030°. Am wenigsten wird der Sektor um 300° bedient. Der kanalisierende Einfluss

des Ammerbachtals zeigt sich deutlich. Die Nordkomponente wird gewiss durch Hangabwinde der Lichtenhainer Höhe verursacht.

Es ist davon auszugehen, dass an der Station Sternwarte während windschwacher Strahlungs Nächte Windrichtungen der südlichen bis westlichen Sektoren ($180^{\circ}/210^{\circ}$ bis 330°) dominierend sind. Die an dieser Station auftretenden Windrichtungen werden sehr wahrscheinlich durch Kaltluftflüsse aus dem Mühlthal, dem Mädertal, von der Lichtenhainer Höhe aber auch aus dem Saaletal gespeist. Das primäre Windrichtungsmaximum ist für den 330° -Sektor anzunehmen, das sekundäre für den Sektor um 210° . Minimal bedient werden die Sektoren um 060° bis 150° .

Während windschwacher Strahlungs Nächte war an der Bergstation Griesberg eine Zunahme von höheren Windgeschwindigkeiten v. a. aus den östlichen bis südöstlichen Sektoren zu verzeichnen. Hier sind offenbar die in diesen Nächten vorherrschenden Grundströmungen – in Abhängigkeit der Wetterlage – wirksam. Das primäre Richtungsmaximum liegt bei 150° , das sekundäre bei 090° , das Minimum bei 330° . Deutlich geringer fallen nördliche Windrichtungen aus – besonders um 030° .

5.3.2.3.1 SODAR-Messungen

Am Standort Stadion war zusätzlich ein SODAR-Gerät positioniert. Nachfolgend werden die Ergebnisse der SODAR-Messungen incl. des 10-m-Windmastes (am Standort Stadion) für windschwache Strahlungs Nächte vorgestellt. Hierzu erfolgt vorab die Betrachtung der Ausprägung des Windes am Standort für unterschiedliche Höhen während autochthoner Wetterlagen. Anschließend wird eine lokalklimatische Besonderheit allgemein beschrieben, die schließlich beispielhaft für ausgewählte Wetterlagen erläutert und mit grafischen Darstellungen untermauert wird.

Die Analyse der SODAR-Daten (incl. 10-m-Mast) für den Standort Stadion ergab, dass in ca. 10 m über Grund ein schwach ausgeprägter Wind aus südlichen Richtungen dominiert, wobei das primäre Maximum um 180° liegt, das sekundäre um 330° , das Minimum um 270° . Mit zunehmender Höhe (ca. 50 m über Grund) und zugleich abnehmender Rauigkeit verschiebt sich das primäre Windrichtungsmaximum zunächst in den 150° -Sektor, das sekundäre nach Norden (360°) und das Minimum um 030° bis 060° . Parallel zeichnet sich erwartungsgemäß eine Zunahme der Windgeschwindigkeiten ab. Bei etwa 150 m über Grund verschiebt sich das primäre Richtungsmaximum weiter in den 120° -Sektor, das sekundäre Maximum rückt mehr in den 030° -Sektor und das Minimum liegt zunehmend um 060° – während die westlichen Sektoren einen Zuwachs verzeichnen. Ferner nehmen die Windgeschwindigkeiten im Vergleich zur vorherigen Höhe zu. Diese Trends setzen sich mit zunehmender Tendenz bis etwa 210 m über Grund fort. Mit ansteigender Höhe lässt der kanalisierende Einfluss des Saaletals sukzessive nach. In einer Höhe von 350 m über Grund zeigt sich eine von der Orografie nahezu unbeeinflusste Windverteilung, die derjenigen des Griesberges nahezu identisch ist.

Die Analyse der SODAR-Daten lässt auf die Existenz eines Saaletalwindes (lokales Berg-Talwindsystem) schließen, der sich offenbar bei autochthoner Witterung in schwach ausgeprägter Form im Bodenniveau und etwas stärker ab einer Höhe über dem Dachniveau einstellt.

Am Tage erwärmen sich die windgeschützten Talbereiche und thermisch begünstigten südlichen Seitenhänge im Betrachtungsraum allgemein schneller als die gut durchlüfteten Höhenlagen rings um das Stadtgebiet. Die warme Luft beginnt an den Hängen emporzusteigen. Hangwinde stellen sich ein. Dieser sich im Laufe der Zeit verstärkende Prozess führt am späten Vormittag dazu, dass Luft aus den nördlich der Stadt vorgelagerten tiefer gelegenen Bereichen abgesaugt und talaufwärts transportiert wird. Neben den Hangwinden etablieren sich nun Talwinde: Im Saaletal stellt sich ein leichter

Wind aus nördlichen Richtungen ein, so z. B. auch im Ammerbachtal, der sich zunehmend bis zum späten Nachmittag zu einem Talaufwind stabilisiert.

Das Tageswindregime schwächt sich mit nachlassender Sonneneinstrahlung bzw. Sonnenuntergang ab und kehrt sich nach einer gewissen Übergangszeit um. Es setzt am Abend Ausstrahlung auf bzw. an den das Saaletal umgebenden Anhöhen und Hangbereichen ein. Dabei ragen die höchsten umgebenden Anhöhen offenbar über die gesamte Nacht aus der Kaltluft, die produziert wird, heraus und in eine Inversionsschicht hinein und heben sich dadurch als wärmere Spots ab.

Die in den Höhenlagen bzw. an den Hängen produzierte Kaltluft fließt zu Beginn der Strahlungsnacht der Geländeneigung folgend in die Talbereiche. Hangabwinde stellen sich ein. Zusätzlich wird das Saaletal durch die in den Seitentälern entstehende und dem weiteren Talverlauf folgende Kaltluft gespeist. Dieser talabwärts gerichtete nächtliche Strom (Saaletalabwind) setzt sich bis in größere Höhen fort. Zugleich steigt die Windgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe, abnehmendem Orografieeffekt und nachlassender Umgebungsausstrahlung. Dabei ist davon auszugehen, dass sich das nächtliche Windsystem (Hang- und Talabwinde) in den im Vergleich zum Saaletal kleinen, engen Seitentälern wegen unterschiedlicher Abschattungseffekte, Reliefenergie und Raumvolumina zeitlich eher einstellt. In Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung verschiebt sich das Einsetzen von Talauf- und -abwinden im Saaletal zeitlich etwas.

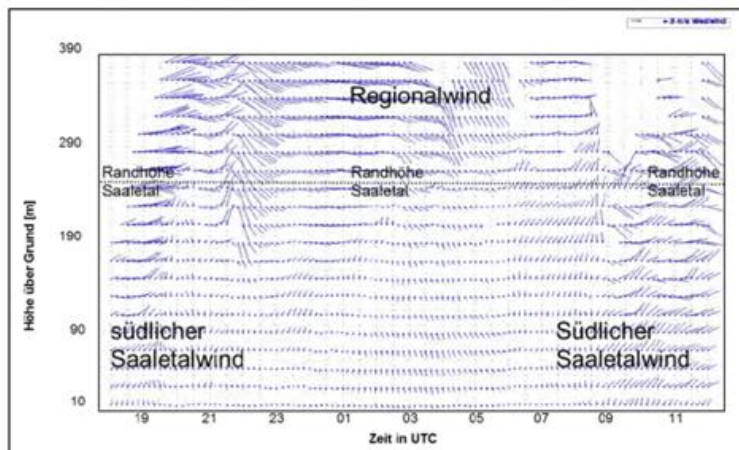


Abbildung 21: Sodargramm der Windvektoren für den Standort Jena Stadion, vom 07.05. bis 08.05.2011 (Basis: 10-Minuten-Mittel des Windvektors für ausgewählte Höhen über Grund in m)

Während der ersten autochthonen Wetterlage innerhalb des Messzeitraumes (mit niederschlagsfreien, sonnigen Bedingungen, Maximumtemperaturen um 25 °C und Temperaturamplituden um 15 K) ist die Übergangszeit des Tages- auf das nächtliche Windregime etwa zwischen 19 und 22 Uhr UTC einzuordnen (Abbildung 21). Zuvor (bis etwa 19 Uhr UTC) herrschte ein

talaufwärts gerichteter nördlicher Wind mit einer Geschwindigkeit < 3 m/s im Bodenniveau und über dem Dachniveau. In größeren Höhen über Grund (geringere Rauigkeit) waren teils mehr als 9 m/s zu verzeichnen. Im Verlauf der ersten Nachhälfte kam dieser Wind aus nördlichen Richtungen hinsichtlich seiner Geschwindigkeit allmählich zum Erliegen, teils drehte der Wind (indifferente Richtungen). In der zweiten Nachthälfte, etwa gegen 2 Uhr UTC hatte sich die Drehung des Windes auf Süd bis Südost (Talabwind) bei insgesamt abgeschwächten Geschwindigkeiten bis in größere Höhen über Grund vollzogen und hielt etwa bis 5 Uhr UTC an. Danach begann sich eine erneute Drehung auf nördliche Richtungen zu vollziehen, mit anfangs teils indifferenten Richtungen. Im weiteren Tagesverlauf stabilisierte sich dieser aus nördlichen Richtungen wehende Wind (z. T. Windgeschwindigkeiten > 3 m/s im Dachniveau während der Mittagsstunden).

Generell zeigte sich der talabwärts gerichtete Saaletalwind meist während der zweiten Nachthälfte und erst ab mehreren Dekametern über Grund (ca. über dem Dachniveau) besser hinsichtlich Windrichtung und -geschwindigkeit ausgeprägt. In Bodennähe bis etwa 20 m über Grund erreichten die Windgeschwindigkeiten Werte $< 2,6$ m/s. Dies

änderte sich jedoch mit zunehmender Höhe. Ab 8 bzw. 9 Uhr UTC, teilweise auch eher, begann sich das nächtliche System auf das oben beschriebene Tagesregime umzustellen. Dabei sanken die Windgeschwindigkeiten kurzzeitig z. T. merklich bis in Höhen um ca. 150 m oder darüber hinaus. Teils wurden temporär indifferente Windrichtungen erfasst,

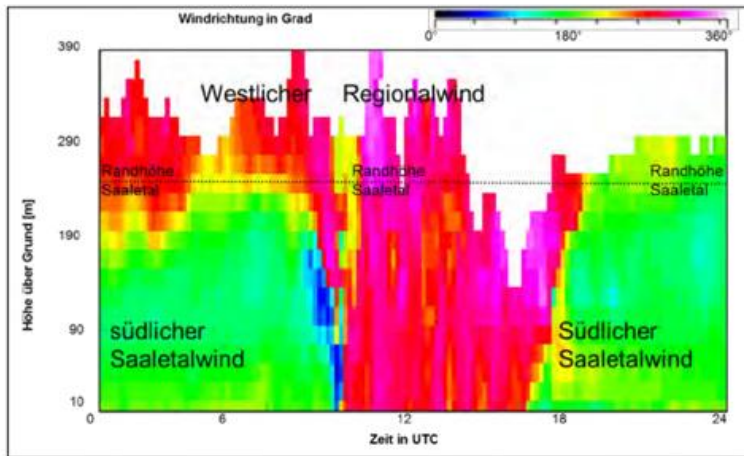


Abbildung 22: Sodargramm der Windrichtung für den Standort Jena Stadion, vom 23.09.2011 (Basis: 10-Minuten-Mittel des Windvektors für ausgewählte Höhen über Grund in m)

größeren Höhen, losgelöst von der Orografie, mehr aus den für Thüringen typischen südwestlichen bis westlichen Richtungen wehte. Im Vergleich zu der autochthonen Wetterlage im Mai dauerte der nächtliche Saaletalwind im September bis 9 Uhr UTC und

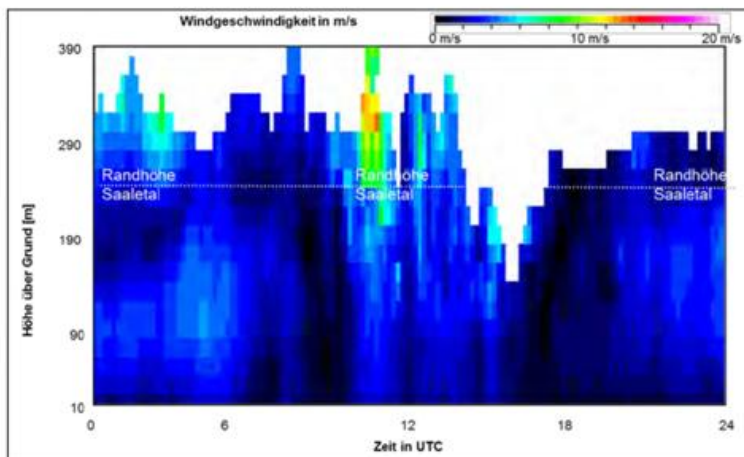


Abbildung 23: Sodargramm der Windgeschwindigkeit für den Standort Jena Stadion, vom 23.09.2011 (Basis: 10-Minuten-Mittel des Windvektors für ausgewählte Höhen über Grund in m)

sich der nächtliche Saaletalwind insgesamt etwas klarer (höhere Windgeschwindigkeiten, zeitlich schnellere Umstellung der Windrichtungen) ein als im Mai. Ab Höhen zwischen etwa 150 bis 210 m über Grund ließ der kanalisierende Effekt des Saaletals bereits deutlich nach und ein abgekoppeltes Windsystem (regionaler Höhenwind) dominierte.

Vergleichsweise besser ausgeprägt zeigte sich der Saaletalwind außerhalb des offiziellen Messzeitraumes, während einer Wetterlage mit sehr guten strahlungs-nächtlichen Bedingungen. Zur Unterstützung der bisherigen Aussagen und der Untermauerung der Beweiskraft sind nachfolgend die Daten für den 03. Oktober 2011 ausgewertet worden.

bis sich schließlich mit einem weiteren Strahlungstag ein aus nördlichen Richtungen wehender Talaufwind mit Geschwindigkeiten um 3 m/s und mehr ab einer Höhe von 10 m über Grund eingestellt hatte. Während der Nachtstunden war im Tal ein eigenbürtiger Wind zu erkennen. Am Standort Stadion wurden bis in Höhen um 160 bis 230 m über Grund südliche Windrichtungen registriert, während der Wind in teilweise sogar bis etwa 11 Uhr UTC an, stellte sich dann bis etwa 13 Uhr UTC auf nordwestliche Richtungen um und flaute etwa zwischen 16 und 17 Uhr UTC ab (Abbildung 22 und Abbildung 23).

I. d. R. war die Umstellung auf den talabwärts gerichteten Wind

bereits zwischen etwa 18 und 19 Uhr UTC vollzogen. Während der autochthonen Witterung im Herbst stellte

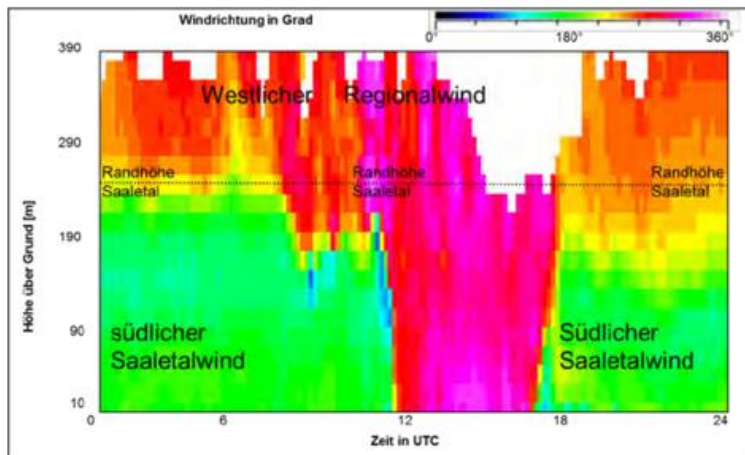


Abbildung 24: Sodargramm der Windrichtung für den Standort Jena Stadion, vom 03.10.2011 (Basis 10-Minuten-Mittel des Windvektors für ausgewählte Höhen über Grund in m)

Region determiniert, für den Raum Thüringen typische südwestliche bis westliche Richtungskomponenten erfasst. In den Frühstunden des 03. Oktober 2011 war der Südwind im Saaletal sehr gut ausgeprägt (Sonnenaufgang ca. 05:17 Uhr UTC). Gegen etwa 11 Uhr UTC (Sonnenhöchststand ca. 11:03 Uhr UTC) war die Umstellung auf das Tagesregime (Wind aus nördlichen Richtungen) zu verzeichnen, das bis in die späten Nachmittagsstunden anhielt und sich ca. 16:30 Uhr UTC wieder umzustellen begann (Sonnenuntergang ca. 16:49 Uhr UTC).

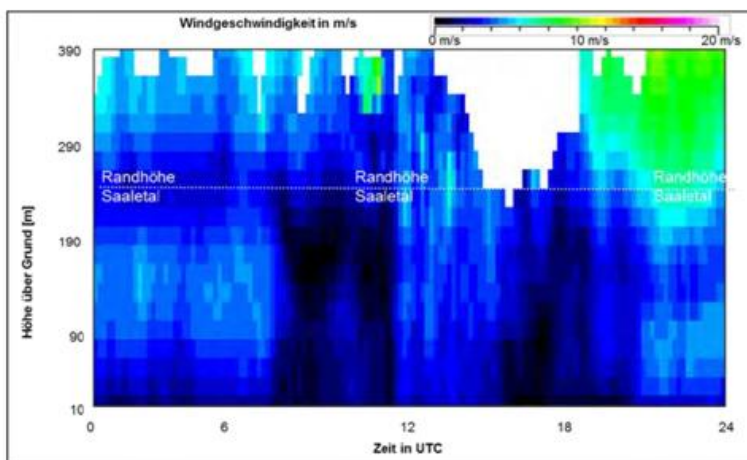


Abbildung 25: Sodargramm der Windgeschwindigkeit für den Standort Jena Stadion, vom 03.10.2011 (Basis: 10-Minuten-Mittel des Windvektors für ausgewählte Höhen über Grund in m)

eine allochthone Witterung Anfang Juni 2011 dargestellt, während der sich das übergeordnete regionale Windsystem aus nördlichen Richtungen bis auf den Talgrund durchsetzte und sich kein lokales, thermisch induziertes Zirkulationssystem (Berg- und Talwind) ausbilden konnte.

Aus Abbildung 24 geht hervor, dass in den Nachtstunden im Saaletal ein von der großräumigen Strömung losgelöster Wind (Saaletalwind) aus südlichen Richtungen am Standort Stadion registriert wurde (Höhen: 10 m bis ca. 230 m über Grund). In Höhen über ca. 230 m über Grund wurden gemäß der großräumigen Luftdruckverteilung, die die mittlere Richtung des Höhenwindes einer

Abbildung 25 bestätigt, dass in Bodennähe schwachwindige Bedingungen am Standort Stadion vorherrschten. Während der Zeitfenster, in denen sich die Windrichtungsumstellung vollzog, zeichnete sich ein leichtes Abflauen der Windgeschwindigkeit bis in größere Höhen ab.

Zum Vergleich wird nachfolgend exemplarisch die Situation am Standort Stadion für

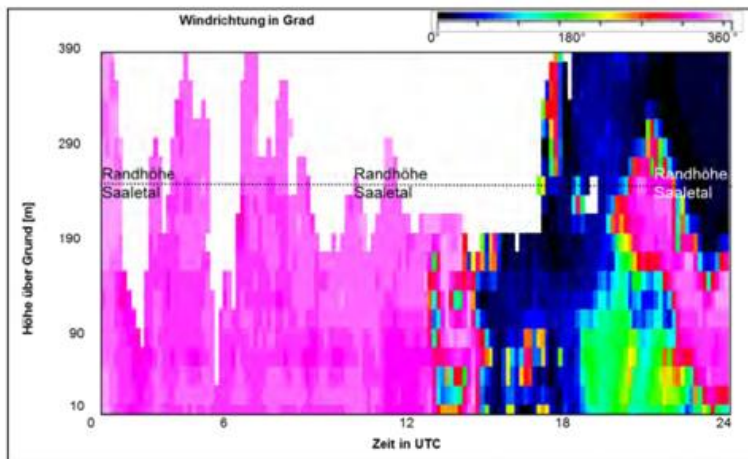


Abbildung 26: Sodargramm der Windrichtung für den Standort Jena Stadion, vom 01.06.2011 (Basis 10-Minuten-Mittel des Windvektors für ausgewählte Höhen über Grund in m)

Morgenstunden bis in den Nachmittag hinein wehte der Wind aus nördlichen bis nordnordwestlichen Richtungen am Stationsstandort Jena Stadion, der sich aus der Höhe bis auf den Talgrund durchsetzte (Abbildung 26).

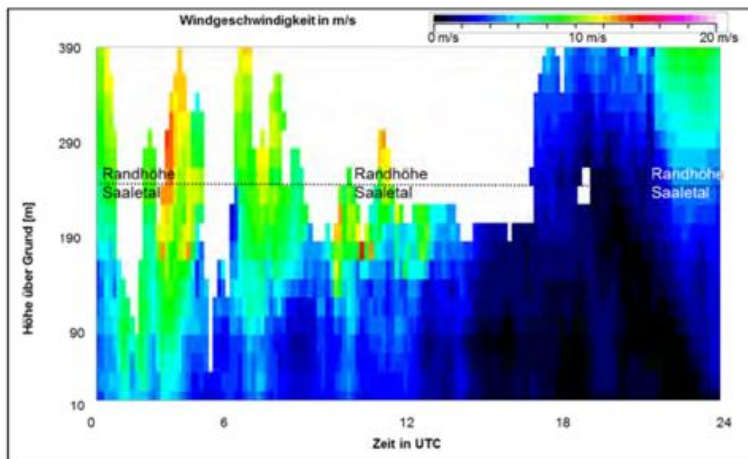


Abbildung 27: Sodargramm der Windgeschwindigkeit für den Standort Jena Stadion, vom 02.06.2011 (Basis: 10-Minuten-Mittel des Windvektors für ausgewählte Höhen über Grund in m)

Höhenwind aus nördlichen Richtungen erneut auf den Talgrund durchzusetzen. Dabei waren die Windgeschwindigkeiten in Bodennähe generell gering – ungeachtet der Frühstunden (Abbildung 27).

Zusammenfassend ist zu konstatieren, dass am Standort Stadion die Windgeschwindigkeiten in Bodennähe nicht nur während autochthoner Wetterlagen gering waren, sondern auch während des übrigen Messzeitraumes stets relativ niedrig ausfielen. Dies unterstützt die Annahme, dass die Windgeschwindigkeiten innerhalb des Saaletals allgemein vergleichsweise gering sind.

Das Phänomen eines Saaletalwindes zeigte sich innerhalb des Messzeitraums in relativ schwach ausgeprägter Form – v. a. hinsichtlich der Windgeschwindigkeit – in den Nachtstunden während autochthoner Witterung. Im Bodenniveau wird dieser nächtliche Talabwind – ähnlich wie am Standort Stadion – wegen der erhöhten Rauigkeit im Stadtgebiet vermutlich nur äußerst schwach in Erscheinung treten. Über dem Dachniveau wird er hingegen etwas höhere Geschwindigkeiten erreichen.

Der 01. Juni 2011 fiel an der Station Jena/Sternwarte mit Bewölkung und leichtem Niederschlag in den Morgenstunden aus. Die Windgeschwindigkeit, morgens leicht erhöht, flaute im Tagesverlauf merklich nach und nach ab. Die Lufttemperatur erreichte am Tage nur Höchstwerte zwischen 12 und 15 °C, sank nachts auf 11 °C ab – stellenweise auch unter 10 °C. Von den frühen

Nachmittags bis in den Nachmittag hinein wehte der Wind aus nördlichen bis nordnordwestlichen Richtungen am Stationsstandort Jena Stadion, der sich aus der Höhe bis auf den Talgrund durchsetzte (Abbildung 26). Am Nachmittag erfolgte eine leichte Drehung auf Nord bzw. Nordnordost, wobei sich der Höhenwind weiterhin bis auf den Talgrund durchsetzte. Lediglich während der ersten Nachthälfte erfolgte kurzzeitig eine Abkopplung vom Höhenwind auf südliche Richtungen in einem Bereich von ca. 10 bis etwa 100 m über Grund. Anschließend begann sich der

5.3.3 Analyse der thermischen Profilmessfahrten

Die Profilmessfahrten erfolgten durch ein relativ stark strukturiertes Gelände, das sich zwischen ca. 136 und 394 m NN erhebt (Höhendifferenz: 258 m). Es wurden fünf Profilmessfahrten (jeweils Nord- und Südstrecke) im Zeitraum vom 05. bis 07. Mai 2011 sowie drei weitere vom 22. bis 23. August 2011 durchgeführt, wobei der Fokus nachfolgend exemplarisch auf den Maifahrten liegt (vgl. Kapitel 3.3).

Die Wetterlage zu den Profilmessfahrten wurde bereits unter Kapitel 5.3.1 beschrieben. Die angetroffenen Wettersituationen entsprachen bei allen Fahrten – mit kleinen Einschränkungen – recht gut den Idealbedingungen einer autochthonen Wetterlage, so dass lokalklimatische Effekte in ausreichender Form in Erscheinung treten konnten. Es bleibt zu berücksichtigen, dass während der Messungen keine völlige Windstille herrschte, so dass auch in bodennahen Schichten eine gewisse Luftbewegung in beschränktem Maße sehr wahrscheinlich für einen horizontalen Transport von Luftpaketen in eine ursprünglich wärmere bzw. kältere Umgebung sorgte. Dies erklärt, weshalb die aufgenommenen horizontalen Messprofile unter sonst annähernd gleichen Bedingungen nicht immer exakt gleichgerichtet sind. Einzelne Peaks der verschiedenen Messungen sind daher nicht immer genau demselben Ort zuzuordnen. Sie können in Grenzen verschoben sein.

Die Messfahrten begannen i. d. R. kurz nach Sonnenuntergang (ca. 18:45 Uhr UTC), vor Sonnenaufgang (ca. 03:35 Uhr UTC) und nach dem Sonnenhöchststand (ca. 11:10 Uhr UTC) vgl. Kapitel 3.3.

Die Fahrten fanden also zu Zeiten statt, an denen sich lokalklimatische Effekte allgemein herauszubilden beginnen oder am stärksten ausgeprägt sind.

Da die Messfahrten relativ früh im Mai nach einer ersten wärmeren Phase (zuvor trat örtlich Bodenfrost auf) durchgeführt wurden, hält sich die innerstädtische Erwärmung im Vergleich zum Umland sicherlich noch in Grenzen.

Allein durch die Höhenunterschiede entlang der Profilmessfahrten treten die Einflüsse der Topografie und Orographie merklich hervor (Abbildung 28). Der Startpunkt der Südroute am Griesberg hebt sich zum

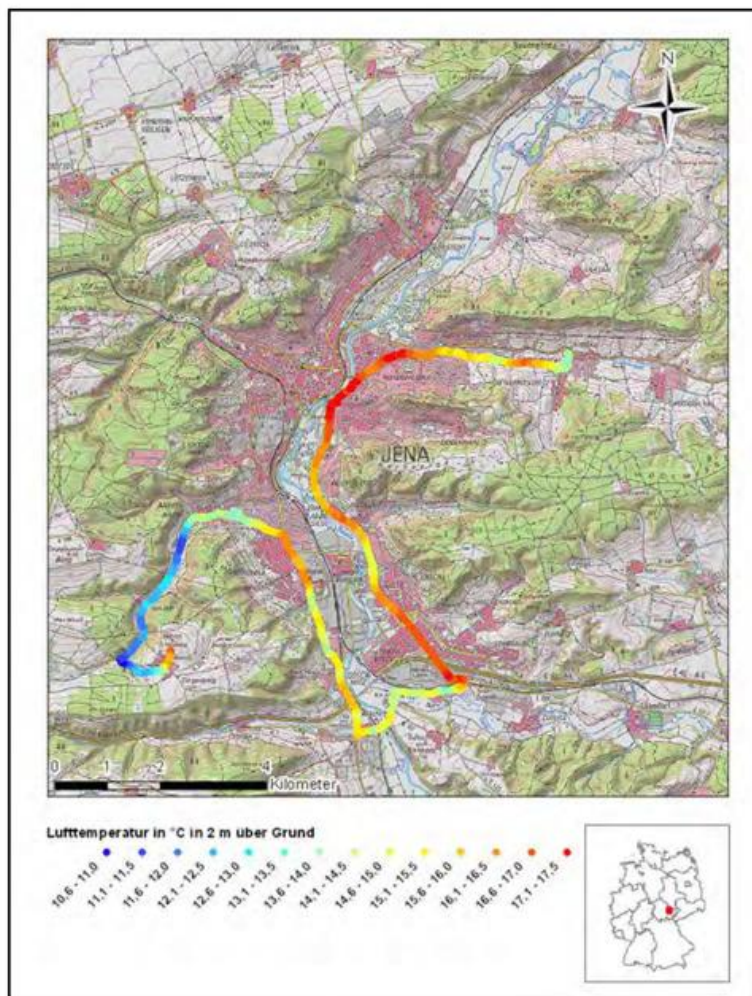


Abbildung 28: Profilmessfahrt, 06.05.2011, abends Süd von 18:57 bis 19:50 Uhr UTC (TK 1:50 000, © GeoBasisDE / TL VermGeo)

Zeitpunkt der ersten Abendfahrt mit über 16 °C als recht warmer, vergleichsweise trockener „Hotspot“ von seiner Umgebung ab (Abbildung 28). Entlang der Route in Richtung Nennsdorf fällt das Gelände kontinuierlich ab und damit die Lufttemperatur auf unter 11 °C. Die Südroute ist in diesem Bereich beiderseits der Straße von Wald bestanden. Bei Nennsdorf folgen wenige bebaute Einheiten. Der folgende Abschnitt führt weiter mitten durch das Ammerbachtal in Richtung des Jenaer Stadtgebietes. Östlich verläuft der Ammerbach entlang der Strecke, die nun beiderseits der Straße durch ca. 100 bis 250 m breite Flureinheiten mit Grünlandnutzung (Weide) begrenzt wird, an die sich wiederum an den Hängen Waldflächen schließen. Der bisherige Routenabschnitt – ausgenommen der Griesberg mit der Ortschaft Oßmaritz – hebt sich im Vergleich zur restlichen Strecke als besonders kühle Zone ab: Es handelt sich bei diesem Abschnitt zwischen ca. 1 und 6 km vom Start um ein von Südsüdwest nach Nordnordost gerichtetes, relativ stark geneigtes, enges, bewaldetes Tal. Die umgebenden Anhöhen minimieren hier tagsüber den maximal möglichen Einfall von Sonnenstrahlen. In den Waldzonen und auf den Freiflächen im Ammerbachtal kann der Kaltluftbildungsprozess bei einer autochthonen Wetterlage entsprechend früher einsetzen als beispielsweise an einem Standort wie Maua, der Unteren Aue oder an einem der Südwest-/ Südhänge der umgebenden Anhöhen wie z. B. dem Jenzig. Der Eintrag anthropogen verursachter sensibler Wärme ist entlang der ersten Kilometer der Südroute vernachlässigbar klein.

Etwa auf Höhe von Ammerbach steigt in der Umgebung der – im Vergleich zu Nennsdorf – etwas dichter bebauten Areale die Temperatur leicht an. Mit Eintreffen in zunehmend stärker bebauten Gebiet zwischen der Winzerlaer und Rudolstädter Straße setzt sich dieser Temperaturanstieg weiter fort. Zwischen Winzerla und Göschwitz – entlang von begrünten, weniger stark bebauten Bereichen (z. B. westlich der Rudolstädter Straße zwischen Triefnitz und Göschwitz) – sind je nach Art und Maß umgebender Bebauung, Begrünung, orographisch bedingten Abschattungseffekten und vorhandenen Talausgängen einige kleinere Temperatureinbrüche zu verzeichnen. Selbst südlich der Autobahnbrücke (BAB 4) bis Maua erreichte die Temperatur Werte über 15 °C. Mögliche Kaltluftflüsse, die aus dem westlich der Profilstrecke gelegenen Leutratal zur Saale einfließen können, hatten sich zum Zeitpunkt des Passierens offenbar noch nicht eingestellt und den genannten Abschnitt noch nicht immanent abgekühlt. Erst mit Überqueren der Saale bis nach Rutha (z. T. Grün- und Ackerflächen mit geringer Rauigkeit entlang der Strecke) fällt die Temperatur deutlich auf unter 14 °C ab. Mit erneutem Eintritt in etwas stärker bebauten Areale (Gewerbegebiet Lobeda Süd, Wohnbereiche um Lobeda Ost und West) steigt die Umgebungstemperatur wieder deutlich an. Im Bereich des Ausgangs des Pennickentals fällt sie jedoch erneut ab. In diesem Abschnitt beträgt der Abstand von der Route zur Saale teils nur knapp 100 m und die Bebauungsdichte ist verhältnismäßig gering. Westlich der Saale befinden sich einige großzügige Grünflächen. Mit abnehmender Bebauungsdichte in Richtung Wogau sind erwartungsgemäß geringere Lufttemperaturen zu verzeichnen. Die Werte erreichen hier nur noch um 13 °C.

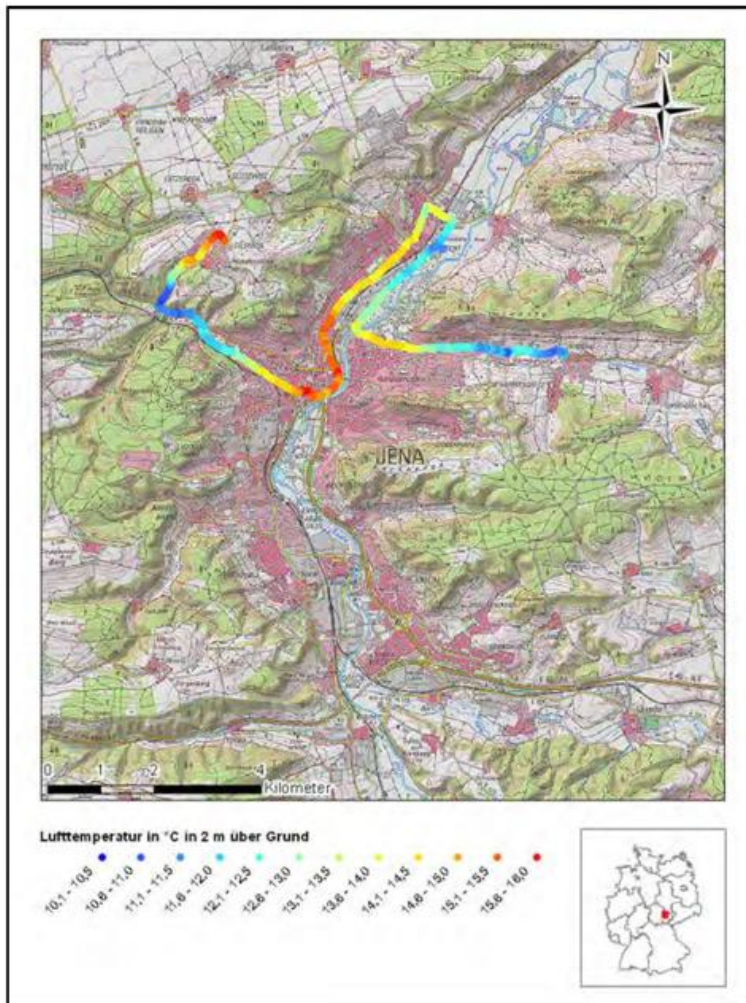


Abbildung 29: Profilmessfahrt, 06.05.2011, abends Nord von 19:53 bis 20:39 Uhr UTC (TK 1:50 000, © GeoBasisDE / TL VermGeo)

Die Nordstrecke der ersten Abendfahrt begann in Wogau (Abbildung 29). Da die Nordfahrt im Vergleich zur Südfahrt um ca. 1 h verzögert begann, ist davon auszugehen, dass der gesamte Streckenabschnitt bereits relativ „kühler“ ausfällt als der südliche. Darauf deutet auch ein herabgesetztes Mittel der Lufttemperatur der Nordstrecke von rund 12,1 °C hin (Südstrecke: 13,7 °C). Die Profilstrecke Nord führt bei abfallendem Gelände entlang des Gembdentals von Ost nach West in Richtung Jenaer Stadtgebiet. Vom Startpunkt bis etwa zur Messstation Gembdental fällt die Lufttemperatur teils auf unter 11 °C ab. Dieser erste Streckenabschnitt ist gekennzeichnet durch freie Grünflächen, abgesehen von etwas Straßenbegleitgrün und geringen

Umgebungsrauigkeiten beiderseits der Straße. Bis etwa auf Höhe des Ortseingangs der Stadt Jena und noch einige hundert Meter darüber hinaus sind Werte bis knapp 12 °C auszumachen. Der Einfluss auf die Temperatur der noch vergleichsweise offenen, lockeren Bebauung hält sich hier offenbar in Grenzen. Er gewinnt erst weiter westlich – in dichter bebautem Umfeld – an Stärke. Entlang der Wiesenstraße ändert sich dies jedoch, sobald östlich der Straße die bebauten Areale in grüne Auenflächen entlang der Saale übergehen. Am Messstandort Saaleaue wird wie beim Messpunkt Gembdental ein vergleichsweise geringer Temperaturwert erreicht. Im Bereich der Saaleaue fällt die Temperatur auf unter 11 °C. Mit zunehmender Bebauungsdichte steigt die Lufttemperatur erneut nach und nach und kulminiert etwas südlich der Camsdorfer Brücke mit knapp über 14 °C. Im weiteren Verlauf entlang des Bahndammes und der Straße Am Eisenbahndamm fällt die Temperatur nahezu kontinuierlich von der Camsdorfer Brücke bis kurz vor dem Bahnhof Jena Paradies (Straßenkreuzung Am Volksbad - Knebelstraße) auf knapp 13 °C ab. Bis zum Ernst-Haeckel-Platz ist noch einmal ein leichter Anstieg zu verzeichnen. Werte knapp über 15 °C sind im historischen Zentrum zu verzeichnen. Im weiteren Streckenverlauf fällt die Temperatur kontinuierlich. Mit zunehmendem Geländeanstieg und abnehmender Bebauungsdichte (1,1 km nordwestlich vom Ernst-Haeckel-Platz) sinkt die Temperatur auf dem westlichen Abschnitt der Luther Straße schließlich unter die Marke von 13 °C. Zwischen Erfurter und Jenaer Straße sind gar Werte um knapp über 10 °C auszumachen. In dieser zunehmend locker bebauten Umgebung macht sich scheinbar der Einfluss des Mühltales bemerkbar. Auf dem letzten

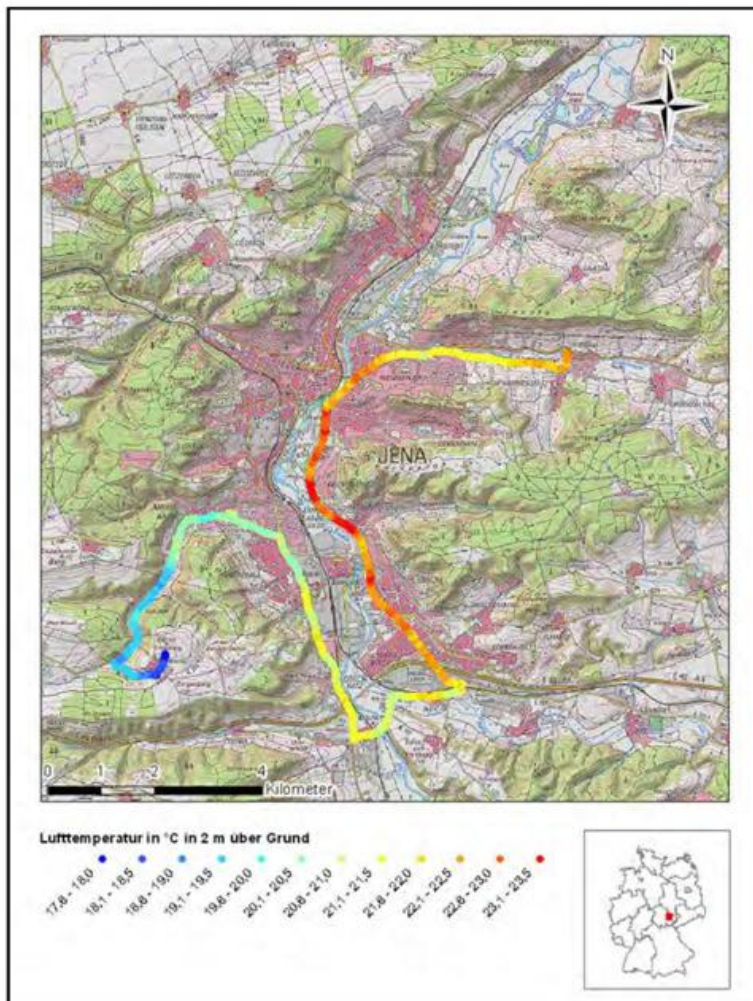


Abbildung 30: Profilmessfahrt, 06.05.2011, mittags Süd von 12:10 bis 13:05 Uhr UTC (TK 1:50 000, © GeoBasisDE / TL VermGeo)

Abschnitt steigt die Temperatur letztlich sukzessive bis zum Zentrum des Ortes Cospeda auf ein erneutes Maximum um 15 °C. Dieser Bereich hebt sich ebenso wie die stark überbauten Jenaer Innenstadtbereiche als warmer Hotspot im Vergleich zum kälteren Umland in tiefer gelegenen Bereichen ab.

Tagsüber gestaltete sich die Situation etwas anders:

Die Hochflächen sind offenbar gut durchlüftet und heben sich u. a. deshalb als kühlere Bereiche ab (Griesberg, Cospeda). Aus Abbildung 30 und Abbildung 31 wird deutlich, dass schattige Talbereiche geringere Lufttemperaturwerte aufweisen als ihre Umgebung. Die bebauten Areale

stechen hingegen als deutlich erwärmte Bereiche hervor, insbesondere die Jenaer Innenstadt. In den Seitentälern beeinträchtigen die Hänge den Sonneneinfall. Natürliche und künstliche Oberflächen tragen zu unterschiedlichen Austausch- und Erwärmungsbedingungen bei. Bereiche, die durch natürliche Oberflächen (z. B. Wald, Wiese, Wasser) geprägt sind, zeichnen sich daher durch geringe Lufttemperaturwerte aus (Ammerbachtal, Mühlthal, Auen), als Bereiche, die durch künstliche Oberflächen charakterisiert sind. Erstere können sich nicht im selben Maß erwärmen wie bebauten Innenstadtfächen. In der Innenstadt sind allerdings auch Abschattungseffekte von Gebäuden zu berücksichtigen. Dieser Einfluss scheint jedoch in Bezug auf die Temperaturentwicklung entlang der Route nicht sehr ausgeprägt zu sein, da sich die Stadtareale auf Grund ihrer physikalisch-thermischen Eigenschaften gut erwärmt zeigten.

In den Mittagsstunden ist der Stadteffekt mit ca. 1 bis 2 K insgesamt schwächer ausgeprägt als beispielsweise während der Abendstunden (Innenstadt war um 2 bis 4 K wärmer als ihr unbebautes, etwa gleich hoch gelegenes Umland). Die Süd- und Nordstrecke wurden nacheinander abgefahren. Sehr wahrscheinlich ist aus diesem Grund die Erwärmung auf der gesamten Nordstrecke im Vergleich zur Südstrecke während der Mittagszeit etwas weiter vorangeschritten. Dies deutet sich in einer um 0,84 K höheren Mitteltemperatur für die Nordstrecke an.

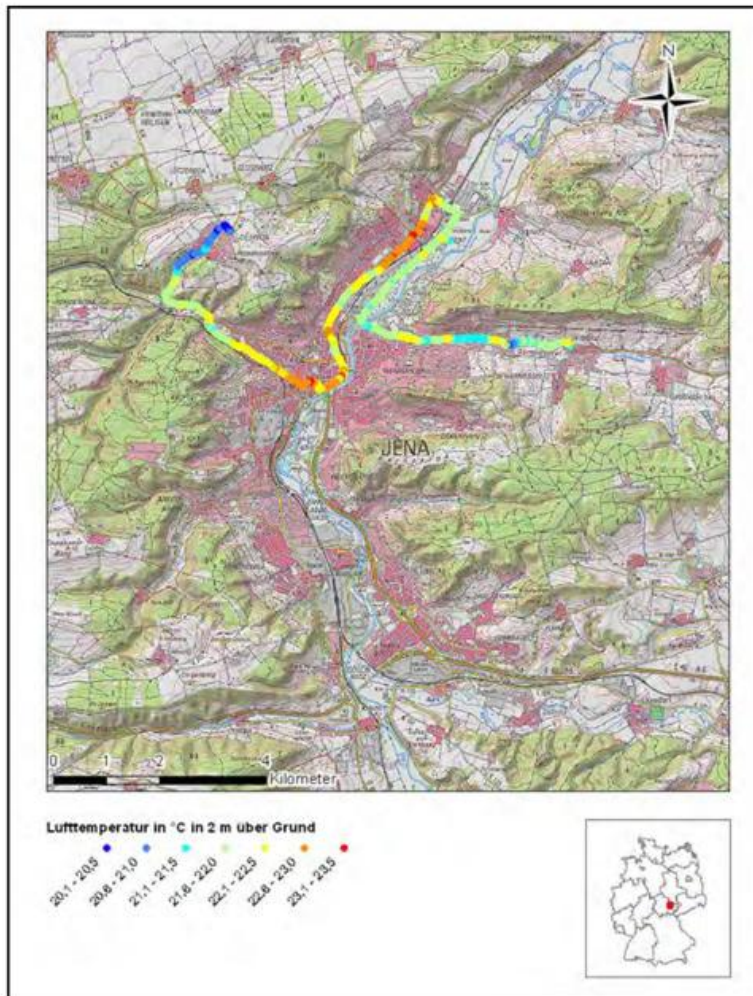


Abbildung 31: Profilmessfahrt, 06.05.2011, mittags Nord von 13:22 bis 14:15 Uhr UTC (TK 1:50 000, © GeoBasisDE / TL VermGeo)

In den Frühstunden gestaltet sich die Situation folgendermaßen:

Der Griesberg und die Plateaufläche um Cospeda heben sich wie zu Beginn auch am Ende der Strahlungsnacht als Bereiche mit etwas höheren Lufttemperaturen ab (Abbildung 32 und Abbildung 33).

Insgesamt lässt sich im Untersuchungsgebiet in der zweiten Nachthälfte gegenüber der ersten eine relativ gute „Abkühlung“ ausmachen.

Über die Andauer der Strahlungsnacht hat sich offenbar auf den unbebauten Grünflächen entlang der Saale Kaltluft gebildet und ausgebreitet, wie es entlang der Südroute streckenweise nördlich und südlich des Ausgangs des Pennickentals Abbildung 32 zu entnehmen ist. Zudem ist mit großer Wahrscheinlichkeit Kaltluft aus den östlichen Seitentälern (z. B. Wöllnitz) und deren Hangbereichen (z. B. Johannisberg, Ziegenberg) sowie aus südlicher Richtung kommend vom Saaletal entlang von Flächenzügen mit geringer Rauigkeit in Richtung Stadtgebiet eingeflossen. Lediglich die stärker bebauten Bereiche um Lobeda-Ost und Lobeda-West sowie der Westteil von Wenigenjena (Friedrich-Engels-Straße und Karl-Liebkecht-Straße) heben sich auf der Südstrecke in den geringeren Höhenlagen noch als Bereiche mit etwas höheren Lufttemperaturwerten ab (um 8 °C). Etwa auf Höhe des Standortes der mobilen Wetterstation im Gembdental sind im Vergleich beispielsweise nur knapp 3 – 4 °C zu verzeichnen. Auf der Nordstrecke

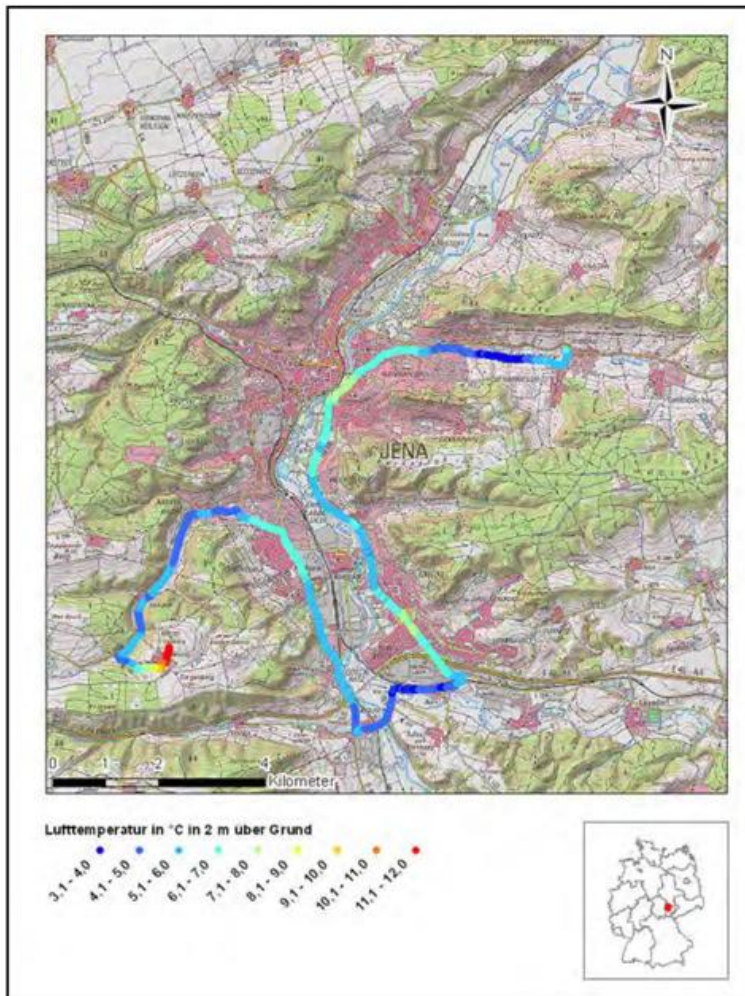


Abbildung 32: Profilmessfahrt, 07.05.2011, früh Süd von 01:31 bis 02:19 Uhr UTC (TK 1:50 000, © GeoBasisDE / TL VermGeo)

hebt sich besonders die Innenstadt mit Temperaturwerten zwischen etwa 7 und 9 °C hervor – im Vergleich zum umgebenden, etwa gleich hoch gelegenen Umland mit teils unter 3 °C (Bereich um den Messstandort Gembdental).

In den Frühstunden zeigt sich offenbar u. a. der Einfluss des Gembdentals auf der Nordstrecke als wichtiger Lieferant von Kaltluft für den Stadtteil Wenigenjena. Der gesamte Streckenabschnitt im Einzugsbereich des Talausganges des Gembdentals scheint relativ gut durch die während der ersten und zweiten Nachthälfte eingeflossene Kaltluft abgekühlt worden zu sein – entlang der Eisenberger Straße, Karl-Liebknecht-Straße bis zum

Jenzigweg. Nur ein sehr kurzer Abschnitt stellt sich als noch warmer Innenstadtbereich dar. Merklich abgekühlt sind auch die nördlichen Auenflächen nahe dem Stationsstandort Saaleaue. Westlich der Saale, ab der Camburger Straße bis in die Lutherstraße, hebt sich der Innenstadtbereich mit vergleichsweise höheren Lufttemperaturwerten ab. Der Einfluss des Mühlals als Kaltluftschneise reicht in Bodennähe offenbar nur knapp 2 km in das Stadtgebiet hinein. Mit weiterem Eintritt von Kaltluft aus dem Mühlal in Richtung Stadtzentrum wird letztere sehr wahrscheinlich generell zunehmend durch die Altstadtbebauung gebremst und durch die Abwärme der Gebäude erwärmt. Abkühlungseffekte halten sich somit auch zunehmend (in Richtung Saale) in Grenzen.

In der zweiten Nachthälfte ragen die das Stadtgebiet umgebenden Anhöhen offenbar aus der Kaltluft, die sich im Saaletal und dessen Seitentälern gebildet und angesammelt hat, heraus (vgl. Anlage 1, Kapitel 12.5.1, Abbildung 45, Abbildung 46) und in eine Inversionsschicht hinein (Griesberg, Cospeda). Die Anhöhen können während schwachwindiger Strahlungsnächte gegenüber dem tiefer gelegenen, unbebauten Umland z. T. wärmere Hotspots als die zentrale Innenstadt darstellen.

Generell zeigte sich: Tagsüber waren die höher gelegenen Bereiche gut durchlüftet und daher eher „kälter“ als ihre Umgebung. Die Innenstadt war im Vergleich zum unbebauten Umland etwas „stärker erwärmt“. Während der Nachtstunden bildete sich offenbar eine Inversionsschicht im Betrachtungsraum aus, in die Hochflächen und Kuppen hineinragten und sich daher als „warme“ Hotspots abhoben. Kaltluft, die sich an den Hangbereichen

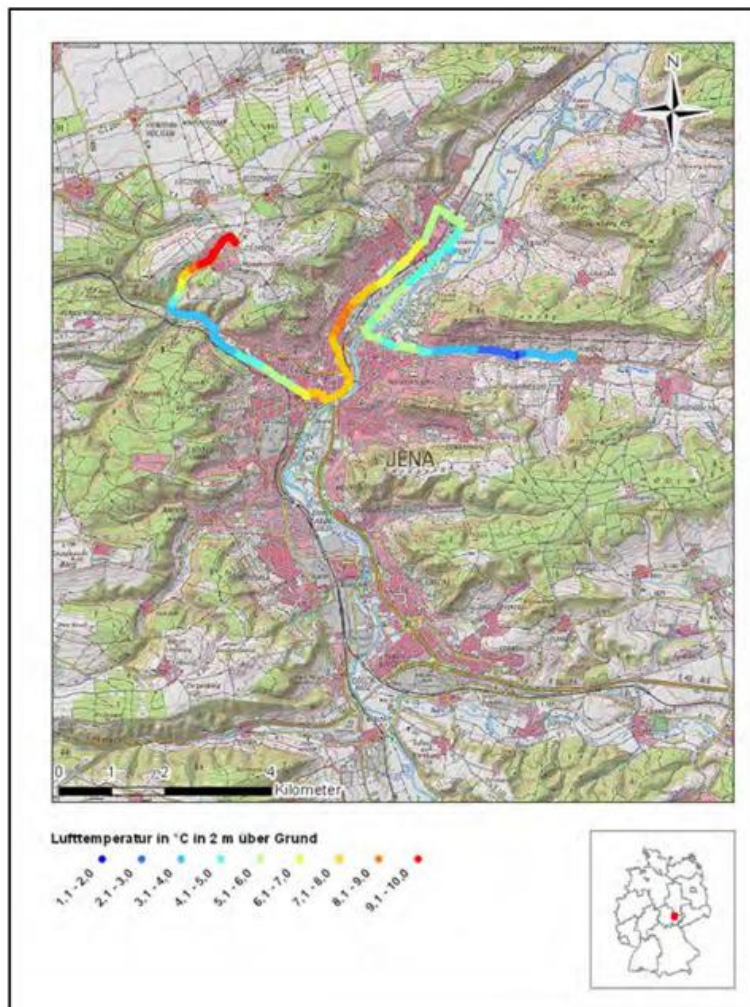


Abbildung 33: Profilmessfahrt, 07.05.2011, früh Nord von 02:22 bis 03:04 Uhr UTC (TK 1:50 000, © GeoBasisDE / TL VermGeo)

bedingte Unterschiede in der Ausprägung des Lokalklimas im Untersuchungsraum schließen. Warme und kalte Spots lassen sich gut anhand der erhobenen Daten im Untersuchungsgebiet identifizieren. Das Stadtgebiet umgebende Anhöhen ragen zu Beginn und zum Ende der untersuchten Strahlungsnacht aus der Kaltluft heraus und zugleich in eine Temperaturinversionsschicht hinein. Sie sind während der Nachtstunden i. d. R. wärmer als ihre tiefer gelegene Umgebung. Am Tage repräsentieren sie jedoch eher kalte Spots. Die zentralen Bereiche der Jenaer Innenstadt (historisches Zentrum) sowie einige stark bebaute Randviertel (z. B. Lobeda, Lobeda-Ost, Lobeda-Süd und Lobeda-West, Winzerla, Westteil von Wenigenjena) sind sowohl während der ersten als auch der zweiten Nachthälfte auffallend wärmer als ihre unbebaute, quasi höhengleiche Umgebung und weisen, bezogen auf die jeweilige Profilmessstrecke und -zeit, stets positive Abweichungen zur jeweils zugehörigen Mitteltemperatur auf. Insbesondere waldbestandene, schattige Talbereiche und begrünte Niederungen sowie Areale nahe Wasserflächen zeigen sich i. d. R. als kühle Zonen (z. B. Bereich um die BAB 4 zwischen Maua und Lobeda, Ammerbachtal, Gembdental, Auenflächen, Grünflächen entlang des Saaleverlaufs, begrünte Sport-, Erholungs- und Freizeitflächen in der Oberaue).

Es ist anzunehmen, dass sich die während der nächtlichen Profilmessfahrten gebildete Kaltluft vorzugsweise entlang der Saalegrünflächen und Straßenzüge (bevorzugt von Süd nach Nord gerichtet) talabwärts bewegt und damit zu einer allgemeinen Abkühlung im Untersuchungsraum beiträgt.

gebildet hatte, floss der Geländeneigung folgend in die Täler, sammelte sich dort und sorgte zugleich für Abkühlung, während die höher gelegenen Bereiche aus dieser Kaltluft herausragten. Ebenso hoben sich die zentralen innerstädtischen Bereiche – insbesondere westlich der Saale (historisches Stadtzentrum) – während der zweiten Nachthälfte als wärmere Areale (im Vergleich zum freien Umland) ab.

Fazit: Analyse der Profilmessungen

Die Ergebnisse der thermischen Profilmessfahrten und die der Stationsmessergebnisse (Kapitel 5.3.2.1) lassen einerseits auf die thermische Belastungssituation und andererseits auf stadtstruktur-

5.3.4 Analyse der Schwachwindmessungen

Parallel zu den Profilmessfahrten wurden zwei Schwachwindmessgeräte im Untersuchungsgebiet positioniert (1 m über Grund), um mögliche Kaltluftflüsse hinsichtlich Richtung und Geschwindigkeit zu erfassen. Abbildung 34 ist ein annähernd paralleler Verlauf der Windgeschwindigkeitskurven für die Standorte Maua und Ammerbachtal zu entnehmen. Allerdings sind die Werte der mittleren Windgeschwindigkeit sowie der maximalen 3-Sekunden-Boe für Ammerbachtal i. d. R. höher. Dies erklärt sich gewiss über die freie Hanglage der Station Ammerbachtal im Vergleich zu der etwas geschützter gelegenen Station Maua (erhöhte Umgebungsrauigkeit, geringere Geländeneigung).

Anhand Abbildung 34 wird deutlich, dass sich das Tageswindregime zu Beginn der Strahlungsnacht an der Station Ammerbachtal (wahrscheinlich wegen

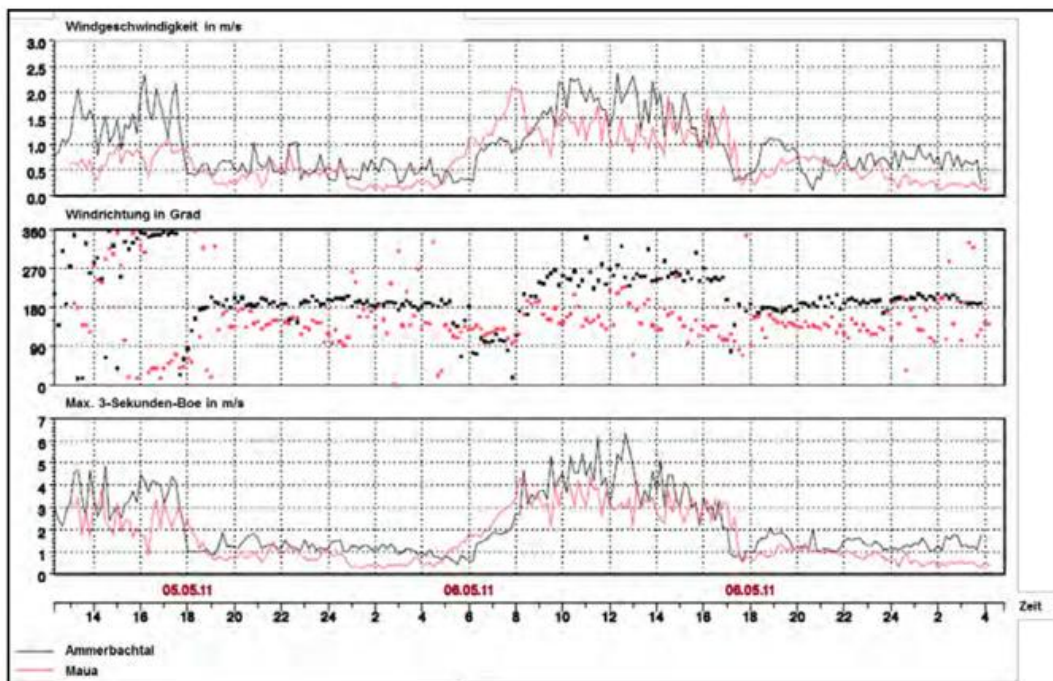


Abbildung 34: Schwachwindmessungen vom 05.05. bis 07.05.2011 (Basis: 10-Minuten-Mittel)

Abschattungseffekten) zeitlich etwas eher umzustellen scheint. Bereits vor Sonnenuntergang sinkt die Windgeschwindigkeit von über 2 m/s am 05.05.2011 auf teils unter 0,5 m/s ab. Anschließend stellt sich das Regime zunehmend um. In Maua setzt dieser Prozess erst kurze Zeit später ein. Die zuvor westlichen bis nördlichen Windrichtungen (Hangaufwinde) am Standort Ammerbachtal drehen auf südliche Richtungen (Hangabwinde). Zum Ende der Strahlungsnacht stellt sich das Windregime erneut um. Dies erfolgt in Maua jedoch zeitlich etwas eher als am Standort Ammerbachtal. Es ist davon auszugehen, dass auf Grund von Abschattungseffekten, die Umstellung an der Station Ammerbachtal zum Ende der Strahlungsnacht im Vergleich zeitlich verzögert einsetzt. Die Tendenzen für den Standort Ammerbachtal bestätigten sich durch erneute Messungen in der Zeit vom 22. bis 23. August (Abbildung 35). Das zweite Messgerät wurde im August nicht in Maua, sondern am Standort Kunitz positioniert, um auch für den Norden Jenas entsprechende Messwerte für eine Strahlungswetterlage zu erhalten. Die Abnahme der Windgeschwindigkeit und Umstellung der Windrichtung von Nord auf Süd zu Beginn der Strahlungsnacht setzt am Standort Ammerbachtal auch im Vergleich zur Station Kunitz zeitlich etwas früher ein, während der Anstieg der Windgeschwindigkeit und der Richtungswechsel im Ammerbachtal zum Ende der Strahlungsnacht zeitlich leicht verzögert einsetzen. Jedoch

sind die Windgeschwindigkeiten – wahrscheinlich auf Grund der freien Anströmungsbedingungen und geringen Umgebungsrauigkeit – am Standort Kunitz i. d. R. höher als im Ammerbachtal. Auch in Kunitz findet die Umstellung des Tageswindregimes auf ein nächtliches Regime statt. Tagsüber dominieren eher talaufwärts gerichtete, nördliche bis nordöstliche Richtungen, nachts hingegen talabwärts gerichtete, vorwiegend südliche Richtungen. Insgesamt sind die Windgeschwindigkeiten an allen Standorten in den Nachtstunden gegenüber den Tagstunden herabgesetzt, was gewiss im Zusammenhang mit den austauschärmeren Bedingungen nach Sonnenuntergang zu sehen ist.

Die an den Standorten Maua, Kunitz und Ammerbachtal erfassten Kaltluftflüsse in Bodennähe sind bzgl. der Geschwindigkeit eher schwach ausgeprägt und übersteigen

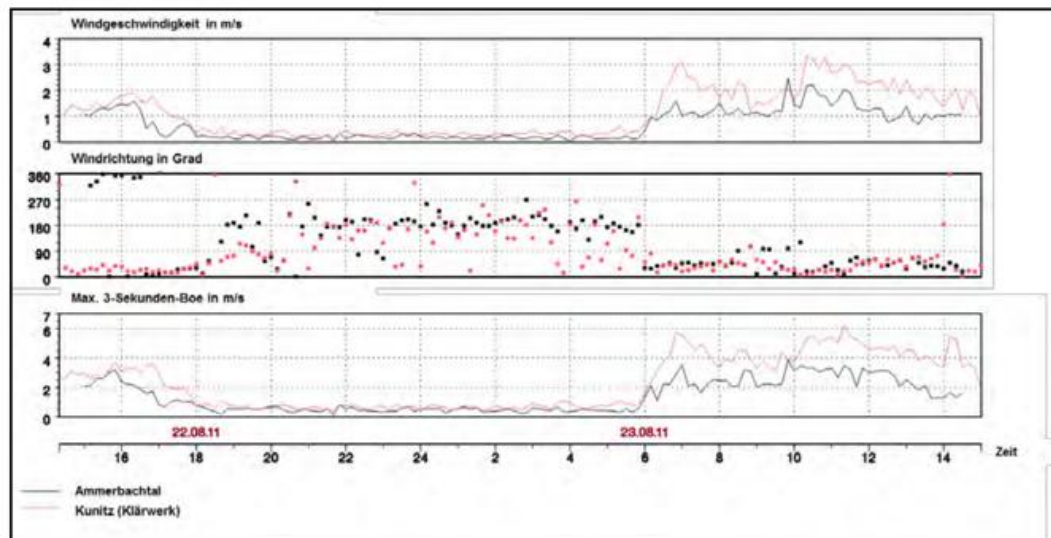


Abbildung 35: Schwachwindmessungen vom 22.08. bis 23.08.2011 (Basis: 10-Minuten-Mittel)

während der Messzeiträume im Mittel die Marke von 2 m/s i. d. R. nicht. Generell sind sie, bezogen auf die Messungen in den Nachtstunden, erwartungsgemäß jeweils talabwärts gerichtet. Sowohl am Standort Maua als auch in Kunitz dominieren diesbezüglich südliche Richtungen. Weitere Schwachwindmessungen die am 30.09.2011 bei Kunitz durchgeführt wurden, bestätigen die Trends der Messungen vom Mai und August 2011 – sie sollen an der Stelle aber nicht weiter vorgestellt werden.

5.3.5 Analyse zum Einsatz der Rauchpatronen

Am Morgen des 30.09.2012 wurden Rauchpatronenexperimente vor Sonnenaufgang (ca. 05:12 Uhr UTC) zur Untersuchung des Verhaltens der Kaltluft im Untersuchungsgebiet östlich des Klärwerkes (bei Kunitz) durchgeführt. Es wurden zwei Rauchpatronen in kurzem zeitlichen Abstand nacheinander gezündet. Die Ergebnisse wurden fotografisch dokumentiert (Abbildung 37) und zusammen mit den Messergebnissen von zwei zusätzlich installierten Ultraschallanemometern in die Untersuchungen einbezogen (Abbildung 36).

Der Zündungspunkt der Rauchpatronen lag zwischen den beiden vor Ort positionierten Ultraschallanemometern. Erwartungsgemäß zog die Rauchfahne mit der Kaltluft der Geländeneigung folgend talabwärts. Die Geschwindigkeit blieb dabei unter 3 m/s, war allerdings zum Zeitpunkt des zweiten Versuchs insgesamt merklich erhöht. Der Wind wehte stets aus südlichen Richtungen, anfangs eher zwischen 150° und 180°, später zwischen 180° und 210° (bis 240°).



Abbildung 36: Ausbreitung und Absinken der Rauchfahne nach der Zündung (Versuch 2)

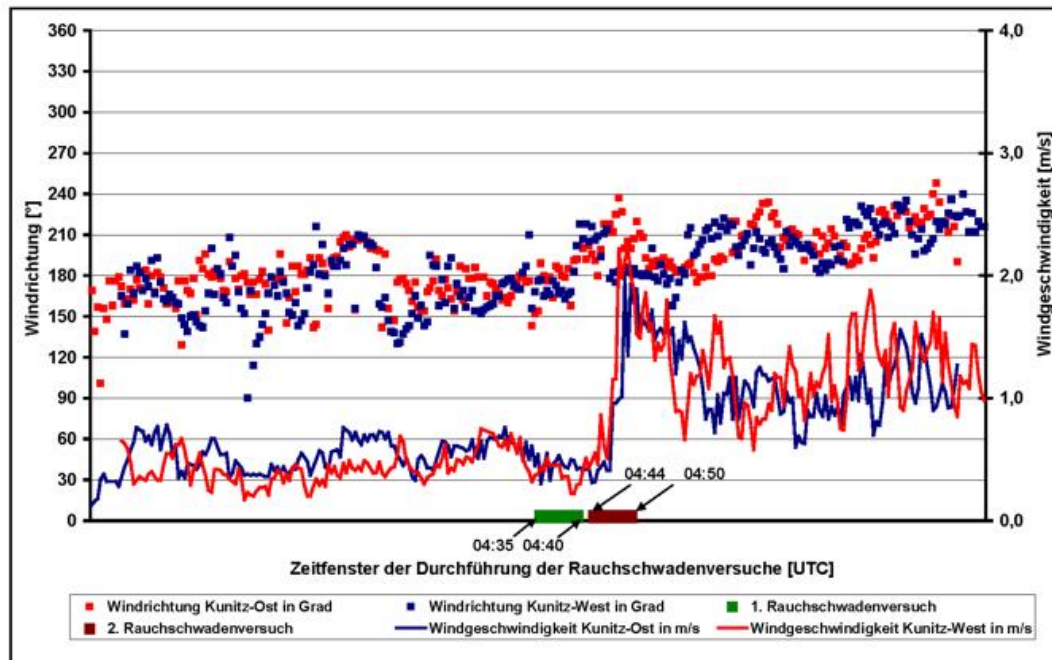


Abbildung 37: Windrichtung und Windgeschwindigkeit am Standort Jena Kunitz während der Durchführung der Rauchschwadenversuche am 30.09.2011 (von 03:20 bis 05:45 Uhr, UTC)

5.4 Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen

5.4.1 Messungen und KLAM_21-Simulationen

Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes simuliert die zeitliche Entwicklung von Kaltluftflüssen (vertikale Mächtigkeit und horizontale Strömungsrichtung) und die Ansammlung von Kaltluft für windschwache Strahlungsnächte in einem beliebig auswählbaren, rechteckig begrenzten Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit von der Flächennutzung (z. B. Bewuchs, Gebäude) und der damit verbundenen Kälteproduktionsrate (in W/m^2) sowie der „Rauigkeit“ und weiterer Parameter (vgl. Anlage 1, Kapitel 12).

Die KLAM_21-Simulationsergebnisse für die Istsituation zeigen die für Jena typischen Strömungsverhältnisse während einer nächtlichen Schwachwindsituation auf und bestätigen die Ergebnisse von im Jenaer Stadtgebiet durchgeführten Feldmessungen (vgl. Kapitel 5.3.2.3, 5.3.4 und 5.3.5) im Großen und Ganzen. Wichtige Kaltluftentstehungsgebiete und Kaltluftabflussbahnen konnten mittels KLAM_21 im Untersuchungsgebiet identifiziert werden.

Zur „realen“ Erfassung der nächtlichen Kaltluftverhältnisse in Jena an der Saale wurden u. a. an ausgewählten Standorten während windschwacher Strahlungswetterlagen temporär bodennahe Schwachwindmessungen sowie ein Rauchpatronenexperiment durchgeführt. Zusätzlich wurden Windmessungen temporär eingerichteter Klimastationen ausgewertet.

Die Resultate der bodennahen Schwachwindmessungen zeigen, dass die mittleren Windgeschwindigkeiten in den stark geneigten, engen Seitentälern gegenüber breiteren und durch eine geringere Neigung charakterisierte Täler etwas höher ausfallen (vgl. Kapitel 5.3.4). Beispielsweise sind die höheren nächtlichen Fließgeschwindigkeiten zumeist im stark geneigten, engen Ammerbachtal (westlich der Saale) auszumachen, die geringeren – sehr wahrscheinlich verursacht durch eine vorgelagerte Kleingartenanlage – am Standort Maua. Die KLAM_21-Simulationen zeigen ebenso Unterschiede hinsichtlich der mittleren Fließgeschwindigkeit der Kaltluft zwischen engen, stark geneigten und großen, breiten, schwach geneigten Talbereichen im Untersuchungsgebiet (vgl. Anlage 1, Kapitel 12.5). Während die Geschwindigkeiten im Saaletal nach 1 h Simulationszeit äußerst gering ausfallen (etwa $< 0,5$ m/s), ergeben sich in den Seitentälern Geschwindigkeiten > 1 m/s (z. B. im Ammerbachtal, im Rodatal bei Laasdorf, im Mühlthal, im Gleistal bei Golmsdorf). Bei annähernd gleicher Rauigkeit (ausgenommen die stark bebauten Talausgänge) werden in dem breiten, schwach geneigten Gembdental stellenweise Fließgeschwindigkeiten von nur ca. 1,0 m/s erreicht. Demgegenüber werden in dem stärker geneigten, engen Ammerbachtal bis zu ca. 1,8 m/s erreicht.

Neben Orografie und Topografie spielen die generellen Voraussetzungen für die frühzeitige Ausbildung eines Kaltluftstromes nach Sonnenuntergang eine entscheidende Rolle (Fläche des Einzugsgebietes, Größe des Talquerschnittes, Gefälleneigung, aerodynamische Rauigkeit, Art der Landnutzung, Kaltluftbildungsrate etc.). In den engen, stark geneigten, begrünten Seitentälern mit geringen Rauigkeiten kann sich daher zeitlich viel eher ein abwärts gerichteter Strom ausbilden, als im großen, breiten, vergleichsweise schwach geneigten Saaletal selbst. Nicht nur die KLAM_21-Simulationsergebnisse zeigen, dass sich in den Seitentälern im Vergleich relativ frühzeitig ein talabwärts gerichteter Kaltluftfluss mit geringfügig höheren bis hin zu mehr als doppelt so hohen Fließgeschwindigkeiten (lokal) als im Saaletal ausbilden kann. Dabei strömt die Kaltluft aus den Seitentälern der Gefälleneigung folgend ins Saaletal und trägt nach und nach zur Auffüllung des Saaltets mit Kaltluft bei (Advektion). Auch anhand der an den Standorten Ammerbachtal, Maua und Kunitz durchgeführten Schwachwindmessungen ist zu schließen, dass Kaltluftabflüsse in den Seitentälern zeitlich geringfügig eher einsetzen als im Saaletal. Dies erklärt auch, weshalb die mittlere Kaltluflhöhe in den Seitentälern bereits nach 1 h Simulationszeit z. T. mehr als doppelt so groß ist wie im Saaletal, wie die KLAM_21-Ergebnisse zeigen (vgl. Anlage 1, Kapitel 12.5). Allgemein setzen lokale Kaltluftabflüsse von den Hängen und aus den Seitentälern bei bzw. kurz nach Sonnenuntergang ein und erreichen Windgeschwindigkeiten von ca. 1,5 m/s.

Aus der Analyse der Messungen und Beobachtungen ging hervor, dass die Kaltluft – in Abhängigkeit von Orografie, Topografie und umgebender Rauigkeiten – allgemein relativ langsame Strömungsgeschwindigkeiten von zumeist weniger als 2 m/s aufweist. Die KLAM_21-Ergebnisse deuten ebenso darauf hin. In Bodennähe ist demnach ein talabwärts gerichteter Wind von ca. 0,5 bis 1,0 m/s anzunehmen.

Hinsichtlich der Strömungsrichtung dominierten an den Standorten Ammerbachtal, Kunitz und Maua nachts allgemein eher südliche Strömungen (vgl. Kapitel 5.3.4). Dies bestätigt sich auch für die KLAM_21-Simulationsergebnisse, die spätestens ab der Mitte der simulierten Strahlungsnacht einen talabwärts gerichteten Kaltluftstrom wiedergeben (vgl. Anlage 1, Kapitel 12.5).

Zudem kann sich, wie die Ergebnisse der KLAM_21-Simulationen für die Istsituation ergeben, während einer windschwachen Strahlungsnacht ein das gesamte Jenaer Saaletal umfassendes thermisch induziertes, regionales Windsystem ausbilden, das der Geländeneigung des Saaletals folgend flussabwärts vordringt. Im Verlauf der windschwachen Strahlungsnacht verstärkt sich der Saaletalwind hinsichtlich seiner Mächtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit zunehmend und stellt etwa ab der zweiten Nachthälfte ein vom überregionalen Höhenwind losgelöstes, autarkes System dar. Dieser talabwärts gerichtete nächtliche Wind erreicht dabei im Jenaer Stadtgebiet Geschwindigkeiten von etwa 1,0 m/s im Boden- und Gebäudeniveau und ab dem Dachniveau Werte von ca. 1,0 bis 2,5 m/s. Dabei ist anzunehmen, dass der Saaletalwind ab der zweiten Nachthälfte in stärkerer Ausprägung in größeren Höhen (über dem Dachniveau) auftritt (vgl. Anlage 1, Kapitel 12.5.1).

Die Auswertung der SODAR-Messungen zeigt, dass sich dieses nächtliche Phänomen bei windschwachen Strahlungswetterlagen nachweisen lässt. Dabei erreicht die vertikale Mächtigkeit des Saaletalwindes nicht ganz die Randhöhen (obere Geländekanten der umgebenden Anhöhen) des Saaletals. Zudem implizieren die Messergebnisse, dass das zeitliche Einsetzen und Abebben des nächtlichen Saaletalwindes von unterschiedlichen Faktoren, wie z. B. der Wetterlage (Klimaelemente) oder der Jahreszeit (Klimafaktoren), abhängt. Morgens kann der Saaletalwind noch einige Zeit nach Sonnenaufgang existieren. Abends setzen die Kaltluftabflüsse und damit der Saaletalwind hingegen etwa bei oder erst einige Stunden nach Sonnenuntergang ein. Auch die SODAR-Daten zeigen im Gebäudeniveau nur äußerst geringe (ca. 1 bis 2 m/s) und erst über dem Dachniveau etwas höhere Geschwindigkeiten (ca. 3 bis 4 m/s) für den Saaletalwind (vgl. Kapitel 5.3.2.3.1).

Die KLAM_21-Simulationsergebnisse geben mittels Pfeildarstellung die Richtung und Ergiebigkeit der Kaltluft (horizontale Fließgeschwindigkeit) in Abhängigkeit von den topografischen und orographischen Umgebungsverhältnissen wieder. Die Strömungsrichtung gestaltet sich allgemein einheitlich, d. h. der Richtung des Gefälles folgend tal- bzw. hangabwärts. Die kanalisierende Wirkung der Orografie und Topografie kommt hier recht klar zum Ausdruck (vgl. Anlage 1, Kapitel 12.5).

Unter Einbeziehung der Stationsmessergebnisse wird deutlich, dass der Wind (Windrichtung und Windgeschwindigkeit) im Saaletal erwartungsgemäß stark kanalisiert wird (vgl. Kapitel 5.3.2.3). Die im ost-west-gerichteten Gembdental gelegene gleichnamige Station (östlich der Saale) zeigt z. B. eine dem Talverlauf angepasste straffe Ost-West-Verteilung. Die Station am Standort Stadion zeigt ebenfalls eine dem Verlauf des Saaletals angepasste Windrichtungsverteilung (primäres Maximum: 180°, sekundäres Maximum 360°, Minimum 060°). Wegen der freien Kuppenlage und ansonsten geringer Umgebungsrauigkeiten zeigt sich die Windrose der Station Griesberg von der Orografie eher unbeeinflusst. Hier setzt sich allgemein die überregionale Komponente durch (mittlere Richtung des Höhenwindes für Thüringen aus Südwest bis West).

Bei Betrachtung der Nachtstunden für ausgewählte Wetterlagen (windschwache Strahlungsnächte) ergeben sich jedoch teils markante Unterschiede in den Windrichtungsverteilungen. So wird z. B. die Westkomponente an der Station Gembdental etwa auf ein Minimum reduziert, während die Ostkomponente an Gewicht gewinnt. Ähnliches gilt für die Station am Standort Stadion. Dort reduziert sich die

Nordkomponente, während die relative Häufigkeit der Südkomponente im Vergleich zunimmt (vgl. Kapitel 5.3.2.3).

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass die wesentlichen Eigenschaften der durch Messungen und Beobachtungen erfassten Kaltluftabflüsse im Jenaer Saaletal recht gut mit Hilfe von KLAM_21 simuliert wurden (vgl. Anlage 1, Kapitel 12.5).

Hinweise auf den Einfluss veränderter Bebauungs- und Landnutzungsstrukturen (Planzustand) auf die nächtliche Kaltluftsituation in Jena sind der Anlage 1 dieses Berichtes zu entnehmen.

5.4.2 Messungen und MUKLIMO_3-Simulationen

Die MUKLIMO_3-Simulationen für den Istzustand spiegeln die Resultate der in Jena durchgeführten Feldmessungen im Großen und Ganzen recht gut wider (vgl. Anlage 2, Kapitel 13.4).

Aus den Ergebnissen der Stationsmessungen (vgl. Kapitel 5.3.2) ging hervor, dass insbesondere die stark überbauten innerstädtischen Bereiche (mit hoher Bebauungsdichte und/oder hohem Versiegelungsgrad) thermisch belastet sind. An der Innenstadtstation Jena/Sternwarte traten im Messzeitraum vom 01.05. bis 30.09.2011 die meisten Sommertage (62) und heißen Tage (15) auf. Frosttage wurden im Gegensatz zum unbebauten, nahezu höhengleichen Außenbereich (Station Gembdental mit 5 Frosttagen) in der dicht bebauten Innenstadt (Station Jena/Sternwarte) nicht registriert. Ferner wurden die absolut höchsten Temperaturen in der Innenstadt (Station Jena/Sternwarte, Tagesmaximum: 35,4 °C), die absolut tiefsten im annähernd höhengleichen, unbebauten Außenbereich gemessen (Station Gembdental, Tagesminimum: -2,8 °C).

Dies passt sehr gut zu den Ergebnissen der MUKLIMO_3-Simulationen. Die Simulationen für einen beispielhaften Tagesgang (16. Juli, 14:00 Uhr MESZ) für die Lufttemperatur und die horizontalen Windvektoren zeigen – wie o. g. Messresultate (vgl. Kapitel 5.3.2.1), dass die innerstädtisch stark bebauten Areale mit Temperaturen bis zu maximal 32,7° C thermisch am meisten belastet sind (im ländlichen Bereich liegen die Temperaturwerte bei etwa 28,5 °C). Während annähernd gleich hoch gelegene, weniger stark bis unbebaute Areale nur Temperaturen um etwa 27,4° C aufweisen. Ebenso zeigt sich wie anhand der Profilmessfahresultate (vgl. Kapitel 5.3.3) in den MUKLIMO_3-Simulationsergebnissen der Einfluss der Orografie in höheren Lufttemperaturen in den Tallagen und niedrigeren Temperaturen auf den Kuppenlagen tagsüber. Auch eine beispielhafte MUKLIMO_3-Simulation für die nächtlichen Verhältnisse zeigt – wie o. g. Messergebnisse, dass die höchsten Lufttemperaturen in den Bereichen mit dichter Bebauung auftreten, die niedrigsten hingegen in den engen, steilen, locker bis unbebauten Seitentälern.

Aus den MUKLIMO_3-Ergebnissen für den Evaluierungslauf (Klimatologie 1971/2000) ging hervor, dass die räumliche Variabilität der Klimaindizes (Sommertage und heiße Tage) im Stadtgebiet stark durch die Überlagerung der Auswirkungen der Bebauung (städtischer Wärmeinseleffekt) und der orographischen Einflüsse auf die Lufttemperatur geprägt ist. Wie auch bei den Stationsmessungen (Betrachtung von Ereignistagen) ergab sich bei den Simulationen, dass die höchste berechnete Anzahl an Sommertagen und heißen Tagen in Tallagen mit hoher Bebauungsdichte und hohem Versiegelungsgrad auftritt (vgl. Kapitel 5.3.2.1 und Anlage 2, Kapitel 13.4).

Die Untersuchung der klimatischen Auswirkungen der Landnutzung und der Bebauungsstrukturen mit MUKLIMO_3 ergab, dass die geringste Anzahl an Sommertagen für die Landnutzungs-kategorie Wald simuliert wurde. Dies ist im Zusammenhang mit dem durch die Bäume verursachten Schattenwurf sowie Absorption

und Reflexion der Sonnenstrahlung im Kronenbereich zu sehen. Des Weiteren wiesen in den Simulationsresultaten Grünflächenareale, wie z. B. Parks und Kleingärten, eine recht niedrige Anzahl an Sommertagen auf – aber auch Wasserflächen. Auf Grund der Wärmespeicherkapazität von Wasser können Wasserflächen in den Nachtstunden aber zur Wärmebelastung in ihrer unmittelbaren Umgebung beitragen, da sie die tagsüber gespeicherte Wärme abends/nachts langsam an ihre Umgebung abgeben. Eignung und Nutzen von Wasserflächen zur Reduzierung der städtischen Wärmebelastung halten sich somit in Grenzen (vgl. Anlage 2, Kapitel 13.4.3).

Die höchste Anzahl an Sommertagen ergab sich bei hoher Bebauungsdichte und hohem Versiegelungsgrad, bei Blockbebauung und Zeilenbebauung sowie in Industrie- und Gewerbegebieten.

Analog gestaltet sich jeweils die Situation für die heißen Tage, allerdings ergaben sich hier erwartungsgemäß niedrigere Absolutwerte als bei den Sommertagen (vgl. ebd.).

Die Ergebnisse der Profil- und Stationsmessungen bestätigten die für sommerliche Verhältnisse typischen, erwarteten und mit MUKLIMO_3 simulierten stadtstrukturbedingten Unterschiede zwischen den Temperaturniveaus zwischen der Jenaer Innenstadt (dicht bebaut) und ihrem Umland (locker bebaut bis gar nicht bebaut). Die differenzierte Wirkung verschiedener Landnutzungen und der Einfluss der Orografie auf die Ausprägung des Temperaturmilieus zeigen sich deutlich anhand der während einer autochthonen Wetterlage gemessenen Werte. Niederungsbereiche entlang der Saale (Auenflächen im Norden und Süden), aber auch Talbereiche und schattige Hanglagen (Gembdental, Ammerbachtal, Mühlthal) stachen insbesondere während der Nachtfahrten (früh und abends) als deutlich kühlere Flächen im Vergleich zur etwa gleich hoch gelegenen, dicht bebauten, stark versiegelten Innenstadt hervor. Die Differenzen zwischen diesen „äußeren“ Zonen und der Innenstadt liegen, bezogen auf den Messzeitraum, bei ca. 2 bis 4 K. Tagsüber ist dieser Temperaturunterschied zwischen Stadt (Station Sternwarte) und Umland (Station Gembdental) mit nur ca. 1 bis 2 K erwartungsgemäß weniger stark ausgeprägt. Die Differenzen zwischen stark bebauter Innenstadt und den engen, stark geneigten Tälern Mühlthal und Ammerbachtal (unbebaut, teils schattige Hanglagen, Wald, Wiese) fallen stellenweise sogar noch höher aus und betragen in den Abendstunden etwa 5 bis 6 K, während der Mittagszeit etwa 3 bis 4 K und in den Frühstunden ebenfalls etwa 3 bis 4 K. Die Unterschiede zwischen der Innenstadt und dem breiten, weniger stark geneigten Gembdental betragen hingegen während der Abendstunden etwa 3 bis 4 K, in den Mittagsstunden nur etwa 2 bis 3 K, aber während der frühen Morgenstunden etwa 4 bis 7 K. Die Analyse der temporären Stationsdaten ergab weiterhin, dass die Innenstadt (Station Sternwarte) bezogen auf den gesamten Zeitraum der Messkampagne im Schnitt um ca. 1,3 K wärmer ist (Wärmeinselintensität) als das freie, weniger stark oder unbebaute quasi höhengleiche Umland (Station Gembdental).

Mittels der Profilmessdaten und Daten der temporären Stationsmessungen ließ sich das Phänomen der städtischen Wärmeinsel für die Stadt Jena an der Saale, bezogen auf den Zeitraum der Messkampagne, nachweisen.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die wesentlichen Eigenschaften der durch Messungen und Beobachtungen erfassten thermischen (Belastungs-) Verhältnisse im Jenaer Saaletal recht gut mit den MUKLIMO_3-Simulationsergebnissen für den Istzustand übereinstimmen.

Hinweise auf den Einfluss veränderter Bauungs- und Landnutzungsstrukturen (Planzustand) mit und ohne Berücksichtigung angenommener regionalklimatischer Veränderungen auf die sommerlichen Temperaturverhältnisse in Jena sind der Anlage 2 (Kapitel 13.4 und 13.5) dieses Berichtes zu entnehmen.

6 Hinweise

6.1 Allgemeine Bemerkungen

Die Berichterstellung (incl. Anlagen 1 und 2) erfolgte gemäß dem derzeitigen Stand der Technik und des Wissens. Weiterführende Aussagen können dauerhafte, hoch aufgelöste Messungen und/oder die Erstellung von Modellrechnungen für bestimmte Wetterlagen und unter Berücksichtigung weiterer Emissionsszenarien liefern.

Der vorliegende Bericht samt seiner beiden Anlagen ist als übergeordnete, gesamtstädtische Klimaanalyse zu verstehen.

Es bleibt zu beachten: Bei den Simulationsergebnissen des vorliegenden Berichtes handelt es sich um eine Einzelfallstudie zu bestimmten Wetterlagen für ein ausgewähltes Untersuchungsgebiet. Es werden vorwiegend Ausschnitte der Realität (incl. Projektionen möglicher künftiger Situationen) betrachtet und in den Kartendarstellungen wiedergegeben. Grenzen zwischen einzelnen Intensitätsangaben ausgewählter Ergebnisdarstellungen sollten nicht als starre Resultate interpretiert werden. Ebenso sollten einzelne kleinräumige Abweichungen hinsichtlich ihrer abgebildeten Ausprägung in einer ansonsten eher gleichförmig abgebildeten Umgebung nicht überbewertet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass mikroklimatische Effekte in komplex strukturierten Arealen auflösungsbedingt nicht immer ausreichend genau wiedergegeben werden können. Feinheiten sind zumeist eher verallgemeinernd dargestellt, weshalb einzelne Pixel nicht überbewertet werden sollten (vgl. Anlage 1, Kapitel 12.8).

Aus den Ergebnissen des vorliegenden Berichtes und seinen beiden Anlagen lassen sich planerische Hinweise und Aussagen allgemeiner Art ableiten. Auf der Ebene des Flächennutzungsplanes haben die Ergebnisse und daraus abgeleitete Informationen Bestand. Im Fall von Bebauungsplanverfahren können noch planerische Hinweise allgemeiner Art abgeleitet werden. Die Resultate dieses Berichtes können jedoch kein standortbezogenes, mikroklimatisches Spezialgutachten, das z. B. im Rahmen eines Bebauungsplanverfahrens erforderlich wäre, ersetzen. In solch einem Fall sind weiterführende, standortbezogene Untersuchungen durchzuführen (z. B. Messungen und/oder Modellrechnungen).

Aus den Auswertungen der Mess- und Computersimulationsergebnisse (Ist- und Planzustand) dieses Berichts geht hervor, dass insbesondere die innerstädtischen Bereiche Jenas mit Blockrand- und Zeilenbebauung schon jetzt besonders thermisch belastet sind und es wohl auch künftig sein werden. Gleiches gilt für hochgradig versiegelte Industrie- und Gewerbeflächen, v. a. im Süden Jenas. Es wurde deutlich, dass eine weitere bauliche Verdichtung künftig zur Intensivierung der bereits bestehenden thermischen Belastung führen wird.

Die Ausweisung und Schaffung neuer Grün- und Freiflächen (Wälder, Wiesen, Acker- und Weideland, Pocketparks, Straßenbegleitgrün, Gartenanlagen, Innenhof-, Dach- und Fassadenbegrünung etc.) im Zuge von Entsiegelungsmaßnahmen oder Flächenkonversionen sowie Erhalt, Pflege und Ausbau bestehender Grün- und Freiflächen können einer erhöhten klimatischen Belastung jedoch entgegensteuern und die bestehende sowie künftig erwartete zunehmende thermische Belastung abmildern. Selbst innerhalb der dicht bebauten Innenstadt Jenas lassen sich durch genannte Maßnahmen kleine Oasen des klimatischen Komforts schaffen, die sich nicht nur positiv auf das städtische (Mikro-) Klima auswirken. Sie tragen bei adäquater Umsetzung zweifellos auch zu einer Verbesserung der Aufenthaltsqualität (Erholungsfunktion) und des Wohlfühlfaktors in einem Quartier bei (weicher Standortfaktor) und damit auch zur Gesundheit und einem gesteigerten Wohlbefinden der Bewohner. Zugleich stellen sie

Schutz- und Anpassungsmaßnahmen bzgl. erwarteter Auswirkungen des Klimawandels dar (z. B. Beitrag zur Reduzierung der Wärmebelastung und Belastung mit Luftschadstoffen und Lärm im öffentlichen Raum sowie zur Verringerung des Energiebedarfs für die Gebäudekühlung und zur verbesserten Versickerung von Regenwasser aus Starkniederschlägen).

Klimaschonendes Potenzial liegt in der Entsiegelung und Begrünung vorhandener Brachflächen – egal ob nur als temporäre Zwischennutzung oder als permanente Variante – sowie auch in der Freihaltung bestehender und Schaffung neuer Ventilationsbahnen.

Fest steht, dass zusätzliche Bebauung allgemein zu einer gewissen Beeinträchtigung der derzeitigen Durchlüftungsverhältnisse und speziell der nächtlichen Kaltluftdynamik in Jena beitragen wird. Mit einer baulichen Verdichtung auf Grün- und Freiflächen geht der Verlust thermisch wirksamer Ausgleichs- und Kaltluftproduktionsflächen einher. Dadurch wird die thermische Belastungssituation verstärkt und die nächtliche Abkühlung zeitlich verzögert. Denn neu bebaute Flächen stellen zusätzliche „Erwärmungsflächen“, aber auch Strömungshindernisse dar. Mittlere Kaltluftströmungsgeschwindigkeiten werden neben der mittleren Kaltluflhöhe über neu bebauten Flächen folglich herabgesetzt sein. Außerdem kann es in Abhängigkeit der Kubatur der neuen Baukörper sowie deren Anordnung zu Kanalisierungs- und Düseneffekten kommen.

Generell wird deshalb empfohlen, neben thermischen und lufthygienischen Aspekten auch die Windverhältnisse, einschließlich lokaler Windsysteme, bei der Planung neuer Verkehrs-, Siedlungs-, Industrie- und Gewerbegebiete zu berücksichtigen. Bestehende Frisch- und Kaltluftschneisen sollten nach Möglichkeit nicht in ihrer Funktion beeinträchtigt werden. So ist es ratsam, von einer flächendeckenden Bebauung wichtiger Luftschneisen sowie Kaltluftproduktions- und -transportflächen mit hohen Gebäuden abzusehen, da diese eine abriegelnde Wirkung entfalten können. Ebenso wird empfohlen, keine schadstoffemittierenden Gewerbe/Industrien im Einzugsbereich von Frischluftschneisen, Kaltluftproduktions- und -transportflächen anzusiedeln. Eine wichtige Rolle spielt auch die Ausrichtung geplanter Bebauung im Raum. Zum Erhalt eines gewissen Maßes an Durchlüftung und Vermeidung nächtlicher Kaltluftstaus ist es erforderlich, dass neue Straßen und Gebäude in ihrer Längenausdehnung parallel zur Geländeneigung angeordnet werden. Dies gilt für Hangareale gleichermaßen wie auch für Talabschnitte, wobei die Talsohle von Bebauung freigehalten werden sollte. Im Fall eines Gebäudeensembles ist die Integration von baulichen „Lücken“ zwischen den einzelnen Gebäuden zur Durchlüftung und Begrünung eine sinnvolle Maßnahme. Ebenso stellen die Erhaltung bestehender und die Schaffung neuer, ergänzender Grünzüge als Ventilationsbahnen für die Kaltluftzufuhr geeignete Schutz- und Anpassungsmaßnahmen dar.

Allgemein sind im Zuge von Adaptation und Mitigation die Nutzung klimafreundlicher und -aktiver Bauformen, Farben, Materialien und der Einsatz entsprechender, ressourcenschonender Technologien zu empfehlen und gegenüber dem baulichen Eingriff sind stets die Möglichkeiten effektiver klimaschonender Alternativen abzuwägen und zu bevorzugen.

6.2 Schlussbemerkungen

Mit dem vorliegenden Ergebnisbericht des Deutschen Wetterdienstes verfügt die Stadt Jena über aktuelle Klimadaten. Die Anlagen 1 und 2 zu diesem Ergebnisbericht enthalten Ergebnisse von Computersimulationen zu den nächtlichen Kaltluftverhältnissen und der vergangenen sowie künftigen thermischen Belastungssituation, die jeweils für den klimatischen Istzustand und einen Planzustand (städtebauliche Planvariante) gerechnet wurden.

Die Daten können genutzt werden, um eine dem Klimawandel gerechte Stadtplanung zu implementieren, die sowohl notwendige Aspekte der Klimaanpassung als auch des Klimaschutzes in sich vereint, um somit negative Folgen für Natur, Wirtschaft und Bevölkerung nach Möglichkeit zu vermeiden.

An dieser Stelle sei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Stadtverwaltung Jena, des Thüringer Institutes für Nachhaltigkeit und Klimaschutz, Frau Luge von der Friedrich-Schiller-Universität Jena, Herrn Kolle vom Max-Planck-Institut für Bio-Geo-Chemie, Herrn Kunka von der Thüringischen Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Herrn Unger von der Feuerwehr Jena, Herrn Wickler von der Gleistal Agrar e.G. sowie allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Regionalen Klimabüros Potsdam, der Mobilen Messeinheit Potsdam und des Zentralen Klimabüros des Deutschen Wetterdienstes in Offenbach gedankt, die durch ihre Mitwirkung und Unterstützung die Erstellung des vorliegenden Berichts möglich gemacht haben.

Im Rahmen des Forschungsprogrammes „Experimenteller Wohnungs- und Städtebau“ (ExWoSt) des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) war das Modellprojekt Jenaer Klima-Anpassungs-Strategie (JenKAS) der Stadt Jena Teil des ExWoSt-Forschungsfeldes „Urbane Strategien zum Klimawandel – Kommunale Strategien und Potenziale“. Weiterführende Informationen zum vorgenannten ExWoSt-Forschungsfeld, den Themen Klimawandel, Raumentwicklung, klimawandelgerechte Stadtentwicklung sowie zum Jenaer Modellvorhaben sind den Seiten

www.klimaexwost.de

www.klimastadtraum.de

www.stadtklimalotse.de und

www.jenkas.de/

zu entnehmen.

7 Literaturverzeichnis

- BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2011: Klimawandelgerechte Stadtentwicklung. Ursachen und Folgen des Klimawandels durch urbane Konzepte begegnen. Schriftenreihe „Forschungen“. Heft 149. Berlin, Bonn.
- BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2012: Karte „Stadt- und Gemeindetyp“ (Onlineveröffentlichung zu: Laufende Stadtbeobachtung - Raumabgrenzungen. Stadt- und Gemeindetypen in Deutschland). Datengrundlage: Laufende Raumbeobachtung des BBSR; Fortschreibung der Bevölkerung/Wanderungsstatistik/Flächenerhebung des Bundes und der Länder; Statistik der Bundesagentur für Arbeit; IDN ImmoDaten GmbH; infas geodaten. Geometrische Grundlage: BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie), Gemeinden und Gemeindeverbände (Stand: 31.12.2010).
- BECK, C., 2007: Klimaklassifikationen. In: Gebhardt, H., Glaser, R., Radtke, U., Reuber, P. (Hrsg.): Geographie. Physische Geographie und Humangeographie, München, S. 226 - 229.
- BECK, C., 2007: Regional- und lokalklimatische Besonderheiten. In: GEBHARDT, H., GLASER, R., RADTKE, U., REUBER, P., (Hrsg.), Geographie. Physische Geographie und Humangeographie. München, S. 229-233.
- BECKRÖGE, W., 1999: Regionale und lokale Windsysteme. In: HELBIG, A., BAUMÜLLER, J., KERSCHGENS, J. M. (Hrsg.): Stadtklima und Luftreinhaltung, 2., vollst. überarb. und erg. Aufl. Berlin [u. a.], Springer-Verlag, S. 41-52 und 107-117.
- BfN (Bundesamt für Naturschutz), 2011: Landschaftssteckbriefe. Ein Kartenservice des BfN. Interaktiver Kartendienst (Web-Mapping) zu den Landschaften in Deutschland. Die Landschaftssteckbriefe sind Ergebnis des F+E-Vorhabens „Verbreitung und Gefährdung schutzwürdiger Landschaften in Deutschland“ (als Grundlage für ein bundesweites Biotopverbundsystem [...]) und wurden im Auftrag des BfN durch das IVÖR (Institut für Vegetationskunde, Ökologie und Raumplanung) und die GFN (Gesellschaft für Freilandökologie und Naturschutzplanung mbH) erstellt. Basis des interaktiven Kartendienstes sind: Fachdaten. Bundesamt für Naturschutz (BfN), LANIS-BUND und Geobasisdaten: © Vermessungsverwaltungen der Länder und BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie).
- BMBau (Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau), 1980: Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen. Schriftenreihe „Raumordnung“ im Auftrag des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau 06.044, Forschungsprojekt BMBau RS II 4-70 41 02-77.10. Bonn.
- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung), BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung), 2011: StadtKlima. Kommunale Strategien und Potenziale zum Klimawandel. Lokale Klimaanalysen. Ein ExWoSt-Forschungsfeld. Schriftenreihe „ExWostInformationen“ des BBSR im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Heft 39/2. Berlin, Bonn. ISSN 0937 – 1664.
- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung), BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung), 2010: StadtKlima. Kommunale Strategien und Potenziale zum Klimawandel. Lokale Klimaanalysen. Ein ExWoSt-Forschungsfeld. Schriftenreihe „ExWost Informationen“ des BBSR im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Heft 39/1. Berlin, Bonn. ISSN 0937 – 1664.

- BÖER, W., 1966: Vorschlag einer Einteilung des Territoriums der Deutschen Demokratischen Republik in Gebiete mit einheitlichem Großklima. In: *Zeitschrift f. Meteorologie*, **17**, S. 267-275.
- BÖHM, U., KÜCKEN, M., AHRENS, W., BLOCK, A., HAUFFE, D., KEULER, K., ROCKEL, B., WILL, A., 2006: CLM - the climate version of LM: Brief description and long-term applications. *COSMO Newsletter*, COSMO, Vol. 6.
- BONGARDT, B., 2006: Stadtklimatische Bedeutung kleiner Parkanlagen dargestellt am Beispiel des Dortmunder Westparks. *Essener Ökologische Schriften*, Bd. **24**, Westarp-Wissenschaften, 227 S.
- BRENNER, J., DOSCH, F., 2010: Vorwort. In: BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (Hrsg.), *StadtKlima. Kommunale Strategien und Potenziale zum Klimawandel. Lokale Klimaanalysen. Ein ExWoSt-Forschungsfeld. Schriftenreihe „ExWost-Informationen“ des BBSR im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Heft 39/1*. Berlin, Bonn. ISSN 0937 – 1664.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD), 2011: *WitterungsReportExpress 05-10 2011*, Jahrgang 13. Offenbach.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD), 2012: *Online-Wetterlexikon des Deutschen Wetterdienstes*.
- DEUTSCHLÄNDER, T., KOßMANN, M., STEIGERWALD, T., NAMYSLO, J., 2008: Verwendung von Klimaprojektionsdaten für die Stadtklimasimulation. *Klimastatusbericht 2008*, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, S. 13-17.
- ENKE, W., DEUTSCHLÄNDER, T., SCHNEIDER, F., KÜCHLER, W., 2005: Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulations. *Meteorol. Zeitschrift*, **14**, p. 247-257.
- ETLING, D., 1996: *Theoretische Meteorologie*, Vieweg Lehrbuch Meteorologie, Braunschweig/Wiesbaden.
- FOKEN, T. 2003: *Angewandte Meteorologie - Mikrometeorologische Methoden*. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg.
- FRÜH, B., BECKER, P., DEUTSCHLÄNDER, T., HESSEL, J.-D., KOßMANN, M., MIESKES, I., NAMYSLO, J., ROOS, M., SIEVERS, U., STEIGERWALD, T., TURAU, H., WIENERT, U., 2011a: Estimation of climate change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate projections. *Journal Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 50, No. 1, p. 167-184.
- FRÜH, B., KOßMANN, M., ROOS, M., 2011b: Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung. In: Deutscher Wetterdienst (DWD), (Hrsg.): *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*. Nr. **237**. 68 S. Selbstverlag des DWD. Offenbach am Main. 2011.
- GELLERT, J.-F., 1953: Erläuterungen zur Karte der physisch-geographischen Gliederung im Klima-Atlas der Deutschen Demokratischen Republik, In: *Die Physisch Geographischen Einheiten der Deutschen Demokratischen Republik. Meteorologischer und Hydrologischer Dienst der DDR* (Hrsg.), erschienen im Akademie-Verlag, Berlin/Potsdam, 1953.
- GERTH, W. P., CHRISTOFFER, J., 1994: Windkarten von Deutschland. *Met. Zeitschrift*, N.F. **3**, S. 67-77
- GLASER, R., 2007: *Klimageographie – Definitionen, Probleme, Forschungsfelder und Aufgaben/Klimasystem*. In: GEBHARDT, H., GLASER, R., RADTKE, U., REUBER P. (Hrsg.), *Geographie. Physische Geographie und Humangeographie*. München. 2007, S. 190-192.

- GROSS, G., 1989: Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. *Beitr. Phys. Atmosph.* **62**, p. 57-72.
- GROSS, G., ETLING, C., 2003: Numerische Simulationsmodelle. *Promet* 30, Nr. 1-2, 28-38.
- GUTHKE, R., 2009: Saaleweg als eine Chance für den Radverkehr. In: Stadt Jena (Hrsg.), Jena und sein Fluss. Rahmenplan Saale. S. 21.
- HAGEMANN, S., ARPE, K., ROECKNER, E., 2006: Evaluation of the hydrological cycle in the ECHAM5 model. *J. Climate*, **19**, p. 3810–3827.
- HELBIG, A., SCHIRMER, H., 1999: Wirkungsfaktoren im mikro- und mesoklimatischen Scale. Kap. 2, 6-14. In: HELBIG, A., BAUMÜLLER, J., KERSCHGENS, M. J., (Hrsg.): Stadtklima und Luftreinhaltung. 2. vollst. überarb. und erg. Aufl., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- HENDEL, M., 1966: Grundriß einer Klimakunde der Deutschen Landschaften. Teubner-Verlag. Leipzig.
- HENDL, M., 1995: Das Klima der deutschen Mittelgebirgsschwelle. In: LIEDTKE, H., MARCINEK, J., (Hrsg.): Physische Geographie Deutschlands, Gotha, 2. Aufl., 68-86.
- HENDL, M., 2002: Klima. In: LIEDTKE, H., MARCINEK, J. (Hrsg.), Physische Geographie Deutschlands. 3., überarb. und erw. Aufl., Gotha: Klett-Perthes, S. 18-126.
- HOLLWEG, H.-D., FAST, I., HENNEMUTH, B., KEULER, K., KEUP-THIEL, E., LAUTENSCHLAGER, M., LEGUTKE, S., RADTKE, K., ROCKEL, B., SCHUBERT, M., WILL, A., WOLDT, M., WUNRAM, C., 2008: Ensemble simulations over Europe with the regional climate model CLM forced with IPCC AR4 global scenarios. Tech. Rep. no. 3, Model and Data group at the Max-Planck Institut for Meteorology, Hamburg. ISSN printed: 1619-2249, ISSN electronic: p. 1619-2257.
- HUPFER, P., 1996: Unsere Umwelt: Das Klima. Globale und lokale Aspekte. Teubner-Reihe Umwelt. Stuttgart, Leipzig. S. 252 f.
- HUPFER, P., KUTTLER, W., 2006: Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. Begr. Von Ernst Heyer, Neu bearb. Von CHIEMELEWSKI, F.-M, HUPFER, P., KUTTLER, W. und PETHE, H., 12. überarb. Aufl., Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007: Climate Change 2007 – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K. B., TIGNOR, M., MILLER, H., L., (Hrsg.): Cambridge University Press, 996 p.
- JACOB, D., 2001: A Note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the baltic sea drainage basin. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **77**, p. 61–73.
- JACOB, D., 2005: REMO Climate of the 20th century run No. 006210, 1950-2000 und A1B scenario run No. 006211, 2001-2100. UBA Project, 0.088 degree resolution, 1h Data. CERA-Datenbank: <http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/BrowseExperiments.jsp?proj=REMO-UBA>
- JACOB, D., GÖTTEL, H., KOTLARSKI, S., LORENZ, P., SIECK, K., 2008: Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Tech. Rep. Abschlussbericht zum UFOPLAN Vorhaben 204 41 138, 11, 154 pp, UBA-Reihe „Climate Change“, Dessau.

- KENDON, E. J., ROWELL, D. P., JONES, R. G., BUONOMO, E., 2008: Robustness of future changes in local precipitation extremes. *J. Clim.*, **21**, 4280–4297, doi:10.1175/2008JCLI2082.1.
- KEULER, K., LAUTENSCHLAGER, M., 2006: Climate Simulations with CLM. Climate of the 20th Century run No.1, 1960-2000, Data Stream 2 und Scenario A1B run No.1, 2001-2100, Data Stream 2. European region, MPI-M/MaD. CERA-Datenbank: http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/BrowseExperiments.jsp?proj=CLM_regional_climate_model_runs oder http://dx.doi.org/10.1594/WDCC/CLM_C20_1_D2 (CLM, 20th Century run No.1, 1960-2000, Data Stream 2) und http://dx.doi.org/10.1594/WDCC/CLM_A1B_1_D2 (CLM, Scenario A1B run No.1, 2001-2100, Data Stream 2), [Stand: 30.11.2012].
- KING, E., 1973: Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftabflusses und der Frostgefährdung durch Straßenbauten. In: Deutscher Wetterdienst (DWD), (Hrsg.): *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, Offenbach Bd. **17**, Nr. 130.
- KLOSE, B., 2008: Meteorologie. Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre, Springer-Verlag Berlin u. a., S. 149 f.
- KLUGE, G., MÜLLER-WESTERMEIER, G., 2000: Das Klima ausgewählter Orte der Bundesrepublik Deutschland. Jena. In: Deutscher Wetterdienst (DWD), (Hrsg.): *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*. Nr. **213**. Selbstverlag des DWD. Offenbach am Main. 2000.
- KOCH, H. G., 1953: Wetterheimatkunde von Thüringen. Fischer Verlag, Jena, 190 S.
- KÖHLER, M., 2008: Green facades – a view back and some visions. – Urban Ecosystems. doi: 10.1007/s11252-008-0063-x.
- KOTTEK, M., GRIESER, J., BECK, C., RUDOLF, B. and RUBEL, F., 2006: World Map of Köppen-geiger Climate Classification updated. *Meteorol. Z.*, **15**, 259-263.
- KREIENKAMP, F., ENKE, W., 2006: WETTREG 20C control run 1961-2000 und WETTREG A1B scenario run 2001-2100, UBA Project. CERA-Datenbank: <http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/BrowseExperiments.jsp?proj=WETTREG-UBA>
- KUTTLER, W., 1997: Städtische Klimamodifikation. In: *VDI Berichte* Nr. **1330**, S. 87-108.
- KUTTLER, W., DÜTEMEYER, D., 2003: Umweltmeteorologische Untersuchungsmethoden. In: Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): *Promet*, Meteorologische Fortbildung, Umweltmeteorologie. Jahrgang 30, Heft 1/2. Offenbach a. M., S. 15-27.
- KUTTLER, W., 2009: Klimatologie. In: Grundriss Allgemeine Geographie, UTB 3099. Verlag Ferdinand Schöningh. Paderborn.
- KUTTLER, W., 2009: Zum Klima im urbanen Raum. In: Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): *Klimastatusbericht 2008*. Offenbach/M., S. 6 -12.
- LIEDTKE, H., MARCINEK, J., 2002: Die Deutsche Naturlandschaft – Tektonik, Morphologie und Landschaftsgliederung (Karte im Buchdeckel vorn). In: LIEDTKE, H., MARCINEK, J., (Hrsg.), *Physische Geographie Deutschlands*. Klett-Perthes. 3. überarb. Und erw. Auf. Gotha und Stuttgart
- MATZARAKIS, T., 2001: Die thermische Komponente des Stadtklimas. In: Universität Freiburg (Hrsg.), *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg*, Nr. **6**, Freiburg, 286 S., S. 16.
- MAYER, H., 1987: Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben STADTKLIMA BAYERN. Mitt. Geogr. Gesellschaft München **72**, S. 119-160.

- MAYER, H., 2011: Vortrag zum Thema „Hitzestress im Stadtquartier“ im Rahmen der Veranstaltung Luft-Wasser-Erde-Leben der GeoUnion in Berlin am 27.09.2011. Kurzfassung des Beitrages im Programm von Geo- und Umweltforschung für unsere Gesundheit, 27. September 2011, S. 3.
- MEYNEN, E., SCHMITHÜSEN, J., GELLERT, J. F., NEEF, E., MÜLLER-MINY, H., SCHULTZE, J. H., 1959: Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung und des Deutschen Instituts für Länderkunde, Remagen, Teil 2, 6. Lieferung.
- MÖLLER, F., 1954: Ein Kurzverfahren zur Bestimmung der langwelligen Ausstrahlung dicker Atmosphärenschichten. *Arch. Met. Geophys. Biokl.* A7, S. 158-169.
- NAKICENOVIC, N., SWART, R., (Eds.), 2000: Emissions scenarios - Summary for policymakers. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 20 pp.
- OKE, T. R., 1987: *Boundary Layer Climates*. 2. Aufl., Routledge, London, UK.
- ORLOWSKY, B., GERSTENGARBE, F.-W., WERNER, P. C., 2008: A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theor. Appl. Climatol.*, **92** (3-4), 209–223, doi:10.1007/s00704-007-0352-y.
- PARLOW, E., 2007: Besonderheiten des Stadtklimas. In: GEBHARDT, H., GLASER, R., RADTKE, U., REUBER, P., (Hrsg.), *Geographie. Physische Geographie und Humangeographie*, München, S. 242-246
- ROECKNER, E., BROKOPF, R., ESCH, M., GIORGETTA, M., HAGEMANN, S., KORNBLUEH, L., MANZINI, E., SCHLESE, U., SCHULZWEIDA, U., 2006a: Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *J. Climate*, **19**, p. 3771–3791.
- ROECKNER, E., LAUTENSCHLAGER, M., SCHNEIDER, H., 2006b: IPCC-AR4 MPIECHAM5 T63L31 MPI-OM GR1.5L40 20C3M run no.1: Atmosphere monthly mean values MPImet/MaD Germany. doi: 10.1594/WDC/EH5-T63L31 OMGR1.5L40 20C 1 MM.
- ROEDEL, W., 2000: *Physik unserer Umwelt. Die Atmosphäre: 3., überarb. und aktualisierte Aufl.* – Berlin, Springer, S. 173.
- ROTH, G. D., 2011: *Die BLV-Wetterkunde. Das Standardwerk*. 13. Auflage, Neuausgabe, München, S.174-203.
- SCHÄR, C., VIDALE, P. L., LÜTHI, D., FREI, C., HÄBERLI, C., LINIGER, M. A., APPENZELLER, C., 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* **427**, p. 332–336.
- SIEBERT, J., SIEVERS, U., ZDUNKOWSKI, W., 1992: A one-dimensional simulation of the interaction between land surface processes and the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorology* **59**, p. 1-34.
- SIEVERS, U., 1990: Dreidimensionale Simulationen in Stadtgebieten. *Umweltmeteorologie, Schriftenreihe Band 15: Sitzung des Hauptausschusses II am 7. und 8. Juni in Lahnstein. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Düsseldorf.* S. 92-105.
- SIEVERS, U., 1995: Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen. *Meteorol. Zeitschrift*, N. F. **4**, S. 3-15.
- SIEVERS, U., FORKEL, R., ZDUNKOWSKI, W., 1983: Transport equations for heat and moisture in the soil and their application to boundary layer problems. *Beitr. Phys. Atmosph.* **56**, p. 58-83.

- SIEVERS, U., ZDUNKOWSKI, W., 1986: A microscale urban climate model. *Beitr. Phys. Atmosph.* **59**, S. 13-40.
- SIEVERS, U., 2005: Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. Theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells. In: *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **227**, Offenbach.
- SIEVERS, U., FRÜH, B., 2012: A practical approach to compute short-wave irradiance at the surface of sub-grid scale buildings. *Meteorol. Zeitschrift*. Band 21. Heft 4. p. 349-364.
- THÜRINGER LANDESAMT FÜR STATISTIK (TLS), 2013: Bevölkerung, Mikrozensus, Gebiet. Stand: 31.12.2012, (<http://www.tls.thueringen.de/startseite.asp>)
- TOP 50 Thüringen, 2008: Amtliche Topographische Karten Thüringen 1:50 000. Die interaktive digitale Kartenserie der deutschen Landesvermessung. Version 5, © GeoBasisDE.
- VDI, (Verein Deutscher Ingenieure), 1994: Umweltmeteorologie – Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberfläche – Berechnung der kurz- und langwelligen Strahlung. Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Richtlinie 3789 Blatt 2, Beuth-Verlag, Berlin.
- VDI, (Verein Deutscher Ingenieure), 2008: Umweltmeteorologie – Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima. Beuth-Verlag, Berlin.
- ZDUNKOWSKI, W. G., PAEGLE, J., REILLY, J. P., 1975: The effects of soil moisture upon the atmospheric and soil temperature near the air-soil interface. *Arch. Met. Geophys. Biokl.*, **A24**, p. 245-268.

8 Abkürzungsverzeichnis

A(i)	relativer Wirkungsgrad der effektiven Ausstrahlung (Watt/m ²) im Vergleich zu einer optimalen Abkühlungsfläche (100 % = 30 Watt/m ²) bzw. Bodenenergiefaktor ($A * 100$) in % (Kälteproduktionsrate) (siehe Kapitel 12, Eingabedaten für KLAM_21)
A1B	Bezeichnung für ein relativ gemäßigtes Emissions-Szenario des IPCC-Sonderberichtes über Emissions-Szenarien, das oft als Referenz für Klimaprojektionen herangezogen wird. Es beschreibt u. a. eine Welt mit raschem Wirtschaftswachstum und einer zunächst wachsenden und ab Mitte des 21. Jh. rückläufigen Weltbevölkerung sowie der Einführung neuer, effizienter Technologien – wobei von einer Balance der einzelnen Energiequellen ausgegangen wird.
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BBR	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BG(i)	mittlerer Bedeckungsgrad des Bodens mit Bäumen (siehe Kapitel 12, Eingabedaten für KLAM_21)
BMBau	Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
C20	in diesem Beitrag Bezeichnung für Simulationen für Zeiträume im 20. Jahrhundert (historischer Lauf).
ca.	circa
CERA	Climate and Environmental Retrieval and Archive
CLM	Community Land Model
CORINE	Coordination of Information on the Environment
DWD	Deutscher Wetterdienst
ebd.	ebenda
ect.	et cetera
ECHAM	European Centre Hamburg Model
et al.	und andere

EVAL	Evaluierungslauf
ExWoSt	Experimenteller Wohnungs- und Städtebau
FSU	Friedrich-Schiller-Universität Jena
GeoBasis	GeoBasis DE, Geodaten der deutschen Landesvermessung (länderübergreifende, bundesweite Vertriebsstellen des Amtlichen deutschen Vermessungswesens), Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
GG	Grundgesamtheit
GRZ(i)	„Grundflächenzahl“, d. h. Anteil der bebauten Fläche an der Gesamtfläche (siehe Kapitel 12, Eingabedaten für KLAM_21)
H _{eff}	effektive Kaltluflthöhe
HG(i)	mittlere Gebäudehöhe in m (siehe Kapitel 12, Eingabedaten für KLAM_21)
HV(i)	mittlere Baumhöhe in m (siehe Kapitel 12, Eingabedaten für KLAM_21)
HW	Hochwert
i. d. R.	in der Regel
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JenKAS	Jenaer Klima-Anpassungs-Strategie
Jh.	Jahrhundert
Kap.	Kapitel
KLAM_21	Kaltluftabflussmodell 21
Max.	Maximum
Min.	Minimum
MPI-BGC	Max-Planck-Institut für Biogeochemie
MUKLIMO_3	Mikroskaliges Urbanes Klimamodell 3
NN	Normalnull
NT _{max} ≥25	Sommertage mit einer Tageshöchsttemperatur ≥ 25 °C
NT _{max} ≥30	Heiße Tage mit einer Tageshöchsttemperatur ≥ 30 °C
OBS	klimatologische Kenntage aus Beobachtungen (Werte von Jena/Sternwarte)
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
PLZU	Planzustand
r1, r2, r3	unterschiedliche Realisierungen mit ECHAM5

REMO	Regional Climate Modelling
rhc,max	Tagesmittelwert relative Luftfeuchte = 80 %
rhc,min	Tagesmittelwert relative Luftfeuchte = 42 %
RW	Rechtswert
S.	Seite
SODAR	Sound/Sonic Detecting And Ranging
sog.	sogenannte
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
STAR	STATistical Regional model
Tc,max	Tagesmittelwert Lufttemperatur = 25 °C
Tc,min	Tagesmittelwert Lufttemperatur = 15 °C
ThINK	Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz
Ti	Tagesmitteltemperatur
TK	Topografische Karte
TLUG	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
Tmax	Tagesmaximumtemperatur
Top50	Topografisches Kartenmaterial
u. a.	unter anderem/n
u. U.	unter Umständen
UHI	Urban Heat Island (städtische Wärmeinsel)
UTC	Universal Time Coordinated
v. a.	vor allem
vc,max	Tagesmittelwert Windgeschwindigkeit = 3,0 m/s
vc,min	Tagesmittelwert Windgeschwindigkeit = 0,7 m/s
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
WAI(i)	“wall area index” bzw. Wandflächenindex, das ist das mittlere Verhältnis der Außenwandfläche eines Einzelgebäudes zu dessen Grundfläche (siehe Kapitel 12, Eingabedaten für KLAM_21)

WETTREG WETterlagen-basierte REGionalisierungsmethode

XLAI(i) “leaf area index” bzw. Blattflächenindex, das ist die über die Höhe aufsummierte einseitige Blattfläche eines Baumes im Verhältnis zu seinem Kronenquerschnitt (siehe Kapitel 12, Eingabedaten für KLAM_21)

z. B. zum Beispiel

z. T. zum Teil

Z0G(i) Rauigkeitslänge des Bodens in m ohne Beachtung von explizit spezifizierter Bebauung oder Bewaldung (siehe Kapitel 12, Eingabedaten für KLAM_21)

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage der ExWoSt-Modellstädte im Bundesgebiet (Quelle: http://www.bbsr.bund.de)	8
Abbildung 2: Lage der Stadt Jena (Quelle: TK 1:1 Mio. © GeoBasisDE / TL VermGeo (Karte verändert)).....	11
Abbildung 3: Ansichten von Jena	13
Abbildung 4: Lage der Messstationen und Profilmessrouten (Quelle: TK 1:50 000 © GeoBasisDE / TL VermGeo (Karte verändert))	14
Abbildung 5: Meteorologische Messtechnik an der Fahrzeugfront	16
Abbildung 6: Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur, Jena/Sternwarte 1980/2010 (ohne 1997)	21
Abbildung 7: Mittlere Monatssummen der Niederschlagshöhe, Jena/Sternwarte 1980/2010 (ohne 1997)	24
Abbildung 8: Mittlere Monatssummen der Sonnenscheindauer, Jena/Sternwarte 1981/2003 (ohne 1997)	29
Abbildung 9: Einteilung der Windrichtungen (Windtafel: außen 10°-Einteilung, innen 30°-Sektoren)	30
Abbildung 10: Relative Häufigkeit der Windrichtung und Windgeschwindigkeit, Erfurt-Weimar 2001/2010 (Basis: Stundenwerte)	32
Abbildung 11: Mittlere monatliche Anzahl windschwacher Strahlungsnächte, Erfurt-Weimar 2001/2010.....	34
Abbildung 12: Relative Häufigkeit des Auftretens windschwacher Strahlungsnächte, Erfurt-Weimar 2001/2010.....	35
Abbildung 13: Verlauf der Tagesmittel der Lufttemperatur an den Jenaer Stationen (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel)	41
Abbildung 14: Vergleich der Amplituden der Lufttemperatur der Jenaer Stationen, an denen das Minimum und Maximum der Lufttemperatur erfasst wurde (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel).....	41
Abbildung 15: Verlauf der Tagesminima und -maxima der Lufttemperatur an den temporären Jenaer Stationen (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel)	42
Abbildung 16: Tagesgänge der Lufttemperatur an den temporären Jenaer Stationen während einer Strahlungswetterlage (vom 05.05. bis 10.05.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel)	43
Abbildung 17: Verlauf der Tagesmittel der relativen Luftfeuchte an den Jenaer Stationen (vom 01.05. bis 30.09.2011 – ausgenommen Station Saaleaue (Messausfall), Basis: 10-Minuten-Mittel).....	44
Abbildung 18: Windrosen der Jenaer Stationen, (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel).....	46

Abbildung 19: Relative Häufigkeit der Windrichtung und -geschwindigkeit für windschwache Strahlungsnächte (19:30 - 06:00 Uhr UTC), Station Gembdental (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel)	47
Abbildung 20: Relative Häufigkeit der Windrichtung und -geschwindigkeit für windschwache Strahlungsnächte (19:30 - 06:00 Uhr UTC), Station Stadion (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel).....	48
Abbildung 21: Sodargramm der Windvektoren für den Standort Jena Stadion, vom 07.05. bis 08.05.2011 (Basis: 10-Minuten-Mittel des Windvektors für ausgewählte Höhen über Grund in m).....	50
Abbildung 22: Sodargramm der Windrichtung für den Standort Jena Stadion, vom 23.09.2011 (Basis: 10-Minuten-Mittel des Windvektors für ausgewählte Höhen über Grund in m).....	51
Abbildung 23: Sodargramm der Windgeschwindigkeit für den Standort Jena Stadion, vom 23.09.2011 (Basis: 10-Minuten-Mittel des Windvektors für ausgewählte Höhen über Grund in m).....	51
Abbildung 24: Sodargramm der Windrichtung für den Standort Jena Stadion, vom 03.10.2011 (Basis 10-Minuten-Mittel des Windvektors für ausgewählte Höhen über Grund in m).....	52
Abbildung 25: Sodargramm der Windgeschwindigkeit für den Standort Jena Stadion, vom 03.10.2011 (Basis: 10-Minuten-Mittel des Windvektors für ausgewählte Höhen über Grund in m).....	52
Abbildung 26: Sodargramm der Windrichtung für den Standort Jena Stadion, vom 01.06.2011 (Basis 10-Minuten-Mittel des Windvektors für ausgewählte Höhen über Grund in m).....	53
Abbildung 27: Sodargramm der Windgeschwindigkeit für den Standort Jena Stadion, vom 02.06.2011 (Basis: 10-Minuten-Mittel des Windvektors für ausgewählte Höhen über Grund in m).....	53
Abbildung 28: Profilmessfahrt, 06.05.2011, abends Süd von 18:57 bis 19:50 Uhr UTC (TK 1:50 000, © GeoBasisDE / TL VermGeo)	54
Abbildung 29: Profilmessfahrt, 06.05.2011, abends Nord von 19:53 bis 20:39 Uhr UTC (TK 1:50 000, © GeoBasisDE / TL VermGeo)	56
Abbildung 30: Profilmessfahrt, 06.05.2011, mittags Süd von 12:10 bis 13:05 Uhr UTC (TK 1:50 000, © GeoBasisDE / TL VermGeo)	57
Abbildung 31: Profilmessfahrt, 06.05.2011, mittags Nord von 13:22 bis 14:15 Uhr UTC (TK 1:50 000, © GeoBasisDE / TL VermGeo)	58
Abbildung 32: Profilmessfahrt, 07.05.2011, früh Süd von 01:31 bis 02:19 Uhr UTC (TK 1:50 000, © GeoBasisDE / TL VermGeo).....	59
Abbildung 33: Profilmessfahrt, 07.05.2011, früh Nord von 02:22 bis 03:04 Uhr UTC (TK 1:50 000, © GeoBasisDE / TL VermGeo).....	60
Abbildung 34: Schwachwindmessungen vom 05.05. bis 07.05.2011 (Basis: 10-Minuten-Mittel)	61

Abbildung 35: Schwachwindmessungen vom 22.08. bis 23.08.2011 (Basis: 10-Minuten-Mittel)	62
Abbildung 36: Windrichtung und Windgeschwindigkeit am Standort Jena Kunitz während der Durchführung der Rauchschwadenversuche am 30.09.2011 (von 03:20 bis 05:45 Uhr, UTC).....	63
Abbildung 37: Ausbreitung und Absinken der Rauchfahne nach der Zündung (Versuch 2)	63
Abbildung 38: Geländehöhe in m über NN mit Flächennutzung im Gesamtrechengebiet um Jena (75 km x 75 km) einschließlich größtem Kerngebiet für den Istzustand im 50-Meter-Raster.....	98
Abbildung 39: Geländehöhe in m über NN mit Flächennutzung im größten Kerngebiet um Jena (30 km * 30 km) mit Lage der Messstationen für den Istzustand im 50-Meter-Raster	99
Abbildung 40: Geländehöhe in m über NN mit Flächennutzung im mittleren Kerngebiet um Jena (23 km * 17 km) mit Lage der Messstationen für den Istzustand im 50-Meter-Raster	99
Abbildung 41: Effektive Kaltfluthöhe und Strömungsfeld im Höhenmittel im Kerngebiet um Jena (23 km * 17 km) nach einer Stunde	107
Abbildung 42: Effektive Kaltfluthöhe und Strömungsfeld im Höhenmittel im Kerngebiet um Jena (23 km * 17 km) nach vier Stunden.....	109
Abbildung 43: Effektive Kaltfluthöhe und Strömungsfeld im Höhenmittel im Kerngebiet um Jena (23 km * 17 km) nach acht Stunden	110
Abbildung 44: Kaltfluthöhe und Normalkomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s nach einer Stunde (Geländequerschnitt)	111
Abbildung 45: Kaltfluthöhe und Normalkomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s nach vier Stunden (Geländequerschnitt)	112
Abbildung 46: Kaltfluthöhe und Normalkomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s nach acht Stunden (Geländequerschnitt).....	113
Abbildung 47: Betrag und Richtung des Kaltluftvolumenstroms im Kerngebiet um Jena (23 km * 17 km) nach einer Stunde	114
Abbildung 48: Betrag und Richtung des Kaltluftvolumenstroms im Kerngebiet um Jena (23 km * 17 km) nach vier Stunden.....	114
Abbildung 49: Betrag und Richtung des Kaltluftvolumenstroms im Kerngebiet um Jena (23 km * 17 km) nach acht Stunden.....	115
Abbildung 50: Geländehöhen und Flächennutzungsklassen im Planzustand im Kerngebiet um Jena (23 km * 17 km) mit Lage der Messstationen	116
Abbildung 51: Geschwindigkeitsdifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach einer Stunde über die Höhe gemittelt	118

Abbildung 52: Geschwindigkeitsdifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach vier Stunden über die Höhe gemittelt	119
Abbildung 53: Geschwindigkeitsdifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach acht Stunden über die Höhe gemittelt.....	120
Abbildung 54: Kaltluflhöhendifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach 30 Minuten.....	121
Abbildung 55: Kaltluflhöhendifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach 90 Minuten.....	122
Abbildung 56: Kaltluflhöhendifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach zwei Stunden.....	123
Abbildung 57: Kaltluftvolumenstromdifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach einer Stunde	124
Abbildung 58: Kaltluftvolumenstromdifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach vier Stunden.....	125
Abbildung 59: Kaltluftvolumenstromdifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach acht Stunden	126
Abbildung 60: Kaltluflhöhe und Normalkomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s nach einer Stunde, Planzustand (Geländequerschnitt)	127
Abbildung 61: Kaltluflhöhe und Normalkomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s nach vier Stunden, Planzustand (Geländequerschnitt).....	128
Abbildung 62: Kaltluflhöhe und Normalkomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s nach acht Stunden, Planzustand (Geländequerschnitt)	129
Abbildung 63: Schematische Darstellung der räumlichen Verfeinerung (Downscaling) der Klimasimulationsrechnungen von der globalen Skala zur städtischen Skala. Die auf IPCC Emissionsszenarien basierenden globalen Klimasimulationen dienen als Antrieb für ein Ensemble höher auflösender regionaler Klimamodelle. Die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle dienen wiederum als Eingabedaten des Stadtklimamodells MUKLIMO_3 zur Berechnung der Änderung des urbanen Klimas.....	142
Abbildung 64: Skizze des Quaders zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der multiplen linearen Interpolation. Die Quadereckpunkte werden durch Tagesmittelwerte der Lufttemperatur T_e , der relativen Luftfeuchtigkeit rh_e und der Windgeschwindigkeit v_e bestimmt und sind für Jena in Tabelle 16 aufgelistet.....	145
Abbildung 65: Skizze der Arbeitsschritte zur Berechnung der räumlich hoch aufgelösten Änderung der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen in einer Stadt, beispielhaft für die zwei Hauptwindrichtungen NO und SW. Das Verfahren basiert auf der hoch aufgelösten Simulation von einzelnen Tagesgängen mit MUKLIMO_3 und auf 30-jährigen regionalen Klimazeitreihen, die als Tageswerte entweder aus Beobachtungen oder regionalen Klimaprojektionen vorliegen. Weitere Details sind im Text erläutert. .	146
Abbildung 66: Änderung der 30-jährigen Mitteltemperatur in Deutschland aus den Klimaprojektionsrechnungen für Vergangenheit und Zukunft (C20 und A1B, gleitendes Mittel) im Vergleich zur Referenzperiode 1971/2000.....	148

Abbildung 67: Geländehöhe im MUKLIMO_3-Modellgebiet. Rechts: Gesamtes Modellgebiet. Links: Inneres Modellgebiet. Das politische Stadtgebiet von Jena ist durch eine strichlierte Linie gekennzeichnet. Die strichpunktierte Linie markiert das für die Signifikanzprüfung der Modellergebnisse festgelegte Innenstadtgebiet von Jena.....	149
Abbildung 68: Landnutzung im MUKLIMO_3-Modellgebiet. Rechts: Gesamtes Modellgebiet. Links: Inneres Modellgebiet. Das politische Stadtgebiet von Jena ist durch eine strichlierte Linie gekennzeichnet. Die strichpunktierte Linie markiert das für die Signifikanzprüfung der Modellergebnisse festgelegte Innenstadtgebiet von Jena.....	150
Abbildung 69: Beispiele zu ausgewählten Landnutzungsklassen in Jena (CIR/OBK Luftbilddaten der Stadt Jena.....	151
Abbildung 70: Relative Häufigkeit der Windrichtung und Windgeschwindigkeit, Artern 1971/2000 (Basis: Stundenwerte)	154
Abbildung 71: Lufttemperatur und horizontale Windvektoren in 5 m über Grund um 14 Uhr MESZ für die Anströmung NO mit der Initialisierung $T_{c,max} = 25 \text{ °C}$, $rh_{c,max} = 80 \%$ und $v_{c,min} = 0,7 \text{ m/s}$	156
Abbildung 72: Lufttemperatur und horizontale Windvektoren in 5 m über Grund um 00 Uhr MESZ für die Anströmung NO mit der Initialisierung $T_{c,max} = 25 \text{ °C}$, $rh_{c,max} = 80 \%$ und $v_{c,min} = 0,7 \text{ m/s}$	157
Abbildung 73: Mittlere jährliche Anzahl der Sommertage im inneren Modellgebiet für den Evaluierungslauf 1971/2000. Die Position der DWD-Messstation Jena/Sternwarte ist mit einem '+' gekennzeichnet.	159
Abbildung 74: Mittlere jährliche Anzahl der heißen Tage im inneren Modellgebiet für den Evaluierungslauf 1971/2000. Die Position der DWD-Messstation Jena/Sternwarte ist mit einem '+' gekennzeichnet.	160
Abbildung 75: Box-Whisker-Plots für jede Landnutzungsklasse im Mittel über das Innenstadtgebiet von Jena für 1971/2000 (EVAL) für die mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen (a) und heißen Tagen (b). Die beiden linken Klassen beziehen sich jeweils auf die Anzahl der Tage gemittelt über alle Landnutzungsklassen (1. Klasse von links) bzw. gemittelt über alle Landnutzungen mit Ausnahme des Waldes (2. Klasse von links). Die Zahlen über den Box-Whiskers geben die Anzahl der Gitterzellen für jede Landnutzungsklasse an.	162
Abbildung 76: Geplante Landnutzung (a) im Vergleich zur bisherigen Landnutzung (b). Weiße Flächen bedeuten keine Änderung der Landnutzung. Graue Linien zeigen den Verlauf wichtiger Straßen.	163
Abbildung 77: Planspiel einer Landnutzungsänderung (a) im Vergleich zur bisherigen Landnutzung (b). Weiße Flächen bedeuten keine Änderung der Landnutzung. Graue Linien zeigen den Verlauf wichtiger Straßen.....	164
Abbildung 78: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage durch die Landnutzungsänderungen für den Planzustand (a) und das Planspiel (b) im Zeitraum 1971/2000 (EVAL).	165
Abbildung 79: Mittlere jährliche Anzahl der Sommertage ($N_{T_{max} \geq 25}$) im inneren Modellgebiet aus REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d) für 1971/2000 (C20).	167

Abbildung 80: Box-Whisker-Plots für die mittlere jährliche Anzahl der Sommertage (a) und heißen Tage (b) gemittelt über das Innenstadtgebiet von Jena für EVAL (grau), REMO (blau), CLM (rot), WETTREG (grün) und STAR (magenta) für den Zeitraum 1971/2000.....	168
Abbildung 81: Mittlere jährliche Anzahl der heißen Tage ($N_{T_{max} \geq 30}$) im inneren Modellgebiet aus REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d) für 1971/2000 (C20).	169
Abbildung 82: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ($\Delta N_{T_{max} \geq 25}$) im inneren Modellgebiet als Differenz zwischen den Zeiträumen 2021/2050 (A1B) und 1971/2000 (C20) für REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d).	171
Abbildung 83: Box-Whisker-Plots für die Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage und der heißen Tage 2021/2050 (A1B) im Vergleich zu 1971/2000 (C20) für REMO (blau), CLM (rot), STAR (magenta) und WETTREG (grün) gemittelt über das Innenstadtgebiet von Jena.	172
Abbildung 84: Box-Whisker-Plots für die Änderung der Anzahl der Sommertage 2021/2050 (A1B) im Vergleich zu 1971/2000 (C20) gemittelt über die einzelnen Landnutzungsklassen im Innenstadtgebiet von Jena. Die Ergebnisse für REMO (schräg schraffiert), CLM (ausgefüllt), WETTREG (längs schraffiert) und STAR (kreuz schraffiert) sind für jede Landnutzung in dieser Reihenfolge dargestellt.	173
Abbildung 85: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der heißen Tage ($\Delta N_{T_{max} \geq 30}$) im inneren Modellgebiet als Differenz zwischen den Zeiträumen 2021/2050 (A1B) und 1971/2000 (C20) für REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d).	174
Abbildung 86: Box-Whisker-Plots für die Änderung der Anzahl der heißen Tage 2021/2050 (A1B) im Vergleich zu 1971/2000 (C20) gemittelt über die einzelnen Landnutzungsklassen im Innenstadtgebiet von Jena. Die Ergebnisse für REMO (schräg schraffiert), CLM (ausgefüllt), WETTREG (längs schraffiert) und STAR (kreuz schraffiert) sind für jede Landnutzung in dieser Reihenfolge dargestellt.	176
Abbildung 87: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage im inneren Modellgebiet auf Grund der geplanten Landnutzungsänderung und der Klimaänderung bis 2021/2050 (A1B) im Vergleich zu 1971/2000 (C20), für REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d).	177
Abbildung 88: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der heißen Tage im inneren Modellgebiet auf Grund der geplanten Landnutzungsänderung und der Klimaänderung bis 2021/2050 (A1B) im Vergleich zu 1971/2000 (C20), für REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d).	178

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Statistische Angaben Jena im Vergleich mit anderen Städten Thüringens (THÜRINGER LANDESAMT FÜR STATISTIK, Stand: 31.12.2012)	11
Tabelle 2: Merkmale der verwendeten Wetterstationen	15
Tabelle 3: Übersicht zu den Profilmessfahrten im Mai 2011.....	17
Tabelle 4: Angaben zur Lufttemperatur, Jena/Sternwarte 1980/2010 (ohne 1997)	22
Tabelle 5: Angaben zu Ereignistagen, Jena/Sternwarte 1980/2010 (ohne 1997).....	23
Tabelle 6: Angaben zum Niederschlag, Jena/Sternwarte 1980/2010 (ohne 1997)	25
Tabelle 7: Angaben zur Schneedecke und zur Schneehöhe, Jena/Sternwarte 1980/2010 (ohne 1997)	26
Tabelle 8: Angaben zur relativen Luftfeuchte und zum Nebel, Jena/Sternwarte 1980/2010 (ohne 1997)	26
Tabelle 9: Angaben zur Sonnenscheindauer, Jena/Sternwarte 1981/2003 (ohne 1997), und zum Bedeckungsgrad, Jena/Sternwarte 1980/2010 (ohne 1997)	28
Tabelle 10: Mittlere monatliche und jährliche Häufigkeit des Auftretens windschwacher Strahlungsnächte, Erfurt-Weimar 2001/2010	34
Tabelle 11: Vergleich der Monatsmittel der Lufttemperatur [°C] an den Jenaer Stationen (01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel).....	40
Tabelle 12: Amplitude der Lufttemperatur [°C] für ausgewählte Tage (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel).....	43
Tabelle 13: Anzahl an Ereignistagen (absolut, GG: 153) an den Jenaer Stationen (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel)	44
Tabelle 14: Monatsmittel der relativen Luftfeuchte [%] an den Jenaer Stationen (vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel)	45
Tabelle 15: Zuordnung der für die Simulation benutzten Modellparameter Rauigkeitslänge „ZOG _(i) “ und Kälteproduktionsrate „A“ sowie weiterer Modellparameter in Abhängigkeit von der Landnutzungsklasse	101
Tabelle 16: Statistische Parameter zur Beschreibung der städtischen Bebauung für die MUKLIMO_3 Landnutzungsklassen: mittlerer prozentualer Gebäudegrundflächenanteil γ_b , mittlere Gebäudehöhe h_b in m, mittlerer Wandflächenindex w_b und mittlerer prozentualer Versiegelung der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden v	143
Tabelle 17: Vorgegebene Tagesmittelwerte bodennaher Klimaparameter für die in Abbildung 64 illustrierten acht MUKLIMO_3-Eckpunktsimulationen der Quadermethode.	152
Tabelle 18: Vergleich der beobachteten und simulierten Klimaindizes für 1971/2000 (mittlere jährliche Anzahl der Tage). Die Werte OBS stammen von der Messstation Jena/Sternwarte. Die Werte unter EVAL resultieren aus der Quadermethode (siehe Text). Proz. Abw. steht für prozentuale Abweichung von EVAL zu OBS.	158

Tabelle 19: Minimum und Maximum der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage und heißen Tage in Jena aufgrund von Landnutzungsänderungen des Planzustandes und des Planspiels im Zeitraum 1971/2000.....	165
Tabelle 20: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage zusammen mit dem räumlichen Mittel des Konfidenzintervalls auf dem 90%-Signifikanzniveau für EVAL, REMO, CLM, WETTREG und STAR, jeweils bezogen auf das Innenstadtgebiet von Jena (1971/2000).....	168
Tabelle 21: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der mittleren jährlichen Anzahl der heißen Tage zusammen mit dem räumlichen Mittel des Konfidenzintervalls auf dem 90%-Signifikanzniveau für EVAL, REMO, CLM, WETTREG und STAR, jeweils bezogen auf das Innenstadtgebiet von Jena (1971/2000).....	168
Tabelle 22: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage ($\Delta N_{T_{max} \geq 25}$) zusammen mit dem räumlichen Mittel des Konfidenzintervalls auf dem 90%-Signifikanzniveau für REMO, CLM, WETTREG und STAR. Die Werte zeigen die Differenz zwischen den Zeiträumen 2021/2050 (A1B) und 1971/2000 (C20), gemittelt über das Innenstadtgebiet von Jena.	170
Tabelle 23: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der heißen Tage ($\Delta N_{T_{max} \geq 30}$) zusammen mit dem räumlichen Mittel des Konfidenzintervalls auf dem 90%-Signifikanzniveau für REMO, CLM, WETTREG und STAR. Die Werte zeigen die Differenz zwischen den Zeiträumen 2021/2050 (A1B) und 1971/2000 (C20), gemittelt über das Innenstadtgebiet von Jena.	175
Tabelle 24: Maximale Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ($\Delta N_{T_{max} \geq 25}$) und der Anzahl der heißen Tage ($\Delta N_{T_{max} \geq 30}$) für REMO, CLM, WETTREG und STAR. Die Werte zeigen die Differenz zwischen dem Zeitraum 2021/2050 (A1B) mit geplanter Landnutzungsänderung und 1971/2000 (C20) ohne Landnutzungsänderung im Innenstadtgebiet von Jena.	179

11 Glossar

Aerosol

Meteorologisch: natürliche und vom Menschen verursachte Beimengungen der Atmosphäre, d. h. feinste feste und flüssige Partikel, die in der Luft schweben (auch Aerosolkerne) wie z. B. Ruß und Staub, Salzteilchen aus der Gischt der Meere, Sporen

Ausstrahlung (in der Meteorologie)

Energieabgabe eines Körpers in Form optischer Strahlung; quantitativ durch die strahlungsphysikalischen Größen Ausstrahlung und Ausstrahlungsstärke charakterisiert. Meteorologische Strahlungskomponenten der Ausstrahlung sind z. B. die Ausstrahlung der Erdoberfläche und der Atmosphäre.

Bedeckungsgrad des Himmels mit Wolken

kurz: Bedeckungsgrad; Anteil des Himmels, der durch Wolken bedeckt ist, angegeben in Achteln (Okta).

Blattflächendichte

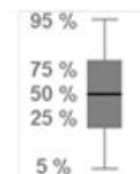
Blattfläche pro Gittervolumen in m^2m^{-3}

Blattflächenindex (LAI)

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

Box-Whisker-Plot

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



Eistag

Tag mit einem Tagesmaximum der Lufttemperatur $< 0,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Bezugszeitraum von 21:30 Uhr MEZ des Vortages bis 21:30 Uhr MEZ des Messtages.

Frosttag

Tag mit einem Tagesminimum der Lufttemperatur $< 0,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Bezugszeitraum von 21:30 Uhr MEZ des Vortages bis 21:30 Uhr MEZ des Messtages.

Gewitter

Eine oder mehrere plötzliche luftelektrische Entladung(en), die sich durch ein kurzes Aufleuchten (Blitz) und ein krachendes oder rollendes Geräusch (Donner) äußern.

heißer Tag

Tag mit einem Tagesmaximum der Lufttemperatur $\geq 30,0$ °C. Bezugszeitraum von 21:30 Uhr MEZ des Vortages bis 21:30 Uhr MEZ des Messtages.

heiterer Tag

Tag mit einem Tagesmittel des Bedeckungsgrades des Himmels mit Wolken $< 1,6$ Achtel.

Inversion

Die in einer mehr oder weniger dicken Schicht der Atmosphäre auftretende Zunahme der Lufttemperatur mit der Höhe über Grund.

Kelvin (K)

Absolute Temperaturskala, wird auch als Maß für Temperaturdifferenzen benutzt. Die Differenz von 1 K entspricht dabei der Temperaturdifferenz von 1 °C.

Klima-Michel-Modell

Objektives Bewertungsverfahren für die Bedingungen der Wärmebilanz des Menschen.

Luftfeuchte, relative

Verhältnis des vorhandenen Wasserdampfdruckes zu dem bei der herrschenden Lufttemperatur möglichen Sättigungsdampfdruckes über Wasser, angegeben in %.

Lufttemperatur

Meteorologische Größe, die den Wärmezustand der Luft charakterisiert, angegeben in °C. Die Lufttemperatur wird mit einem der Luft ausgesetzten Thermometer gemessen, das vor kurz- und langwelliger Strahlung sowie vor Niederschlag geschützt und im Allgemeinen in einer Höhe von 2 m über Grund angeordnet ist.

Lufttrübung

s. Trübung

meteorologische Größe

Merkmal eines Zustandes, eines Vorgangs oder einer Erscheinung in der Atmosphäre, das qualitativ charakterisiert und quantitativ ermittelt werden kann.

Nebel

In der Luft schwebende, winzige, meist mikroskopisch kleine Wassertröpfchen, durch die die Sichtweite an der Erdoberfläche herabgesetzt wird. Der Begriff Nebel wird angewendet, wenn die horizontale Sichtweite in Augenhöhe auf weniger als 1 km herabgesetzt ist.

Nebeltag

s. Tag mit Nebel

Niederschlag

Wasser der Atmosphäre, das nach Kondensation oder Sublimation von Wasserdampf in der Lufthülle ausgeschieden wird und infolge der Schwerkraft zur Erdoberfläche fällt. Es werden folgende Niederschläge unterschieden:

- Flüssiger Niederschlag: Regen, Sprühregen, unterkühlter (Sprüh)Regen,
- Fester Niederschlag: Schnee, Schneegriesel, Reifgraupel, Eiskörner, Hagel, Frostgraupel, Eiskörner.

Niederschlagshöhe

Wassermenge aus Niederschlag während eines Zeitintervalls unter Annahme gleichmäßiger Verteilung über einer horizontalen Fläche, ausgedrückt als Wasserhöhe in mm (l/m^2).

Schauer

Kurz andauernder Niederschlag aus konvektiven Wolken.

Sichtweite

Größte Entfernung, in der ein schwarzes Objekt angemessener Ausmaße gegen den Himmelshorizont gesehen oder erkannt werden kann, im Falle der Nachtbeobachtung gesehen oder erkannt werden könnte, wenn die allgemeine Beleuchtung auf normale Tageslichtverhältnisse gebracht würde. In der Meteorologie wird die horizontale Sichtweite angegeben. Das ist die größte Entfernung, in der ein Beobachter ein Objekt sehen und identifizieren kann, das sich in der gleichen horizontalen Ebene wie er selbst befindet.

Sommertag

Tag mit einem Tagesmaximum der Lufttemperatur $\geq 25,0$ °C. Bezugszeitraum von 21:30 Uhr MEZ des Vortages bis 21:30 Uhr MEZ des Messtages.

Sonnenscheindauer

Zeitspanne für das Auftreten direkter Sonnenstrahlung, angegeben in Stunden. Das Verhältnis von tatsächlich gemessener zu astronomisch möglicher Sonnenscheindauer ist die relative Sonnenscheindauer, zumeist angegeben in %.

Sonnenstrahlung (in der Meteorologie)

Optische Strahlung der Sonne, die im System Erde - Atmosphäre auftritt. Die Sonnenstrahlung umfasst in der Nähe der Erdoberfläche den Spektralbereich von etwa 0,3 bis 3,0 μm (300 bis 3000 nm). Komponenten der Sonnenstrahlung sind direkte Sonnenstrahlung, kurzwellige Reflexstrahlung, Himmels- und Globalstrahlung.

Strahlungsnebel

Nebeltyp, der vor allem im Herbst bei windstillen oder windschwachen Strahlungswetterlagen auftritt, wenn sich der Boden und die bodennahen Luftschichten infolge starker nächtlicher Ausstrahlung bis unter die Taupunkttemperatur abgekühlt haben.

Taupunkt

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

Tag mit Nebel

Ein Tag, an dem die horizontale Sichtweite mindestens in einem Sektor von 90° irgendwann zwischen 00:00 Uhr und 24:00 Uhr gesetzlicher Zeit weniger als 1 km beträgt.

trüber Tag

Tag mit einem Tagesmittel des Bedeckungsgrades des Himmels mit Wolken > 6,4 Achtel.

Trübung

Verringerung der Lichtdurchlässigkeit der Atmosphäre durch Aerosole, Wassertröpfchen, Staub, Ruß u. ä., die eine erhöhte Absorption und Streuung der Sonnen- und Himmelsstrahlung verursachen und im Gegensatz zu einer reinen Atmosphäre eine mehr weißliche Himmelsfarbe bewirken.

Wasserdampf

Das in der Atmosphäre in gasförmigem Zustand enthaltene Wasser.

Wasserdampfdruck

Partialdruck des im atmosphärischen Wasserdampf-Luft-Gemisch enthaltenen Wasserdampfes, angegeben in hPa.

Wind

Luftbewegung relativ zur Erdoberfläche. Wenn nicht besonders vermerkt, werden nur die Horizontalkomponenten dieser Bewegung betrachtet.

Windgeschwindigkeit

Der in einer bestimmten Zeiteinheit von der Luft zurückgelegte Weg, angegeben in m/s. Für Windstille Kennzeichen C (Calme, Kalme).

Windrichtung

Himmelsrichtung, aus der der Wind weht; angegeben in Grad - gezählt von geographisch Nord über Ost - oder verbal. Bei Angabe in Grad gilt Nord = 360°, Ost = 90°, Süd = 180° und West = 270°. Für Windstille Kennzeichen C (Calme, Kalme).

Zyklone

Tiefdruckgebiet, Tief, Gebiet relativ niedrigen Luftdrucks, dessen Zentrum den niedrigsten Druckwert aufweist und in der Wetterkarte von einer oder mehreren Isobaren umschlossen ist.

Anlage 1

**Stadtklimasimulationen mit dem Modell KLAM_21 zu den
aktuellen nächtlichen Kaltluftverhältnissen und deren
Veränderung verursacht durch Landnutzungsänderungen
in Jena
- Ein Beitrag zum ExWoSt-Projekt JenKAS -**

Von
Peter-Hinrich Voß, Kristin Hoffmann, Wolfgang Bivour

Deutscher Wetterdienst
Abteilung
Klima- und Umweltberatung
Offenbach/Potsdam, 26.11.2012

Zusammenfassung

Dieser Beitrag (Anlage 1 zum DWD-Bericht 243 „Klimauntersuchungen in Jena für die Anpassung an den Klimawandel und seine erwarteten Folgen“) beschreibt Computersimulationen, die mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des DWD zur Abschätzung der nächtlichen Kaltluftsituation für die Istsituation und eine Planvariante in Jena durchgeführt wurden.

Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes simuliert die zeitliche Entwicklung von Kaltluftflüssen und die Ansammlung von Kaltluft für windschwache Strahlungsnächte, in einem beliebig wählbaren, rechteckig begrenzten Untersuchungsgebiet.

Windschwache Strahlungsnächte, in denen sich auf Grund der unterschiedlichen Strahlungseigenschaften unterschiedlicher Landnutzungen horizontale Unterschiede der Lufttemperatur und damit lokale oder mesoskalige Windsysteme (z. B. Kaltluftflüsse) einstellen können, treten in Jena im Jahresmittel etwa in 36 bis 45 Nächten auf (vgl. DWD-Bericht 243, Kapitel 5.2.6.2). In diesen Nächten kann es in der Jenaer Innenstadt zu um mehr als 4 °C höheren Lufttemperaturen kommen als im etwa gleich hoch gelegenen Umland.

Die KLAM_21-Simulationsergebnisse für die Istsituation zeigen die für Jena typischen Strömungsverhältnisse während einer wolkenfreien, nächtlichen Schwachwindsituation auf. Die Ergebnisse von im Jenaer Stadtgebiet durchgeführten Feldmessungen (vgl. DWD-Bericht 243, Kapitel 5.3) bestätigen die KLAM_21-Simulationsergebnisse für den Istzustand im Großen und Ganzen, d. h. wesentliche Eigenschaften des beobachteten Kaltluftwindfeldes werden recht gut in den KLAM_21-Ergebniskarten wiedergespiegelt (z. B. setzen Kaltluftflüsse bei Strahlungswetterlagen bei/kurz nach Sonnenuntergang ein und Geschwindigkeiten der Kaltluftflüsse sind in den engeren, stärker geneigten Seitentälern – je nach Rauigkeit – zumeist etwas höher als in breiteren, weniger stark geneigten Seitentälern).

Es kann sich, wie die Ergebnisse der KLAM_21-Simulationen für die Istsituation ergeben, während einer windschwachen Strahlungsnacht ein das gesamte Jenaer Saaletal umfassendes thermisch induziertes, regionales Windsystem ausbilden (vgl. ebd.), das der Geländeneigung des Saaletals folgend flussabwärts vordringt. Dieser talabwärts gerichtete nächtliche Wind erreicht dabei im Jenaer Stadtgebiet Geschwindigkeiten von im Mittel etwa 1,0 m/s im Bodenniveau und ab dem Dachniveau um ca. 1,0 bis 2,5 m/s und ggf. darüber hinaus. Er ist während der zweiten Nachthälfte am stärksten ausgeprägt. Auch die Messresultate (vgl. ebd.) bestätigen, dass sich bei Strahlungswetterlagen ein nächtlicher Saaletalwind nachweisen lässt, der insgesamt durch eher geringe Geschwindigkeiten gekennzeichnet ist und in der vertikalen Erstreckung (Mächtigkeit) die höchsten umgebenden Geländekanten (Randhöhen des Saaletals) nicht erreicht.

Die Simulationsergebnisse für die Planungsvariante lassen infolge geplanter Flächennutzungen und damit verbundener – zumeist – erhöhter Rauigkeiten merkliche Änderungen im Kaltluftwindfeld gegenüber der Istsituation erkennen. Davon betroffen sind vor allem Bereiche mit bestehender Wohnbebauung, für die eine Nachverdichtung vorgesehen ist und Bereiche, in denen eine Erweiterung von Industrie- und Gewerbeflächen geplant ist, aber auch die direkte und weitere Umgebung (ca. 1 bis zu etwa 4 km Entfernung) der vorgenannten Flächen. Dabei treten positive und negative Abweichungen gegenüber dem Istzustand (Geschwindigkeitsdifferenzen, Kaltluflhöhendifferenzen, Volumenstromdifferenzen) zumeist in direkter Nachbarschaft zueinander auf.

Für den Planzustand ergibt sich gegenüber dem Istzustand wegen der geänderten Landnutzung und damit verbundener – zumeist – höherer Rauigkeiten eine Geschwindigkeitsverminderung der anströmenden Kaltluft um etwa 0,05 bis maximal 2,0 m/s. In den angrenzenden Arealen oder zwischen den nachträglich verdichteten Flächen kommt es z. T. parallel zu einer Erhöhung der Kaltluftgeschwindigkeit in einem Bereich von ca. 0,05 bis maximal etwa 1,0 m/s.

Die Gebiete, in denen mit einer Änderung der mittleren Kaltfluthöhe gegenüber dem Istzustand zu rechnen ist, erstrecken sich ebenso im Bereich derjenigen Flächen, für die eine veränderte Landnutzung (i. d. R. zusätzliche Bebauung) geplant ist. Dabei kommt es über den im Planzustand neu verdichteten Flächen zu einer Kaltluftabsenkung insbesondere während der ersten Nachthälfte um bis zu maximal 19 m (vgl. Abbildung 55). Die Zunahme der Kaltfluthöhe in benachbarten Arealen beträgt bis zu maximal 19 m (vgl. Abbildung 56).

Kaltluftherhöhungs- und -absenkungsgebiete zeichnen sich am besten während der ersten simulierten Nachthälfte in den Ergebniskarten für den Planzustand gegenüber der Istsituation ab, da zu dieser Zeit die lokale Kaltluftproduktion die Kaltluftadvektion aus dem Umland überwiegt. Zudem ist die lokale Kaltluftproduktion im Planzustand gegenüber dem Istzustand infolge neu geschaffener „Erwärmungsflächen“ (Wegfall von Kaltluftproduktionsflächen infolge baulicher Nach-/Verdichtung) und Strömungshindernisse herabgesetzt. Mit weiterem Anwachsen der Kaltluft über die Simulationszeit gleichen sich anfängliche Unterschiede (Ist- versus Planzustand) jedoch zunehmend aus: Kaltluftadvektion aus dem Umland überwiegt die lokale Kaltluftproduktion im Stadtgebiet etwa ab der Mitte der simulierten Strahlungsnacht und füllt das Saaletal zunehmend mit Kaltluft auf. Die Kaltluftabsenkungsgebiete übersteigen die Kaltluftherhebungsgebiete bezogen auf deren flächenmäßige Ausdehnung (vgl. Abbildung 56).

Änderungen in den Kaltluftvolumenströmen für den Plan- gegenüber dem Istzustand sind sowohl am Beginn als auch am Ende der Simulationszeit auszumachen (Abbildung 58 bis Abbildung 60). Minderungen betragen bis zu maximal ca. 20 m³/ms und sind über den Flächen mit neu erhöhter Rauigkeit zu finden. Erhöhungen treten in direkter Nachbarschaft hierzu auf und betragen bis zu maximal 10 m³/ms.

Die mit der Schaffung neuer „Erwärmungsflächen“ und Strömungshindernisse einhergehenden bzw. zu erwartenden „Verluste“ bzgl. des Kaltluftvolumenstromes (m³/ms) im Planzustand halten sich in relativ engen Grenzen. Am größten fallen sie (gegenüber der Istsituation) mit knapp 7 % zu Beginn der simulierten Strahlungsnacht aus, gleichen sich jedoch zum Ende der Simulationszeit durch Kaltluftadvektion aus der Umgebung annähernd aus. Der Unterschied zum Istzustand beträgt dann im Planzustand, bezogen auf die hier schon sehr mächtige Kaltluftschicht, die das Dachniveau deutlich überschreitet, prozentual nur noch etwa 0,5 %. Die verminderte lokale Kaltluftproduktion und teilweise herabgesetzte Strömungsgeschwindigkeit in den Stadtgebieten wirken sich allgemein vorrangig innerhalb der ersten Nachthälfte in Form einer verzögerten Abkühlung im Jenaer Stadtgebiet aus. Zum Ende der simulierten Strahlungsnacht wird das komplette Stadtgebiet bzw. Jenaer Saaletal im Planzustand – wie auch im Istzustand – gut mit Kaltluft aufgefüllt sein. Kuppen ragen jedoch über die gesamte Simulationszeit aus der Kaltluft heraus (vgl. DWD-Bericht 243, Kapitel 5.3.2 und 5.3.3).

Die Ergebnisse der mittels KLAM_21 für die Stadt Jena simulierten Kaltluftverhältnisse zeigen, dass die berechneten Änderungen infolge der Planvariante nicht oder nur unwesentlich über die politisch-administrative Stadtgrenze hinausgehen.

12 Modellrechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21

12.1 Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21

Das Modell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes ist ein zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftflüssen in orographisch gegliedertem Gelände und dient der Beantwortung von Fragen der Standortplanung, Stadt- und Regionalplanung (SIEVERS 2005).

Das Modell simuliert die Entwicklung von Kaltluftflüssen (vertikale Mächtigkeit und horizontale Strömungsrichtung) und die Ansammlung von Kaltluft in einem beliebig auswählbaren, rechteckig begrenzten Untersuchungsgelände in Abhängigkeit von der Flächennutzung (z. B. Bewuchs, Bebauung, Gewässer) und der damit verbundenen Kälteproduktionsrate (in W/m^2) sowie der „Rauigkeit“ als Maß für den aerodynamischen Widerstand (Bodenreibung) beim Überströmen einer Fläche.

Zudem wird unter Annahme einer für Kaltluftströmungen typischen Form des Vertikalprofils des Windes für bestimmte Fragestellungen aus der mittleren Windgeschwindigkeit der Kaltluftschicht die Windgeschwindigkeit in einer bestimmten Höhe (z. B. 2 m oder 10 m über Grund) berechnet.

Über das jeweils betrachtete Untersuchungsgelände wird ein numerisches Gitter gelegt. Typische Gitterabstände für Modellrechnungen mit KLAM_21 sind dabei 10 m bis 100 m. Beispielhafte Größen für Untersuchungsgebiete liegen bei 50 km^2 bis 500 km^2 . Es sind jedoch bei einer Rasterweite von z. B. 50 m auch Untersuchungsgebiete bis zu 6.000 km^2 möglich.

Jedem Gitterpunkt werden seine Flächennutzung (schematisiert zu insgesamt 9 Nutzungsklassen) sowie seine Geländehöhe zugeordnet. Jede Landnutzungsklasse wiederum entspricht einer fest vorgegebenen Kälteproduktionsrate, einer Rauigkeit sowie weiteren verknüpften Flächenparametern, wie z. B. die Grundflächenzahl, die mittlere Gebäudehöhe, der Wandflächenindex, der Blattflächenindex, die mittlere Baumhöhe und der mittlere Bedeckungsgrad des Bodens mit Bäumen. Außerdem müssen aus dem Gelände herausragende Hindernisse (z. B. Gebäude, Dämme oder Schutzwände), die von der Kaltluft erst dann überwunden werden, wenn sie eine entsprechende Höhe erreicht hat, nicht als Modifikationen der Orografie angesehen werden, sondern können als solche modelliert werden. Das Zusammenspiel dieser Einflussgrößen bestimmt das Entstehen, Fließen und die Ansammlung der Kaltluft im jeweiligen Betrachtungsraum.

An den Gitterpunkten werden die dem Modell zugrunde liegenden thermohydrodynamischen Gleichungen gelöst. Die physikalische Basis bilden prognostische Gleichungen:

- die Bewegungsgleichungen für die zwei Horizontalkomponenten der über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelten Windgeschwindigkeit sowie
- die Bilanzgleichungen für den Kälteinhalt der über jeder Gitterfläche befindlichen Kaltluftsäule.

Sie wurden mit den angedeuteten Vereinfachungen und einigen Zusatzannahmen aus den allgemeingültigen Impuls-, Energie- und Massenerhaltungsgleichungen der Atmosphäre durch Integration über die Höhe der Kaltluftschicht abgeleitet. Aus dem Kälteinhalt einer jeden Säule wird dann (unter der Annahme einer bestimmten Höhenabhängigkeit der Abkühlung) die Kaltluflhöhe errechnet.

Die Modellgleichungen stellen ein System gekoppelter, nichtlinearer partieller Differentialgleichungen dar, welches durch die Gittereinteilung in ein umfangreiches System von Differenzgleichungen überführt wird. Diese werden – als Computerprogramm formuliert – mit geeigneten Randbedingungen und bei Vorgabe verschwindender Anfangswerte numerisch gelöst. Als Resultat ergeben sich die flächenhafte Verteilung der Kaltluflhöhe und ihrer mittleren Fließgeschwindigkeit zu beliebig abfragbaren Simulationszeitpunkten, z. B. nach nur wenigen Minuten oder einer, vier oder acht Stunden.

Mittels KLAM_21 wird, im Unterschied zu vergleichbaren Modellen, für die Prognose der Kaltluflhöhe über jedem Flächenelement modellintern zunächst (als Bilanz aus Kälteproduktion sowie aus Kaltluftzu- und -abflüssen) der Kälteinhalt der zugehörigen Kaltluftsäule berechnet. Die benötigte Kaltluflhöhe wird dann aus dem Kälteinhalt und einer Annahme über das vertikale Temperaturprofil errechnet. Dies erleichtert die numerische Sicherstellung des physikalischen Prinzips der Energieerhaltung.

Bei KLAM_21 kann zusätzlich ein „Regionalwind“ vorgegeben werden, der eine vom Kaltluftgeschehen unbeeinflusste Grundströmung im Modellgebiet repräsentiert, die „von oben“ auf die Kaltluftflüsse einwirkt und sie modifiziert.

Der Simulationszeitraum von acht Stunden insgesamt entspricht der mittleren Andauer einer klaren Nacht während einer windstillen und trockenen Hochdruckwetterlage. Der Start der Simulation liegt dabei kurz vor Sonnenuntergang, d. h. dem Zeitpunkt, zu dem typischerweise die Abkühlung in den untersten Luftschichten beginnt.

Zu Beginn der Simulation wird eine annähernd adiabatisch geschichtete Atmosphäre vorausgesetzt: Es sind keine horizontalen Gradienten der Temperatur und der Luftdichte vorhanden und es erfolgt keine kurzwellige Einstrahlung. Weiterhin soll die langwellige Gegenstrahlung der Atmosphäre zeitlich konstant, horizontal homogen und schwach ausgeprägt sein. Die Differenz der thermischen Ausstrahlung des Bodens und der langwelligen Gegenstrahlung, die sog. effektive Ausstrahlung, bildet dann den Antrieb für die einsetzende Abkühlung der Atmosphäre. Feuchtigkeit und Kondensationsprozesse werden nicht berücksichtigt.

Von KLAM_21 wird ohne weitere Kennzeichnung stets die effektive Kaltluflhöhe (H_{eff}) ausgegeben und die über die Höhe der Kaltluftsäule gemittelten Windgeschwindigkeiten. Die Höhe des Maximums der Windgeschwindigkeiten liegt auf dem Niveau bei etwa einem Viertel der Höhe der effektiven Kaltluflhöhe.

Die effektive Kaltluflhöhe (H_{eff}) beschreibt denjenigen Teil der gesamten Kaltluftsäule, der effektiv zum Antrieb der Kaltluftströmung beiträgt. Damit wird dem Aspekt Rechnung getragen, dass – wie aus Messungen bekannt – meist nur der untere Teil einer Kaltluftsäule direkt in den topografisch bedingten Kaltluftabfluss einbezogen wird, während die Kaltluft in größeren Höhen stagniert oder Teil einer sehr schwachen Ausgleichsströmung ist.

Ein Vergleich zwischen gemessener und mit KLAM_21 simulierter Kaltluflhöhen (jeweils absolute Kaltluflhöhe) weist dazu aus, dass die Abweichungen beider nächtlich anwachsender Kaltluflhöhen zum Ende der Strahlungsnacht nicht mehr als ± 50 m (ca. ± 15 %) betragen (SIEVERS, 2005).

12.2 Das Simulationsgebiet

Die Modellrechnungen für den Ist- und Planzustand wurden für einen größeren Modellbereich Abbildung 38 durchgeführt, um einerseits mögliche Randeffekte bei den

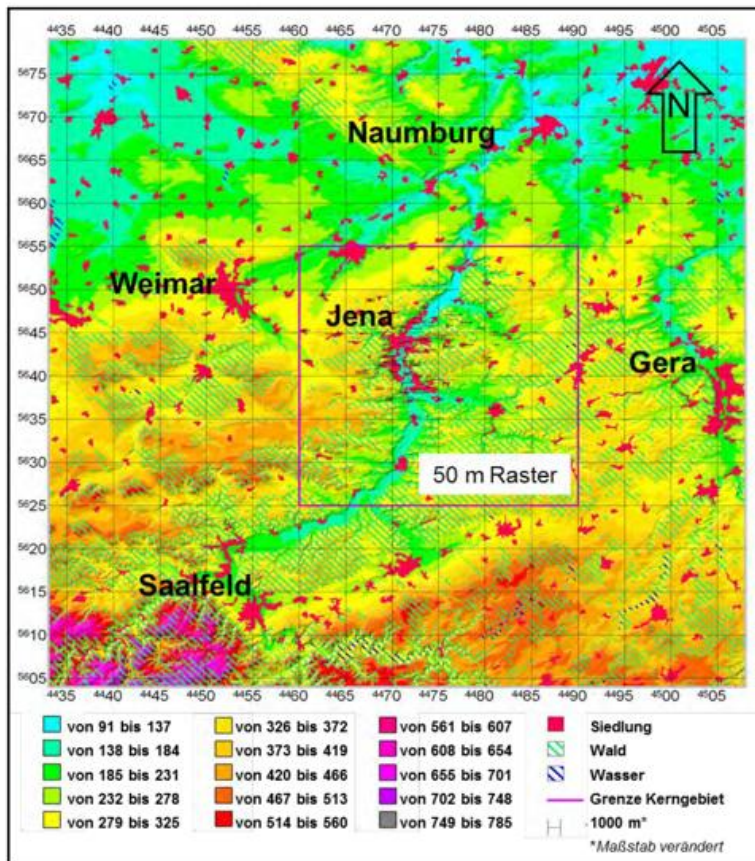


Abbildung 38: Geländehöhe in m über NN mit Flächennutzung im Gesamtrechengebiet um Jena (75 km x 75 km) einschließlich größtem Kerngebiet für den Istzustand im 50-Meter-Raster

Modellrechnungen mit KLAM_21 zu verringern und um andererseits sowohl die wesentlichen Einzugsgebiete der Kaltluft für das Saaletal und seiner Seitentäler möglichst vollständig zu erfassen. Das Modellgebiet ist deshalb im Wesentlichen an den Kaltfluteinzugsgebieten des Saaletals orientiert, das den Bereich von ca. 38 km südlich bis 38 km nördlich Jenas umfasst. In Südwest-Nordost-Richtung erstreckt sich das Rechengebiet entlang der Saale von den nordöstlichen Ausläufern des Thüringer Waldes südwestlich von Rudolstadt bis nach Halle (Saale) im Nordosten.

Das Rechengebiet (Abbildung 38), das mehrere topografische Karten im Maßstab 1:50 000 umfasst, schließt demzufolge eine sehr große Fläche von 5625 km² (entspricht 75 km x 75 km) mit den folgenden Rechts- und Hochwerten ein:

- Rechtswert (RW): 44 33 000 bis 45 08 000,
- Hochwert (HW): 56 04 000 bis 56 79 000.

Zur besseren Visualisierung werden die Ergebnisse allerdings in deutlich kleineren „Kerngebieten“ von beispielsweise 30 km x 30 km (900 km², RW 44 60 bis 44 90 und HW 56 25 bis 56 55, Abbildung 39) und von etwa 23 km x 17 km (391 km², RW 44 60 bis 44 83 und HW 56 34 bis 56 51, Abbildung 40) oder zum übersichtlicheren Aufzeigen der Kaltluftverhältnisse des gesamten Stadtgebietes von Jena sowie von Differenzen des Kaltluftzustandes von Planungs- (PLZU) zum Istzustand in einem noch kleiner gewählten Ausschnittgebiet von 14 km x 16 km (224 km², RW 44 64 bis 44 78 und HW 56 35 bis 56 51, Abbildung 51 bis Abbildung 59) dargestellt und diskutiert.

Das politische Stadtgebiet Jenas liegt vollständig im Modellgebiet bzw. in den Kerngebieten (groß = 30 km x 30 km, mittel = 23 km x 17 km, klein = 14 km x 16 km) und ist in den Kartendarstellungen i. d. R. durch ein weiß strichliertes Polygon gekennzeichnet.

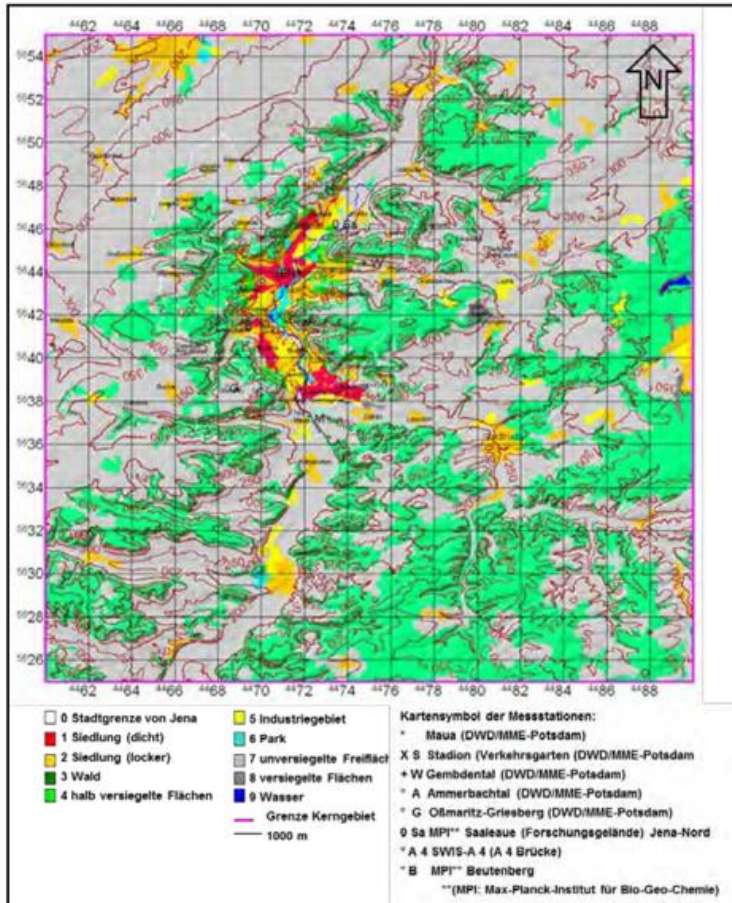


Abbildung 39: Geländehöhe in m über NN mit Flächennutzung im größten Kerngebiet um Jena (30 km * 30 km) mit Lage der Messstationen für den Istzustand im 50-Meter-Raster

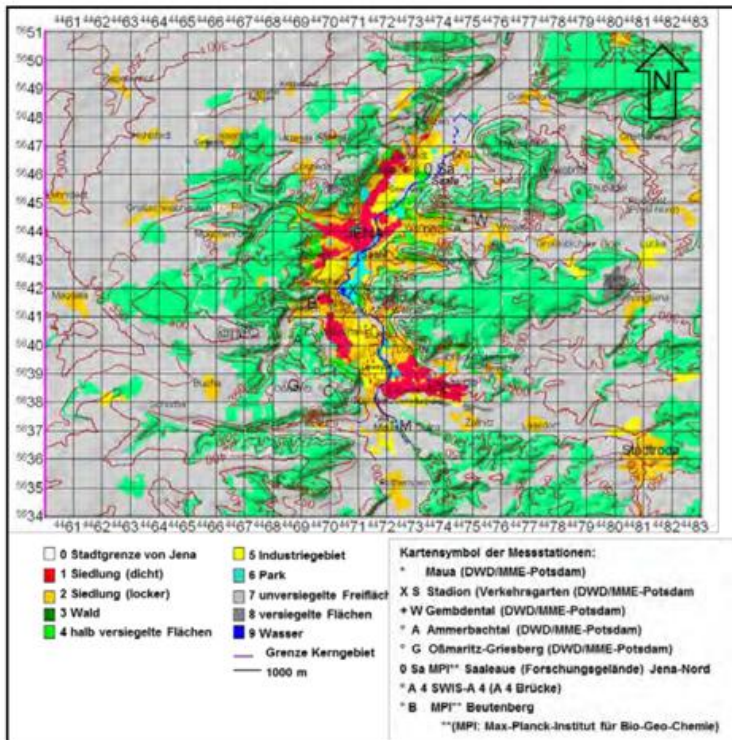


Abbildung 40: Geländehöhe in m über NN mit Flächennutzung im mittleren Kerngebiet um Jena (23 km * 17 km) mit Lage der Messstationen für den Istzustand im 50-Meter-Raster

12.3 Eingabedaten

Die für die Modellsimulationen benötigten Höhen- und Landnutzungsdatensätze des Gesamtmodellgebietes von 75 km x 75 km Ausdehnung in Thüringen im 50-Meter-Raster mit dem Zentrum in Jena, Planunterlagen, Fotos und das Kerngebiet um Jena (23 km * 17 km) mit Lage der Messstationen für den Istzustand im 50-Meter-Raster Kartenmaterial für die Modellierung des Istzustandes (Ist) sowie eines Planungszustandes (PLZU) mit KLAM_21 wurden vom Auftraggeber bis Ende April/Anfang Mai 2011 bereitgestellt. Die Datensätze der Geländehöhe wurden dem DWD als 50-Meter-Höhenrasterdaten (ASCII) übermittelt. Die Landnutzungsdaten wurden von Auftraggeberseite an Hand von CORINE-Landnutzungsdaten außerhalb des Stadtgebietes von Jena und an Hand von hierin einzufügenden 50-Meter-Landnutzungsdaten des Istzustandes sowie eines Planzustandes der Stadtverwaltung Jena im Bereich des Stadtgebietes von Jena bereitgestellt.

Die Modellierung des Geländes erfolgte auf der Grundlage dieses Karten- und Datenmaterials. Als erstes wurde der Istzustand modelliert, im Folgenden der Planzustand (PLZU). Zuletzt wurde in einem dritten Schritt die Differenz zwischen dem Ist- und dem Planzustand gebildet, um Unterschiede im Kaltluftgeschehen hervorzuheben.

Um das Kaltluftabflussmodell anwenden zu können, werden als Eingabewerte digitalisierte topografische Daten in Rasterfeldern benötigt. Für jedes Rasterfeld müssen die Höhe über Normalnull (über NN) und die Flächennutzung (z. B. Bewuchs, Bebauung, Gewässer) bekannt sein. Die Auflösung des Rasters wird in der Regel so groß gewählt, dass alle wesentlichen Strukturen des Geländes auch in den digitalisierten Rasterwerten enthalten sind (Tabelle 15).

Bedeutung der mit den Landnutzungen in Tabelle 15 verknüpften Flächenparametern:

- ZOG(i): Rauigkeitslänge des Bodens in m ohne Beachtung von explizit spezifizierter Bebauung oder Bewaldung
- GRZ(i): „Grundflächenzahl“, d. h. Anteil der bebauten Fläche an der Gesamtfläche
- HG(i): mittlere Gebäudehöhe in m
- WAI(i): „wall area index“ bzw. Wandflächenindex, das ist das mittlere Verhältnis der Wandfläche eines Einzelgebäudes zu dessen Grundfläche
- BG(i): mittlerer Bedeckungsgrad des Bodens mit Bäumen
- XLAI(i): „leaf area index“ bzw. Blattflächenindex, das ist die über die Höhe aufsummierte einseitige Blattfläche eines Baumes im Verhältnis zu seinem Kronenquerschnitt
- HV(i): mittlere Baumhöhe in m
- A(i): relativer Wirkungsgrad der effektiven Ausstrahlung (Watt/m²) im Vergleich zu einer optimalen Abkühlungsfläche (100 % = 30 Watt/m²) bzw. Bodenenergiefaktor ($A * 100$) in % (Kälteproduktionsrate)

Im vorliegenden Fall erfolgte die Lieferung der Höhenrasterdatei im 50-Meter-Raster sowie die bereits mittels CORINE-Daten generalisierte bzw. für das Stadtgebiet von Jena digitalisierte Landnutzung nach den amtlichen topografischen Karten im Maßstab 1:50 000 durch den Auftraggeber „Stadtverwaltung Jena“. Jedem Gitterpunkt wurde eine der nachfolgenden Landnutzungsklassen zugeordnet: dichte Bebauung = 1, lockere Bebauung = 2, Wald = 3, halb versiegelte Flächen/Gärten = 4, Industriegebiete = 5, Park = 6, unversiegelte Freiflächen = 7, versiegelte Flächen bzw. Verkehrsflächen/Flugplätze = 8 und Gewässer = 9 (z. B. die Saale).

Tabelle 15: Zuordnung der für die Simulation benutzten Modellparameter Rauigkeitslänge „Z0G_(i)“ und Kälteproduktionsrate „A“ sowie weiterer Modellparameter in Abhängigkeit von der Landnutzungsklasse

	Landnutzungs-klasse	Z0G _(i)	GRZ _(i)	HG _(i)	WAI _(i)	BG _(i)	XLAI _(i)	HV _(i)	A _(i)
1	Stadtkern (dichte Bebauung)	0,1	0,6	15,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	Siedlung (lockere Bebauung)	0,1	0,4	8,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,28
3	Wald	0,4	0,0	0,0	0,0	0,9	6,0	20,0	0,57
4	Gärten (halb versiegelte Flächen)	0,05	0,0	0,0	0,0	0,1	3,0	3,0	0,80
5	Industrie-gebiet	0,08	0,6	12,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
6	Parks, Gehölz-pflanzungen	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	6,0	20,0	1,0
7	Unversiegel-te Flächen, landwirt-schaftliche Nutzflächen	0,05	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
8	Versiegelte Flächen (z. B. Autobahn)	0,01	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,28
9	Wasser	0,001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

12.4 Darstellung der Modellergebnisse

Die nachfolgend dargestellten Simulationsergebnisse (12.5) gelten für die im Kapitel 5.2.6.2 des DWD-Berichtes 243 genannten Bedingungen einer windschwachen Strahlungsnacht (idealisierte Modellannahmen). Der Beginn der Simulation kann mit der

Zeit kurz vor Sonnenuntergang gleichgesetzt werden. Von diesem Zeitpunkt an wird über acht Stunden weiter vorwärtsgerechnet bzw. über die Zeit integriert, wobei Ergebnisse in beliebigen Zeitabständen abgespeichert werden können. Um die wichtigsten Charakteristika der Kaltluftströmung im Verlauf der Nacht für die Istsituation zu dokumentieren, sind im vorliegenden Beitrag u. a. die Kaltluflthöhe, Kaltluftvolumenströme und das Windfeld exemplarisch zu drei Terminen verkleinert dargestellt (Abbildung 41 bis Abbildung 49). Die ausgewählten Termine geben i. d. R. die Situation zu Beginn (nach einer Stunde), zur Mitte (nach vier Stunden) und zum Ende (nach acht Stunden) einer windschwachen Strahlungsnacht wieder.

Abbildung 38 zeigt zunächst das Gesamtrechengebiet, in dem der größte verwendete Kernbereich rosa umrandet ist. Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen diesen Kernbereich und das mittlere Kerngebiet (900 km² und 391 km²). Das kleinste Kerngebiet bzw. Ausschnittgebiet (224 km²) wird insbesondere für die Darstellung von Differenzen – Betrachtungen der Kaltluftverhältnisse für den Planzustand im Vergleich zum Istzustand – im Stadtgebiet von Jena herangezogen. Da sich geplante Änderungen der Flächennutzung in relativ engen Grenzen halten, erschien es sinnvoll, für eine bessere Ergebnispräsentation noch etwas weiter in die Stadt hinein zu zoomen.

In Abbildung 41 bis Abbildung 43 und Abbildung 47 bis Abbildung 49 (und Abbildung 50) ist der Übersicht halber nur noch der mittlere Kernbereich (391 km²) um das Stadtgebiet von Jena dargestellt, obwohl jeweils für das gesamte Gebiet gerechnet wurde. Die Gitterweite bzw. die Auflösung des Rechenfeldes beträgt auch hier 50 m. Abbildung 51 bis Abbildung 59 zeigen aus vorgenannten Gründen den kleinsten Kernbereich (224 km²) um das Jenaer Stadtgebiet. Obwohl zu Testzwecken auch im 100-Meter-Raster für ein noch größeres Gesamtgebiet um Jena gerechnet wurde, gehen aus auflösungstechnischen Gründen in den Ergebnissen nur die Karten der Berechnungen im 50-Meter-Raster ein. Kleine Seitentäler im Stadtgebiet von Jena werden so besser aufgelöst und die Ergebnisvisualisierung fällt auf dieser Ebene feiner aus. Auf die Darstellung der Ergebnisse im 100-Meter-Raster wird daher verzichtet.

In den folgenden Abbildungen der Modellergebnisse wird die Höhe des Geländes durch Schummerungseffekte und Höhenisolines repräsentiert. Die Höhen der Kaltluftschicht bzw. die Mächtigkeit der Kaltluftvolumenströme werden durch farbige Flächen wiedergegeben. Wichtige Flächennutzungen (Siedlung, Wald, Wasser, Industriegebiete) sind ebenfalls farbig dargestellt und den Farben für die Kaltluflthöhe bzw. denen für den Kaltluftvolumenstrom i. d. R. als Schraffur überlagert. Die horizontale Fließgeschwindigkeit der Kaltluft bzw. des Volumenstromes ist durch Pfeile unterschiedlicher Länge dargestellt. Damit kann die Richtung und Ergiebigkeit eines Kaltluftflusses etwa in Abhängigkeit von den topografischen und orographischen Umgebungsverhältnissen gezeigt werden. Zugunsten einer übersichtlicheren Darstellung werden die eigentlich im 50-Meter-Abstand vorliegenden Windpfeile lediglich in einem Abstand von 250 oder 500 m gezeichnet. Die Richtung der Pfeile gibt die Richtung an, in die der Wind weht bzw. die Kaltluft fließt. Die Länge der Pfeile ist ein Maß für die Windgeschwindigkeit. Die Legende der nachfolgend gezeigten Karten beginnt mit der Bezeichnung des Simulationslaufes (Ist- oder PLZU- bzw. Sollzustand), dem Modellgebietsausschnitt, den dargestellten Größen (z. B. „Kaltluflthöhe und Strömungsfeld in 2 m Höhe“) sowie dem jeweiligen Zeitpunkt nach Sonnenuntergang, der „Integrationszeit“. Unter der Integrationszeit ist eine Längenskalierung für die Entfernung in m und darunter ist ein Windpfeil dargestellt, dessen Richtung und Länge einem Westwind mit der rechts daneben stehenden Geschwindigkeit in Meter pro Sekunde entspricht und der zur Skalierung der in den Karten dargestellten Windpfeile dient. Zudem enthält die Legende eine Klasseneinteilung (farblich abgestufte Skala) der jeweils dargestellten Größe und ihrer Ausprägung für den Istzustand oder den Planzustand (hier als Differenzangabe: Planzustand minus Istzustand) zum jeweils gezeigten Zeitausschnitt (z. B. Kaltluflthöhe

im Höhenmittel und Normalkomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s, Betrag des Kaltluftvolumenstroms in m^3/ms , Geschwindigkeitsdifferenz im Höhenmittel in m/s). Die zugehörige Maßeinheit ist mit aufgeführt. Die Farbskala der Klasseneinteilung gibt die errechnete Spannbreite der in den Karten dargestellten Größen wieder, d. h. die minimal bis maximal mögliche Ausprägung eines Parameters im Betrachtungsgebiet des jeweiligen Zeitausschnittes. Zusätzlich sind in der Legende die Landnutzungsklassen als farbige Schraffuren aufgeführt.

Bei den nachfolgenden Abbildungen handelt es sich zum Teil um Karten, in denen die Fließrichtung der nächtlichen Kaltluft bzw. des entsprechenden Volumenstromes durch Pfeile unterschiedlicher Längen – je nach Geschwindigkeit – dargestellt ist, und in denen die Höhe (vertikale Mächtigkeit) der Kaltluft zum Beginn, zur Mitte und zum Ende der Nacht eingetragen ist (vgl. DWD-Bericht 243, Kapitel 5.2.6).

In Abbildung 41 ist die Kaltluflthöhe in m im mittleren Modellausschnittgebiet (391 km^2), kombiniert mit dem Strömungsfeld (im Höhenmittel in m/s), für den Zeitpunkt eine Stunde nach Sonnenuntergang für eine Strahlungsnacht dargestellt. Die Talverläufe und Niederungen durchströmende Kaltluft bildet die Fluss- und Seitentäler im Jenaer Raum gelbgrün (Klasse 30 bis 39 m über Grund) bis türkisfarben (Klasse 40 bis 59 m über Grund) ab. Stellenweise werden auch Werte der Klasse 60 bis 99 m über Grund erreicht. Höhenzüge werden in verschiedenen orangefarbenen Nuancen (Klassen 2 m über Grund, 3 bis 4 m über Grund und 5 bis 9 m über Grund) wiedergegeben. Das von Südsüdwest nach Nordnordost verlaufende Saaletal ist in der Abbildung 41 gut erkennbar: hellgrün bis gelb-orange (Klassen 1 m über Grund und 2 bis 3 m über Grund bei Lobeda, Klasse 3 bis 4 m über Grund im historischen Stadtzentrum, Klasse 5 bis 9 m über Grund und Klasse 20 bis 29 m über Grund in den übrigen Stadtgebieten, Klasse 30 bis 39 m über Grund in den dem Stadtgebiet vorgelagerten Auen und Niederungen im Süden und Norden). Neben der Kaltluflthöhe sind Abbildung 41 Informationen zur Strömungsrichtung (Pfeildarstellungen) zu entnehmen.

Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen ebenso die Kaltluflthöhe in m in Kombination mit dem mittleren Strömungsfeld in m/s vier Stunden und acht Stunden nach Sonnenuntergang.

Abbildung 44 bis Abbildung 46 geben einen Überblick zur räumlich-zeitlichen Entwicklung der Kaltluflthöhe und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit (Normalgeschwindigkeit) der Kaltluft im Querschnitt (Schnitt quer zum Saaletal durch das Stadtzentrum Jena mit den Gauß-Krüger-Koordinaten: von RW 44 68 000 bis RW 44 74 000 und HW jeweils 56 42 000). Die farblichen Abstufungen in der Legende von hellgrün zu gelbgrün (Klasse $> 0,5$ bis $1,5 \text{ m/s}$ bzw. $> 0,1$ bis $0,5 \text{ m/s}$), gelb nach blauschwarz bis helltürkis (Klasse $> -0,1$ bis $0,1 \text{ m/s}$ bzw. $> -0,5$ bis $-0,1 \text{ m/s}$ und $> -1,5$ bis $-0,5 \text{ m/s}$) repräsentieren positive bzw. negative mittlere Strömungsgeschwindigkeiten. Dabei sind die positiven Werte als in die Schnittebene hinein gerichtete Strömungen zu deuten (nach Norden). Die negativen Werte sind als aus der Schnittebene heraus gerichtete Strömungen (nach Süden) zu interpretieren. Der Erdboden ist in einem dunklen Orange bzw. hellen Braun dargestellt. Zusätzlich ist in der Legende der betreffenden Abbildungen der Wert für den gesamten berechneten Kaltluftstrom in m^3/s angegeben.

In Abbildung 47 ist der Kaltluftvolumenstrom in m^3/ms im mittleren Modellausschnittgebiet zum Zeitpunkt eine Stunde nach Sonnenuntergang in einer Strahlungsnacht dargestellt. Die Talverläufe werden hier hellgrün (Klassen > 5 bis $10 \text{ m}^3/\text{ms}$ und > 10 bis $20 \text{ m}^3/\text{ms}$), gelb (Klasse > 20 bis $30 \text{ m}^3/\text{ms}$) bis orange (Klasse > 30 bis $50 \text{ m}^3/\text{ms}$) abgebildet. Besonders mächtige Volumenströme zwischen > 50 und $100 \text{ m}^3/\text{ms}$ bzw. > 100 bis $200 \text{ m}^3/\text{ms}$ sind dunkelorange bzw. kaminrot dargestellt. Zusätzlich sind die Strömungsrichtungen (Pfeildarstellungen) eingetragen.

Abbildung 48 zeigt den Kaltluftvolumenstrom vier Stunden nach Sonnenuntergang, incl. Strömungsrichtung. Das Saaletal sowie wichtige Kaltluftlieferanten (Seitentäler) stechen darin deutlich orange (Mächtigkeiten des Kaltluftvolumenstroms von 50 bis 100 m³/ms) bis rot (Mächtigkeiten des Kaltluftvolumenstroms von 100 bis 200 m³/ms) hervor. Punktuell werden auch Werte > 200 m³/ms erreicht (magenta).

Abbildung 49 stellt die Verhältnisse (Kaltluftvolumenstrom und Strömungsrichtung) am Ende der Strahlungsnacht (nach acht Stunden) dar, mit Strömungsmengen von 100 bis 200 m³/ms (karminrot) und darüber hinaus (magenta).

Abbildung 51 bis Abbildung 53 zeigen die für den Planzustand errechneten mittleren Geschwindigkeitsdifferenzen der Kaltluft in m/s gegenüber der Istsituation (vgl. Abbildung 41 bis Abbildung 43). Gezeigt werden wiederum die Termine eine, vier und acht Stunden nach Sonnenuntergang. Grau dargestellt sind Flächen, für die kaum merkliche Änderungen zu erwarten sind (Schwankungen um Null). Gelb (Klasse > -0,1 bis -0,05 m/s) über orange (Klasse > -1,0 bis -0,5 m/s) bis rot (Klasse > -2,0 bis -1,0 m/s) heben sich die Areale ab, für die negative Entwicklungen (herabgesetzte Fließgeschwindigkeiten = negatives Vorzeichen) anzunehmen sind. Hellgrün (Klasse > 0,05 bis 0,1 m/s) bis türkis (Klasse > 0,5 bis 1,0 m/s) sind diejenigen Bereiche dargestellt, für die eine positive Entwicklung (Zunahme der Fließgeschwindigkeit = positives Vorzeichen) zu erwarten ist.

Abbildung 54 bis Abbildung 56 zeigen zu erwartende Veränderungen der Kaltfluthöhe in m im Planzustand (vgl. Abbildung 41 bis Abbildung 43) gegenüber dem Istzustand. Flächenhaft farbig sind in einer Abstufung von gelb (-1 m) über orange (-2 bis -9 m) bis rot (-10 bis -19 m) negative Entwicklungen dargestellt (Minderung der mittleren Kaltfluthöhe in Meter = negatives Vorzeichen). Von gelbgrün (1 m) über grün (2 m), türkis (3 bis 4 m) zu hellblau (5 bis 9 m) und blau (10 bis 19 m) reicht die Spanne der positiven Entwicklungen (Zuwachs der Kaltfluthöhe in Meter = positives Vorzeichen). Grau dargestellt sind Bereiche, für die äußerst geringe oder gar keine Änderungen zu erwarten sind (geringe Schwankung um Null). Es sind lediglich die Termine 30 Minuten, 90 Minuten und zwei Stunden nach Sonnenuntergang abgebildet, weil sich die Veränderungen vom Ist- zum Planzustand insgesamt in relativ engen Grenzen halten. Zudem sind merkliche Veränderungen in Bodennähe – punktuelle Abnahme und/oder Zunahme der Kaltfluthöhe – zwar bis zum Ende der simulierten Nacht vorhanden, aber die größten Auswirkungen sind vornehmlich innerhalb der ersten Stunden nach Sonnenuntergang festzustellen, lassen dann etwa nach einem Viertel der Simulationszeit aber merklich nach. Daher sind in den hier gezeigten Abbildungen Veränderungen während der ersten Nachthälfte (insbesondere während der ersten beiden Stunden) zu entnehmen.

Abbildung 57 bis Abbildung 59 bilden anzunehmende Volumenstromdifferenzen in m³/ms gegenüber dem Istzustand ab (vgl. Abbildung 47 bis Abbildung 49). Auch hier sind negative Entwicklungen, d. h. eine Abnahme des lokalen Volumenstroms über einer Fläche bzw. einem Rasterpunkt (= negatives Vorzeichen) von gelb (Klasse > -1,0 bis -0,5 m³/ms) über verschiedene Orangetöne (Klassen > -10 bis -2 m³/ms) bis rot (Klasse > -20 bis -10 m³/ms) dargestellt. Dies gilt z. B. für Flächen in Lobeda (Umwandlung von Grünflächen in Gewerbeflächen) oder in Maua (Umwandlung von Grünflächen in Wohnflächen). Positive Entwicklungen, d. h. eine Zunahme des Volumenstroms lokal über einem Rasterpunkt (= positives Vorzeichen), sind gelbgrün (Klasse > 0,5 bis 1,0 m³/ms), grün (Klasse > 2 bis 5 m³/ms) und hellblau (Klasse > 5 bis 10 m³/ms) dargestellt.

Abbildung 60 bis Abbildung 62 geben einen Überblick zur räumlich-zeitlichen Entwicklung der Kaltfluthöhe und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit (Normal-

geschwindigkeit) der Kaltluft im Querschnitt (Schnitt quer zum Saaletal durch das Stadtzentrum Jena mit den Gauß-Krüger-Koordinaten: von RW 44 68 000 bis RW 44 74 000 und HW jeweils 56 42 000) für den Planzustand (vgl. Abbildung 44 bis Abbildung 46).

12.5 Modellergebnisse

12.5.1. Der Istzustand

Im Folgenden werden die Kaltluftverhältnisse des Istzustandes der Stadt Jena für jeweils drei nächtliche Termine unter Annahme der Bedingungen einer windschwachen Strahlungsnacht (Abbildung 41 bis Abbildung 49) näher beschrieben. Gezeigt werden die Entwicklung der Kaltluflhöhe (in m über Grund) und des Strömungsfeldes (in m/s im Höhenmittel), die Normalkomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s sowie Betrag und Richtung der Kaltluftvolumenströme in m³/ms.

Im Verlauf einer windschwachen Strahlungsnacht (vgl. DWD-Bericht 243) stellt sich nach und nach ein autochthones Lokalklima ein. Neben der Reliefenergie macht sich vor allem der unterschiedliche Einfluss verschiedener Oberflächen (Wiese, Wald und Freiflächen, bebaute Areale) auf die bodennahen Luftverhältnisse recht frühzeitig, zu Beginn einer Strahlungsnacht, bemerkbar.

Über Flächen, deren Kaltluftproduktion gegen Null geht (z. B. Industrieflächen, Wasserflächen, dichte Bebauung), kann sich im Verlauf einer Strahlungsnacht nur durch Kaltluftadvektion aus der Umgebung eine Kaltluftsäule (Kaltluftmächtigkeit in m über Grund über einem Ort) bilden. Im Prinzip findet ein Ausgleich vom Ort der höheren zur niederen Konzentration statt, bis sich über allen Flächen annähernd ähnliche Kaltluftmächtigkeiten eingestellt haben. Im Verlauf einer Strahlungsnacht gewinnt dieser Ausgleichsprozess, gemeint ist der horizontale Transport von Kaltluft von A nach B, allmählich an Stärke (Geschwindigkeit), flaut nach Erreichen einer maximalen Geschwindigkeit jedoch nach und nach ab, bis er während der Tagstunden ganz zum Erliegen kommt. Dabei differieren die Geschwindigkeiten innerhalb der Kaltluftströmung (vertikal). Am Boden ist die Geschwindigkeit wegen der Bremswirkung des Untergrundes (Oberflächenrauigkeit) vergleichsweise gering. Mit der Höhe und nachlassendem Einfluss der Oberflächenrauigkeit nimmt sie zunächst bis zu einem Maximum zu. Anschließend nimmt die Geschwindigkeit mit der Höhe wieder ab. Anders ausgedrückt: im Bereich zwischen etwa einem Viertel bis knapp zur Hälfte der Höhe der Kaltluftsäule stellt sich eine maximale Windgeschwindigkeit (> 3 m/s) ein.

Das im Hinblick auf klimatische Änderungen der Kaltluftsituation untersuchte Ausschnittgebiet liegt im Bereich eines umfangreichen Kaltluftsammlgebietes im mittleren Saaletal. Neben den bewaldeten, freien Hoch- und Hangflächen rund um Jena sind auch die im Norden und Süden der Stadt vorgelagerten Auen- und Niederungsbereiche gute Kaltluftproduzenten (vgl. Tabelle 15). Flächen, die keine oder wenig Kaltluft produzieren, liegen z. B. im Bereich der dicht bebauten Kernstadt, in Wenigenjena, Lobeda, Jena Nord und Winzerla (vgl. Abbildung 40). Bei letztgenannten handelt es sich um Flächen, die z. T. durch dichte Wohnbebauung oder Industrie- und Gewerbenutzung charakterisiert sind. Diese städtisch geprägten Flächen zeichnen sich wegen ihrer fehlenden oder geringen Kaltluftproduktionsrate vorrangig am Anfang der Strahlungsnacht durch eine merklich niedrigere Kaltluflhöhe aus (Abbildung 41 und Abbildung 44) als Flächen mit einer höheren Kaltluftproduktionsrate. Letztere sind im Bereich des Umlandes (im Norden und Süden der Stadt Jena) und der z. T. wenig bebauten Seitentäler (westliches Ammerbachtal, östliches Gembdental, Laasaner Tal) zu finden. Mit Blick auf das Anwachsen der Kaltluflhöhe über einem Ort (Kaltluftmächtigkeit) überwiegt in der Jenaer Kernstadt zu Beginn der Strahlungsnacht

der Einfluss der lokalen Kaltluftproduktion gegenüber dem der Kaltluftadvektion aus dem Saaletal und den Seitentälern. Lokale Kaltluftproduktion spielt bzgl. der Ausbildung der Kaltluftmächtigkeit in der Kernstadt zunächst anteilig die größere Rolle.

Advektionsvorgänge müssen im Verlauf der Strahlungsnacht erst an Kraft (Mächtigkeit und Fließgeschwindigkeit) gewinnen, um die erhöhten Oberflächenrauigkeiten in den bebauten Arealen zu überwinden und in die Kernstadt einströmen zu können und dort letztlich zum Anwachsen der Kaltfluthöhe beizutragen. Dies geschieht relativ rasch, innerhalb der ersten Nachthälfte einer Strahlungsnacht. Dann profitiert die Jenaer Kernstadt durch Kaltluftadvektion vor allem aus dem südlichen Saaletal und einigen Seitentälern. Die lokal höheren Kaltluftproduktionsraten des Umlandes dominieren bald die lokal niedrigen Kaltluftproduktionsraten der Jenaer Kernstadt. Die Kaltluftmächtigkeit im Kernstadtgebiet nimmt nun vorrangig auf Grund der Advektionsvorgänge zu. Bis zum Ende einer Strahlungsnacht können so selbst in der Kernstadt ähnliche Kaltluftmächtigkeiten entstehen, wie in den Seitentälern oder auf den nördlich der Stadt gelegenen Auenflächen (vgl. Abbildung 43 und Abbildung 46).

Hierzu strömt Kaltluft von den umliegenden Hängen und Seitentälern zunächst senkrecht zur jeweiligen Talachse in die einzelnen Seitentäler und füllt sie langsam mit Kaltluft auf. Die hieraus angeregten talabwärts gerichteten Luftströmungen stagnieren nicht, sondern verlagern sich weiter in Richtung des Gefälles zum Saaletal. Beim Eintritt in das Saaletal kommt es an den südlichen und nördlichen Geländekanten der Talausgänge stellenweise – bedingt durch lokale Kaltluftansammlungen, die Orografie, vorhandenen Bewuchs und Bebauung – zu leichten Ablenkungen in südliche bzw. nördliche Richtungen. Der Ablenkungseffekt in südliche Richtung verliert im Verlauf der Strahlungsnacht jedoch an Einfluss. Der Grund hierfür ist, dass sich das Saaletal zunehmend mit Kaltluft füllt. Es stellt sich allmählich ein stabiler talabwärts gerichteter Kaltluftstrom ein, der gegenüber den Abwinden (Kaltluftzuflüssen) aus den Seitentälern im weiteren Verlauf der Strahlungsnacht an Mächtigkeit und Fließgeschwindigkeit in Richtung Norden gewinnt. Die von den Seitentälern (z. B. Rodatal und Gleistal) einströmende Kaltluft wird schließlich beim Eintritt in das Saaletal vom Saaletalwind „mitgerissen“. Dies ist etwa zur Mitte der Strahlungsnacht der Fall. Zudem verlangsamt sich die Geschwindigkeit der Luftströmungen in den Seitentälern mit anwachsender Kaltluft zum Ende der Strahlungsnacht, wenn diese nahezu mit Kaltluft aufgefüllt sind, während sich der Hauptstrom der Kaltluft (mit Strömungsmaximum bereits deutlich über dem Dachniveau Jenas) entlang der Saale verstärkt (Abbildung 43).

In Jena ist bereits nach einer Stunde Integrationszeit mit einer etwa 10 bis 29 m hohen Kaltluftschicht zu rechnen (Abbildung 41). Punktuelle Abweichungen (höhere oder niedrigere Werte) sind jedoch wegen o. g. Einflussfaktoren nicht auszuschließen. Z. B. zeichnet sich in Teilen von Lobeda-West nach einer Stunde nur eine 1 m hohe Kaltluftschicht ab. Grund hierfür ist u. a. die Bebauung (Plattenbausiedlung) östlich der B 88.

Infolge der starken Überbauung der historischen Jenaer Innenstadt sowie der umgebenden Siedlungsbereiche (z. B. Stadtteile Lobeda, Göschwitz, Wenigenjena) findet in diesen Arealen kaum Kaltluftbildung statt (vgl. Tabelle 15), abgesehen von kleineren v. a. entlang der Saale verlaufenden begrüneten Arealen (Parks, Wiesen, Sport- und Gartenanlagen). Flächen mit geringer und gegen Null gehender Kaltluftproduktion nehmen in der Jenaer Kernstadt einen vergleichsweise großen Anteil ein. Dennoch ist auf Grund der zuvor beschriebenen Entwicklungen etwa nach einer Stunde Integrationszeit auch auf letztgenannten Flächen mit einer Kaltfluthöhe von ca. 19 m zu rechnen (Abbildung 41).

In den der Stadt vorgelagerten Auen beträgt die Kaltluflhöhe zum selben Zeitpunkt ca. 30 bis 39 m, in den Seitentälern werden zwischen 40 und 60 m erreicht, stellenweise sogar knapp 100 m (Abbildung 41). Die im Vergleich zur Innenstadt höhere Kaltluft in den Auen und Seitentälern resultiert aus Kaltluftzuflüssen (Advektion) der nahe gelegenen Berghänge.

Auf den das Stadtgebiet umgebenden Höhenzügen ist die effektive Kaltluflhöhe hingegen deutlich geringer (Abbildung 41) und erreicht nach einer Stunde Integrationszeit teilweise nur eine Höhe von 1 m, an einigen Stellen auch 4 m, vereinzelt sogar bis zu 9 m (z. B. Ansammlung von Kaltluft in konkaven Geländeformen). Die geringere effektive Kaltluflhöhe auf den Anhöhen resultiert aus dem fortwährenden, der Gefälleneigung folgenden Abfluss der hier produzierten Kaltluft in tiefer gelegene Bereiche.

Die Strömungsrichtung gestaltet sich insgesamt einheitlich, d. h. der Richtung des Gefälles folgend tal-/hangabwärts. Allerdings ergeben sich topografie- und orografiebedingt Unterschiede. In den östlich der Saale gelegenen Seitentälern stellt sich – in Abhängigkeit des Talverlaufes – nach einer Stunde ein östlicher Kaltluftstrom ein. In den westlich der Saale gelegenen Seitentälern etabliert sich hingegen ein westlicher Kaltluftstrom (vgl. Abbildung 41). Lediglich im Saaletal selbst ist noch kein eindeutig talabwärts gerichteter Gesamtstrom (Talabwind) erkennbar (vgl. ebd.). Es lassen sich im Stadtgebiet entlang der Saale leichte nördliche, südliche, aber auch westliche und östliche Strömungen identifizieren, vor allem im Bereich zwischen den Talausgängen des Pennickentals und des Gembdentals, aber auch im Bereich der Unteren Aue und um den Talausgang des Gleistals (vgl. ebd.). Dies findet seine Begründung u. a. in

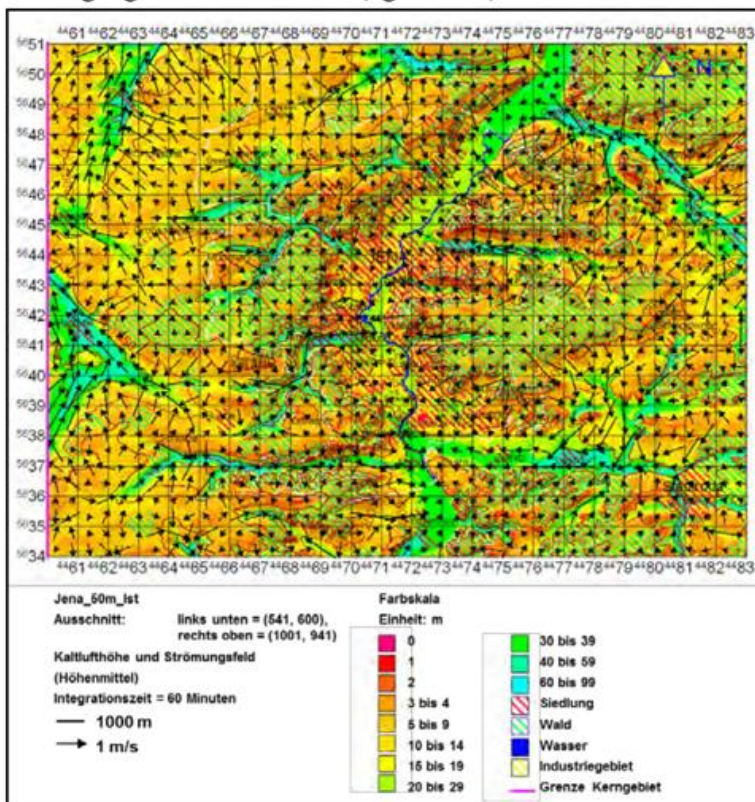


Abbildung 41: Effektive Kaltluflhöhe und Strömungsfeld im Höhenmittel im Kerngebiet um Jena (23 km * 17 km) nach einer Stunde

breiten, vergleichsweise schwach geneigten Saaletal selbst. Des Weiteren treten aus vorgenannten Gründen hinsichtlich der mittleren Fließgeschwindigkeit der Kaltluft bereits nach einer Stunde deutliche Unterschiede im Untersuchungsgebiet auf (Abbildung

Ablenkungseffekten, die beim Austritt der Kaltluft aus den Seitentälern in das Haupttal wirksam werden. Zudem spielen die generellen Voraussetzungen für die frühzeitige Ausbildung eines Kaltluftstromes nach Sonnenuntergang eine Rolle (Fläche des Einzugsgebietes, Größe des Talquerschnittes, Gefälleneigung, aerodynamische Rauigkeit, Art der Landnutzung, Kaltluftbildungsrate etc.).

In den engen, stark geneigten, begrünten Seitentälern mit geringen Rauigkeiten kann sich daher viel eher ein abwärts gerichteter Strom ausbilden, als im großen,

41). Während die Geschwindigkeiten im gesamten Saaletal äußerst gering ausfallen ($< 0,5$ m/s), ergeben sich in den Seitentälern Geschwindigkeiten > 1 m/s (z. B. im Ammerbachtal, im Rodatal bei Laasdorf, im Mühlthal, im Gleistal bei Golmsdorf).

Bis zur Mitte der Strahlungsnacht gleichen sich Unterschiede bzgl. der Kaltluflthöhe im Saaletal im Vergleich zu den Seitentälern, wie weiter oben beschrieben, nahezu aus (Abbildung 42). Von den umgebenden Berghängen und aus den Seitentälern ist bis zu diesem Zeitpunkt bereits so viel Kaltluft nachgeflossen, dass das Saaletal, ebenso wie die Seitentäler, mit einer zwischen 60 und 99 m, stellenweise (z. B. Auenflächen nördlich der Stadt) sogar bis zu 149 m hohen Kaltluftschicht gefüllt ist (Abbildung 42). Lediglich die höheren umgebenden Kuppen und Höhenzüge ragen aus dieser Schicht heraus.

Hinsichtlich der Situation der Anhöhen (Kuppen, Plateauflächen, Höhenzüge) ergibt sich bis zur Mitte der simulierten Strahlungsnacht keine erwähnenswerte Veränderung. Im Gegenteil, die Spitzen der umliegenden Anhöhen und Plateauflächen ragen über die gesamte Zeit aus der Kaltluft heraus. Dies betrifft z. B. die Kernberge, den Jenzig, den Hausberg, den Cospoth und den Windknollen, aber beispielsweise auch den Griesberg (Abbildung 42). Kaltluft, die auf den Freiflächen der vorgenannten Anhöhen entsteht, sammelt sich hier kaum an, sondern fließt sogleich in Richtung Talsohle ab. Über die Andauer der Strahlungsnacht zeichnet sich kein signifikanter Richtungswechsel im Abfließen der auf den Anhöhen entstehenden Kaltluft ab (vgl. Abbildung 41 bis Abbildung 43). Ähnlich gestaltet sich die Situation bzgl. der Fließgeschwindigkeit. Produzierte Kaltluft fließt stets mit einer nahezu konstanten Geschwindigkeit von bis zu ca. 0,5 m/s in Richtung der Gefälleneigung ab (z. B. Griesberg, Plateaufläche um Vierzehnheiligen).

In Abhängigkeit der vorgenannten Einflussfaktoren erreicht die abfließende Kaltluft im Verlauf einer Strahlungsnacht unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten: je stärker die Geländeneigung, je kleiner und enger das Tal und je größer der Einzugsbereich (incl. Kaltluftproduktionsrate) und je geringer die Umgebungsrauigkeiten, desto höher können die Fließgeschwindigkeiten ausfallen. Beispielsweise werden bei annähernd gleicher Rauigkeit (ausgenommen die stark bebauten Talausgänge) in dem breiten, schwach geneigten Gembdental gegenüber dem stärker geneigten, engen Ammerbachtal stellenweise Fließgeschwindigkeiten von nur ca. 1,0 m/s erreicht und bis zu ca. 1,8 m/s im Ammerbachtal (vgl. Abbildung 41).

Wenn, wie Abbildung 42 zu entnehmen, die Kaltluft im Jenaer Stadtgebiet insgesamt bzgl. ihrer Mächtigkeit eine Höhe von mindestens ca. 80 m über Grund erreicht hat, und damit ist die effektive Kaltluflthöhe gemeint, überströmt die Kaltluft mit ihrem Strömungsmaximum bereits das Dachniveau. Bei Betrachtung der Kaltluft im Querschnitt sind in diesen Höhen bzw. ab dem Dachniveau innerhalb der Kaltluftsäule die größten Strömungsgeschwindigkeiten zu erwarten. Die Kaltluft strömt, sobald sie eine Mächtigkeit von ca. 80 m erreicht hat, wegen abnehmender Rauigkeiten weniger gebremst über die bebauten Areale hinweg. Die „unteren“ Kaltluftschichten (Gebäudeniveau) weisen hingegen auf Grund erhöhter Oberflächenrauigkeiten weitaus geringere Geschwindigkeiten auf. Innerhalb der Kaltluftschicht nimmt die Geschwindigkeit jedoch oberhalb der Zone der maximalen Geschwindigkeit mit zunehmender Höhe sukzessive ab. Für den Betrachtungsraum bedeutet dies, dass die mittleren Fließgeschwindigkeiten in Bodennähe und Gebäudeniveau im bebauten Stadtgebiet relativ gering ausfallen (ca. < 1 m/s). In größeren Höhen (über dem Dachniveau) ist in der Kernstadt mit Geschwindigkeiten $> 1,5$ m/s zu rechnen. In freiem Gelände mit starker Gefälleneigung ergeben sich in Bodennähe Geschwindigkeiten um 2 m/s (z. B. Leutratal, Ammerbachtal und die Region um Stadtroda).

Offensichtlich führen die strahlungsächtlichen Bedingungen dazu, dass sich bis zur Mitte der simulierten Nacht ein schwacher Saaletalabwind im Haupttal etablieren kann (Abbildung 42, Abbildung 45). Im Höhenmittel erreicht die Strömung eine Geschwindigkeit von bis zu etwa 0,8 m/s. Allerdings bildet sich ein kräftiger Saaletalwind in den ersten Stunden einer Strahlungsnacht im Jenaer Saaletal zunächst nicht aus. Zu Beginn der Strahlungsnacht ist im Haupttal kein eindeutig talabwärts gerichteter Kaltluftstrom vorhanden (Abbildung 41, Abbildung 44). Während der ersten Hälfte der Strahlungsnacht stellt sich das Windsystem vom maßgebenden Einfluss der quer gerichteten Seitentäler und der anfänglich noch stärker wirksamen Abbremsung der Kaltluft durch die Gebäude auf den nachmitternächtlichen Verlauf um. Zu Beginn der Simulationszeit ergeben sich daher noch indifferente Windrichtungen im Haupttal. Erst nach und nach etabliert und stabilisiert sich im Saaletal eine etwas deutlichere Süd-Nordgerichtete, wenn auch nur schwach ausgeprägte Strömung (geringe Geschwindigkeit)

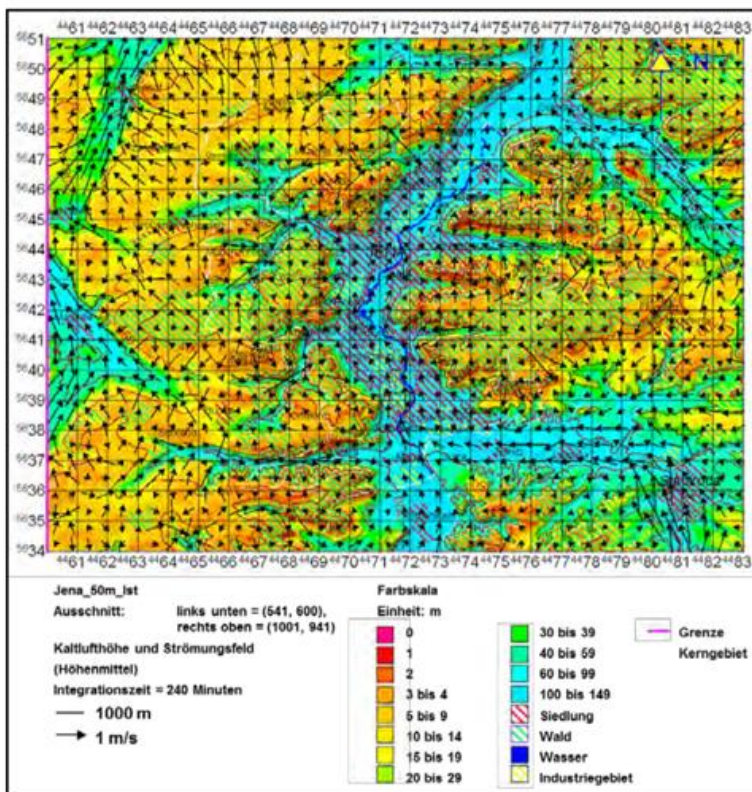


Abbildung 42: Effektive Kaltflughöhe und Strömungsfeld im Höhenmittel im Kerngebiet um Jena (23 km * 17 km) nach vier Stunden

lokalen Ursprungs, die in ihrer Fließrichtung maßgeblich durch die hiesige Orografie und Topografie determiniert wird. Diese Luftströmung dürfte vergleichsweise gut entlang von begrünten Flächen der Saale auszumachen sein. Innerhalb des Innenstadtbereiches wird dieser lokale Kaltluftfluss wegen der erhöhten Bremswirkung in Bodennähe jedoch kaum spürbar sein oder im zeitlichen Verlauf an Geschwindigkeit gewinnen.

Die Dominanz der Seitentäler als Quellen vermehrter Kaltluftadvektion und als „Liefergebiete“ von Kaltluft gegenüber den Wiesen- und Auenflächen im Norden und Süden der Stadt lässt sich in Abbildung 42 ablesen. Kaltluftadvektion aus dem städtischen Umland des Saaletales gewinnt an Kraft und Einfluss und überwiegt die lokal geringe Kaltluftproduktionsrate der Kernstadtbereiche spätestens ab der Mitte der simulierten Strahlungsnacht. Diesbezüglich sind für den Südteil der Stadt Jena v. a. das Leutra- und das Rodatal von Bedeutung. Das Ammerbach- und das Mühlthal sind für die zentralen Stadtteile westlich der Saale wichtige „Kaltluftlieferanten“. Das Pennickental und das Gembdental spielen eine entsprechende Rolle für die östlich der Saale gelegenen zentralen Stadtbereiche. Das Rautal im Nordwesten sowie das Laasantal bei Kunitz im Nordosten speisen die nördlichen Ausläufer der Bebauung des administrativen Stadtgebietes mit Kaltluft. Allerdings muss die aus den genannten Seitentälern einfließende Kaltluft erst eine gewisse vertikale Mächtigkeit erreichen, so dass – wie weiter oben beschrieben – ein merklich belüftender Eintrag in die Stadt erfolgen kann. Denn zunächst werden die talabwärts gerichteten Luftströmungen der

Die Dominanz der Seitentäler als Quellen vermehrter Kaltluftadvektion und als „Liefergebiete“ von Kaltluft gegenüber den Wiesen- und Auenflächen im Norden und Süden der Stadt lässt sich in Abbildung 42 ablesen. Kaltluftadvektion aus dem städtischen Umland des Saaletales gewinnt an Kraft und Einfluss und überwiegt die lokal geringe Kaltluftproduktionsrate der Kernstadtbereiche spätestens ab der Mitte der simulierten Strahlungsnacht. Diesbezüglich sind für den Südteil der Stadt Jena v. a. das Leutra- und das Rodatal von Bedeutung. Das Ammerbach- und das Mühlthal sind für die zentralen Stadtteile westlich der Saale wichtige „Kaltluftlieferanten“. Das Pennickental und das Gembdental spielen eine entsprechende Rolle für die östlich der Saale gelegenen zentralen Stadtbereiche. Das Rautal im Nordwesten sowie das Laasantal bei Kunitz im Nordosten speisen die nördlichen Ausläufer der Bebauung des administrativen Stadtgebietes mit Kaltluft. Allerdings muss die aus den genannten Seitentälern einfließende Kaltluft erst eine gewisse vertikale Mächtigkeit erreichen, so dass – wie weiter oben beschrieben – ein merklich belüftender Eintrag in die Stadt erfolgen kann. Denn zunächst werden die talabwärts gerichteten Luftströmungen der

Seitentäler mit Auftreffen auf die Siedlungsbereiche stärker abgebremst. Locker bebaute Areale erlauben zwar noch ein Durch- und Umfließen, ansonsten stauen sich die Luftmassen zunächst luvseitig an Hindernissen, bis sie die notwendige vertikale Mächtigkeit zum Überströmen erreicht haben. Erst in der Mitte der ersten Nachthälfte, wenn das Maximum der Kaltluftströmung das Dachniveau am Talausgang der Seitentäler erreicht oder deutlich überschritten hat, werden Hindernisse merklich überströmt, so dass ein Eintrag von Kaltluft in die Kernstadt erfolgen kann (Abbildung 41, Abbildung 42 und Abbildung 45).

Die Effekte des Gleistals als Quelle vermehrter Kaltluftadvektion im Norden der Stadt (Abbildung 42) dürften auf Grund der relativ großen Entfernung zum Innenstadtgebiet von Jena kaum von Bedeutung für letzteres sein, zumal sich bis zur Mitte der Strahlungsnacht auch bei Kunitz ein nach Norden (talabwärts) gerichteter Talabwind einstellt (vgl. ebd.).

Ob es sich bei der in das Jenaer Stadtgebiet einströmenden Kaltluft um Frischluft handelt oder nicht, hängt im Wesentlichen vom Kaltluftentstehungsgebiet und den Kaltluftflussbahnen ab.

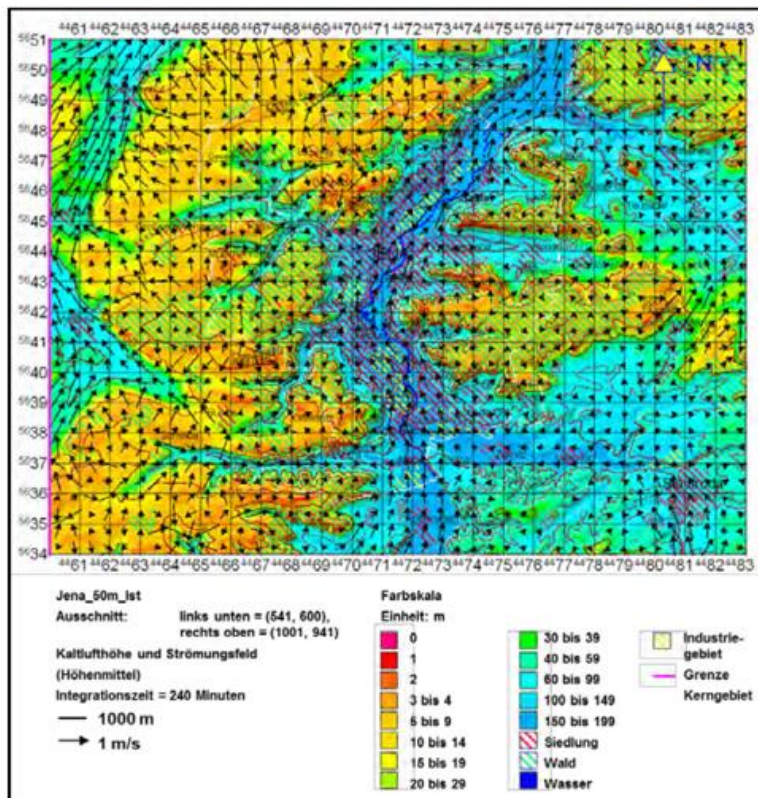


Abbildung 43: Effektive Kaltfluthöhe und Strömungsfeld im Höhenmittel im Kerngebiet um Jena (23 km * 17 km) nach acht Stunden

Ist die Kaltluft schadstofffrei oder schadstoffarm, so wird sie die Konzentration im Wirkungsraum reduzieren. Überstreicht die Kaltluft auf ihrem Weg in den Wirkungsraum bodennahe Emissionsquellen (Geruchsemissionen durch Mülldeponien o. ä.), kann es zu einer Anreicherung mit Schadstoffen und Verunreinigungen sowie deren Transport kommen. Vor allem in Mulden, Senken und vor Hindernissen reichern sich die Schadstoffe an.

Auch zum Ende der Strahlungsnacht verändert sich die Situation auf den Anhöhen und Plateauflächen bzgl. der Entwicklung der

Kaltfluthöhe und Strömungsgeschwindigkeiten nicht wesentlich (Abbildung 43). Hier entstandene Kaltluft ist nicht auffallend in die Höhe angewachsen. Im Gegenteil, sie fließt, während des gesamten Simulationszeitraumes in tiefer liegende Bereiche ab.

Niederungen und Seitentäler heben sich am Ende der Strahlungsnacht weiterhin klar durch die blaue Einfärbung (ca. 60 bis 199 m Kaltfluthöhe) in Abbildung 43 ab: In der Talsohle der Saale – in den Seitentälern im Bereich der Talausgänge – ist die Kaltfluthöhe zum Ende der Simulationszeit auf 150 bis 199 m über Grund angewachsen. Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten (Pfeildarstellung) nehmen im Vergleich zu

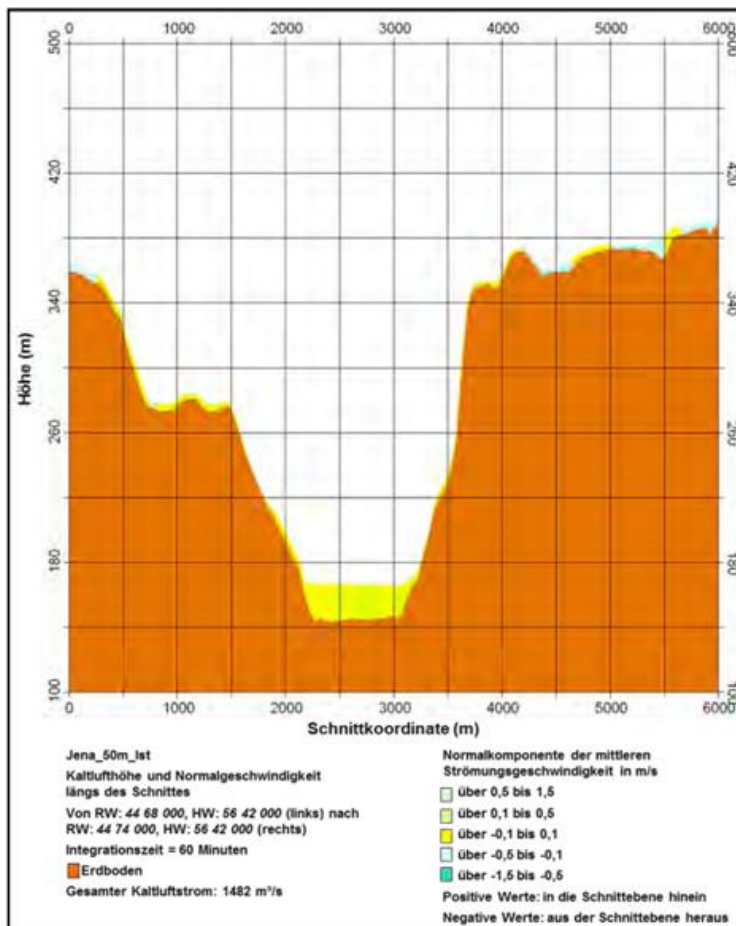


Abbildung 44: Kaltfluthöhe und Normalkomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s nach einer Stunde (Geländequerschnitt)

Seitentäler nach acht Stunden deutlich dominieren und auch blockieren, kommen Strömungen (mittlere Geschwindigkeiten) in einigen Seitentälern allmählich zum Erliegen (z. B. im Gembdental bei Wogau) oder weisen nur noch sehr geringe mittlere Strömungsgeschwindigkeiten auf.

Im Verlauf der simulierten Strahlungs-nacht stellt sich in der zweiten Nachthälfte im Saaletal eine im Vergleich zum Zeitausschnitt nach vier Stunden deutliche, talabwärts gerichtete Süd-Nord-Kaltluftströmung ein. Diese zeichnet sich durch geringere Geschwindigkeiten in Bodennähe bzw. unterhalb des Dachniveaus (abgesehen von den im Modell bei 50 m Auflösung nicht ausreichend oder gar nicht abgebildeten breiten nord-südwärts ausgerichteten Straßenschneisen, Freiflächenstreifen und Saalestreifen mit größeren Kaltluftströmungsgeschwindigkeiten auch in Bodennähe) – von ca. 0,5 bis 1,0 m/s – und etwas höheren Geschwindigkeiten ab dem Dachniveau – von ca. 1 bis 2,5 m/s – aus. In Bodennähe kann demnach nicht von einem kräftigen nächtlichen Saaletalwind die Rede sein (ca. 1 m/s). Die Bremswirkung vorhandener Strömungshindernisse ist hier schlicht zu groß. Hingegen ist zu erwarten, dass sich über dem Dachniveau (ca. 60 m über Grund) zum Ende der Strahlungsnacht ein etwas kräftiger ausgeprägter lokaler Talabwind eingestellt hat, der – geleitet und determiniert durch die umgebenden Anhöhen, Strömungshindernisse und die Geländeneigung – von Süd nach Nord das Stadtgebiet mit mehr als 1,5 m/s überströmt.

den vorherigen Zeitausschnitten im Haupttal bis zum Ende der simulierten Strahlungsnacht zu und erreichen Geschwindigkeiten zwischen 1,0 und 1,5 m/s. Hinsichtlich der Kaltluftströmung in den Seitentälern ist hingegen von der Mitte zum Ende des simulierten Zeitraumes eine Abnahme der Geschwindigkeit auszumachen, von über 2 m/s auf teilweise unter 0,5 m/s (Abbildung 42 und Abbildung 43).

Selbst zum Ende der simulierten Strahlungsnacht erreicht die Kaltfluthöhe die Spitzen der umliegenden größeren Anhöhen nicht, sondern füllt das Saaletal bis etwa 320 m über NN

bzw. bis etwa 190 m über Grund aus (vgl. Abbildung 46). Da die Kaltluftmassen des Saaletales diejenigen der

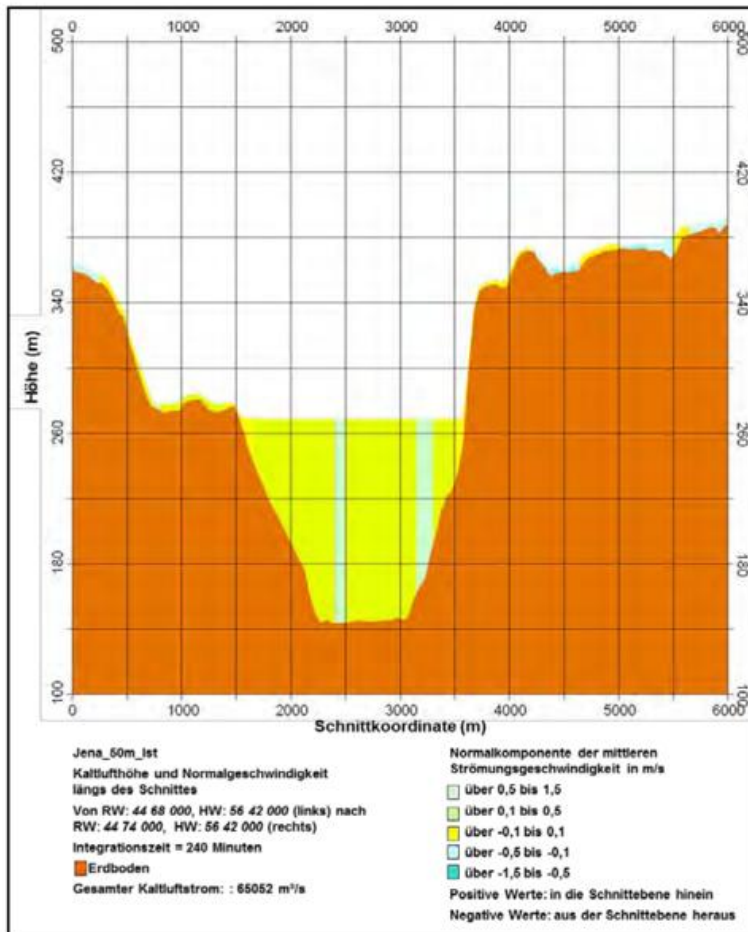


Abbildung 45: Kaltluflhöhe und Normalkomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s nach vier Stunden (Geländequerschnitt)

Es ist anzunehmen, dass ein solcher Lokalwind im Mittel nur Geschwindigkeiten um etwa 1,0 m/s im gesamten Jenaer Saaletal (Stadtgebietsbereich) erreichen wird. In stärkerer Ausprägung ist ein von Süden nach Norden gerichteter Saaletalwind ab der zweiten Nachthälfte jedoch in größeren Höhen (über dem Dachniveau) zu vermuten. Hier sind folglich höhere Geschwindigkeiten (ca. 1,5 bis 2,5 m/s und darüber hinaus) anzunehmen.

Entsprechend der aerodynamischen Rauigkeiten fallen die Strömungsgeschwindigkeiten in den Bereichen geringer Oberflächenrauigkeit höher (z. B. in den östlich der Saale gelegenen freien Hochlagen: 0,5 bis 1,5 m/s)

und in den Arealen erhöhter Oberflächenrauigkeit (z. B. im stark bebauten innerstädtischen Bereich) geringer aus (Abbildung 45).

Im Mittel bleibt die Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft im Saaletal bis zur Mitte der simulierten Nacht recht gering (ca. 0,1 bis 0,5 m/s).

Im Saaletal selbst ergeben sich wahrscheinlich auf Grund von Kanalisierungstendenzen und damit verbundenen Düseneffekten die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten entlang der Saale (ca. > 0,5 bis 1,5 m/s) sowie entlang nord-südwärts gerichteter breiterer Trassenführungen von geringer Rauigkeit (z. B. Bahnstrecken, breitere Grün- und Straßenzüge). In diesen Bereichen ist eine nächtliche Durchlüftung wegen geringer Rauigkeiten vergleichsweise gut gewährleistet. Ansonsten liegen die mittleren Geschwindigkeiten zu Beginn der Strahlungsnacht zwischen nur -0,1 und 0,5 m/s, d. h. bzgl. der Richtung ergeben sich im Stadtgebiet zeitlich parallel nach Norden und nach Süden gerichtete Strömungen (Abbildung 44). Dies lässt sich z. B. über Ablenkungseffekte, die an den Hängen und Talausgängen entstehen oder innerhalb des Stadtgebietes durch Hindernisse verursacht werden, erklären. Zum Ende der Strahlungsnacht liegt das Strömungmaximum der Kaltluft oberhalb des Dachniveaus. Es können sich Geschwindigkeiten > 1,5 m/s (bis 2,5 m/s und darüber hinaus) in diesem Bereich ergeben.

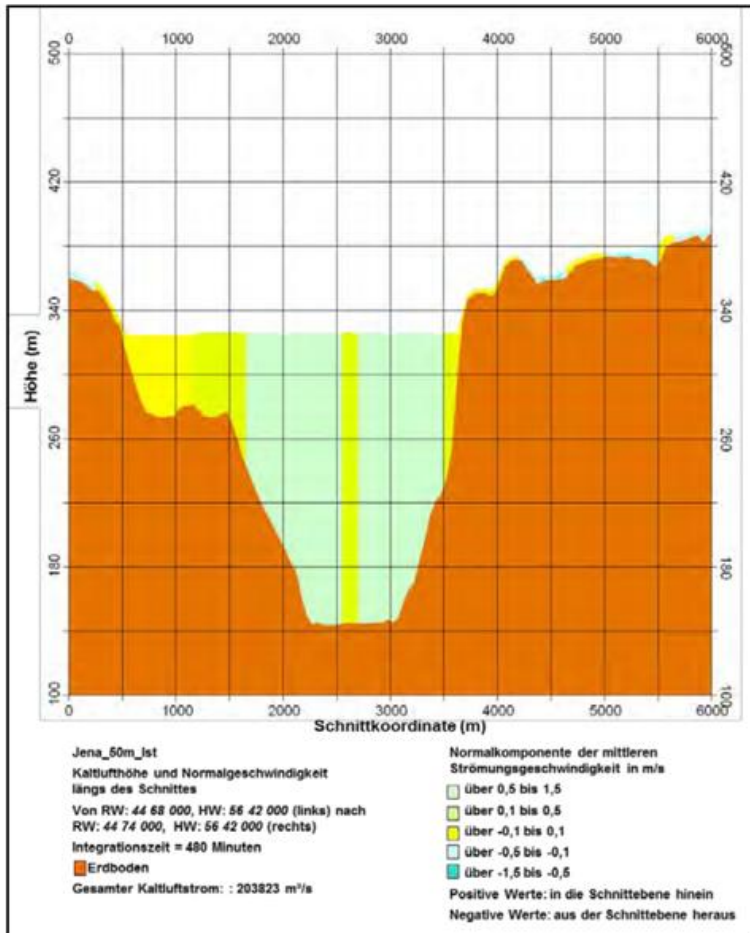


Abbildung 46: Kaltlufthöhe und Normalkomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s nach acht Stunden (Geländequerschnitt)

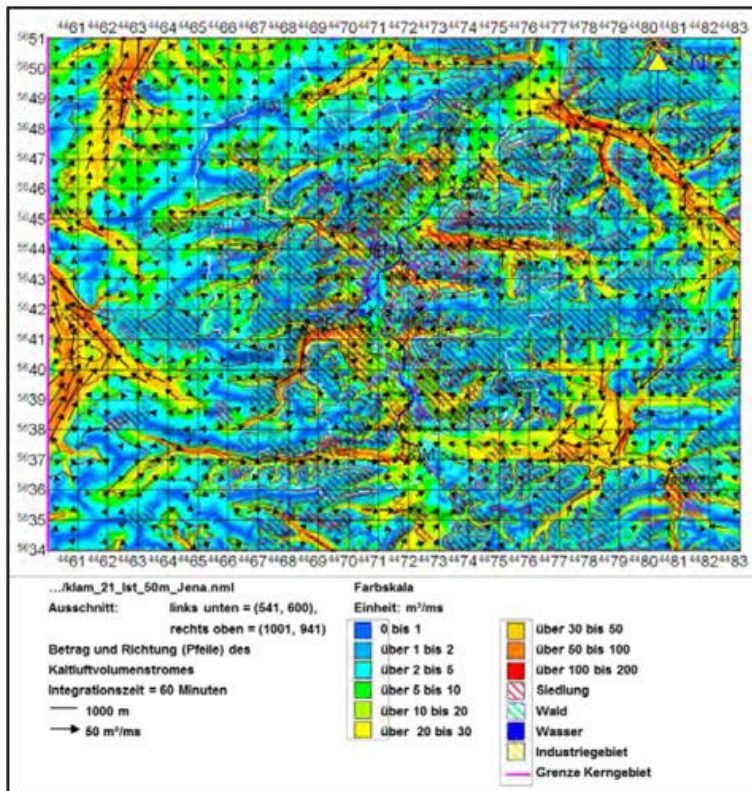


Abbildung 47: Betrag und Richtung des Kaltluftvolumenstroms im Kerngebiet um Jena (23 km * 17 km) nach einer Stunde

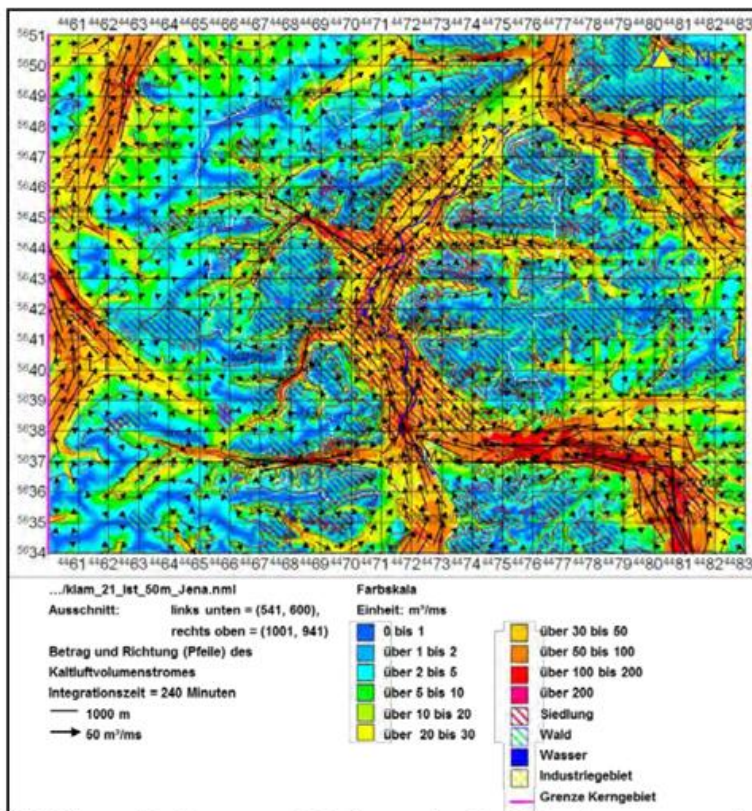


Abbildung 48: Betrag und Richtung des Kaltluftvolumenstroms im Kerngebiet um Jena (23 km * 17 km) nach vier Stunden

Abbildung 47 bis Abbildung 49 geben die Entwicklung des Kaltluftvolumenstroms wieder. Auch hier zeigt sich, dass sich bereits eine Stunde nach Beginn der Strahlungsnacht in den Seitentälern (Gleystal, Gembdental, Rodatal, Leutral, Ammerbachtal, Mühlental etc.) ein merklicher talabwärts gerichteter Volumenstrom einstellt, vorwiegend gespeist durch mäßige bis kräftige Kaltluftzuflüsse von den unbebauten, bewaldeten und unbewaldeten Hängen (Abbildung 47).

Die Spannweite des Volumenstromes differiert in Abhängigkeit von der Neigung, Breite und Tiefe sowie der aerodynamischen Rauigkeit der Oberfläche der genannten Seitentäler zwischen ca. 10 bis z. T. 100 m³/ms. Diese Volumenströme fallen ohne große blockierende Rauigkeiten (anzutreffen z. B. am Talausgang des Gembdentals) in der Talsohle am stärksten aus und fließen von dort weiter in Richtung Saaletal. Erneut zeigt sich der starke Einfluss der Bodenrauigkeit sowie der lokalen Orografie und Topografie: In den östlich der Saale gelegenen Tälern sind die Volumenströme aus östlichen Rich-

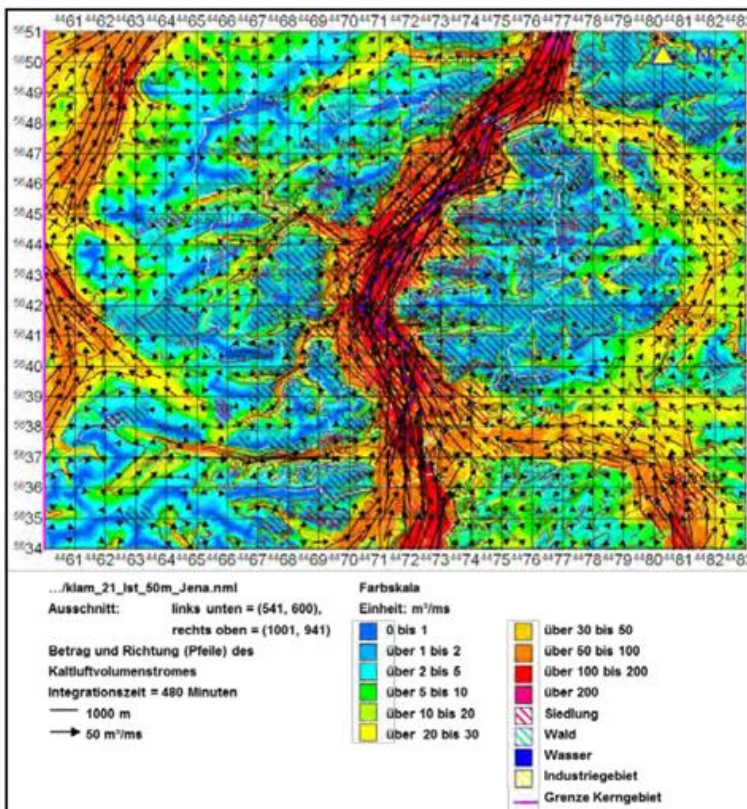
tungen kommend in Richtung Saaletal ausgerichtet, in den westlich der Saale gelegenen Tälern münden sie aus westlichen Richtungen kommend in das Haupttal ein. Wobei

weiter oben beschriebene Ablenkungseffekte an den Talausgängen auftreten können. In besonders engen, stark geneigten Seitentälern treten Volumenströme zwischen etwa > 50 und $100 \text{ m}^3/\text{ms}$ bzw. punktuell auch von > 100 bis $200 \text{ m}^3/\text{ms}$ auf (z. B. Gleistal, Leutratal).

Im Saaletal selbst ist wegen des großen Talquerschnittes, der geringen Geländeneigung und vor allem auf Grund der relativ geringen Kaltluftbildungsrate im Bereich des Stadtgebietes noch kein einheitlich talabwärts gerichteter Volumenstrom festzustellen. Dies ändert sich jedoch relativ rasch im Laufe der simulierten Strahlungsnacht.

Im weiteren Verlauf der Strahlungsnacht stabilisieren sich die Volumenströme in den Seitentälern zunehmend. Auch im Saaletal stellt sich zur Mitte der Simulationszeit ein talabwärts gerichteter Volumenstrom ein (Abbildung 48). Das Saaletal sowie die wichtigen Kaltfluthauptlieferanten stechen darin deutlich orange (Kaltluftvolumenströme von 50 bis $100 \text{ m}^3/\text{ms}$) bis rot (Kaltluftvolumenströme von 100 bis $200 \text{ m}^3/\text{ms}$) hervor. Im Saaletal selbst ist ein „Saaletalwind“ (mit im Mittel um $50 \text{ m}^3/\text{ms}$) zu erkennen, der sich in Abhängigkeit von anwachsender effektiver Kaltfluthöhe und mittlerer Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft im Verlauf der simulierten windschwachen Strahlungsnacht verstärkt.

Abbildung 49 stellt die Verhältnisse am Ende der simulierten Strahlungsnacht dar, mit Strömungsmengen von 100 bis $200 \text{ m}^3/\text{ms}$ und darüber hinaus sowie einem weiterhin talabwärts gerichteten Strom im Saaletal.



Demgegenüber lassen sich hinsichtlich der Strömungsmengen zum Ende der Nacht für die Seitentäler Tendenzen einer Stagnation oder gar Abnahme konstatieren (z. B. östlich der Saale im Gembdental, Pennickental, Ziegenhainer Tal). Grund hierfür sind u. a. ein allmähliches Abebben nachströmender Kaltluft von den Unterkanten der Talhänge und vor allem Kaltfluftrückflüsse vom jetzt dominierenden Saaletal in die Seitentäler. Die größere Masse und Mächtigkeit der Kaltluft im Saaletal bei geringerer Talneigung überwiegt gegenüber dem Einfluss

Abbildung 49: Betrag und Richtung des Kaltluftvolumenstroms im Kerngebiet um Jena ($23 \text{ km} \times 17 \text{ km}$) nach acht Stunden

der größeren Talneigung einiger Seitentäler bei geringeren Kaltluftmächtigkeiten. Im östlichen Abschnitt des Gembdentals stagnieren daher die Kaltluftvolumenströme. Im Ammerbachtal und Mühlental bleibt die Strömung auf Grund der engen Talquerschnitte und der relativ extremen Neigung dagegen bis zum Ende der Simulationszeit erhalten.

12.5.2 Der Planzustand

Nachfolgend werden die Auswirkungen des Planzustandes auf die Kaltluftverhältnisse der Stadt Jena in Form von Differenzkarten (Planzustand minus Istzustand) für drei nächtliche Termine (Abbildung 51 bis Abbildung 62) näher beschrieben. In den Differenzkarten sind neben den Topografie- und Orografieinformationen (linien- und flächenhafte Darstellung) die Flächennutzungen – abgesehen von der Klasse Wasser (flächenhaft blau) – schraffiert dargestellt. Dabei wurde bei den Flächennutzungskategorien nur noch grob zwischen Siedlung (rot), Wald (grün) und Industriegebiet (gelb) unterschieden. In Abbildung 40 ist die bisherige Landnutzung dargestellt. Die Übersichtskarte in Abbildung 50 zeigt das kleinere Kerngebiet des Betrachtungsraumes (23 km x 17 km) im 50-Meter-Raster für den städtebaulichen Planzustand des administrativen Stadtgebietes. Flächenhaft dargestellt sind die neun Flächennutzungskategorien sowie in weißer Farbe die Stadtgrenze. Neben den Messstandorten (Großbuchstaben) sind Höhenlinien eingezichnet und die Orografie wird durch Schummerungseffekte wiedergegeben.

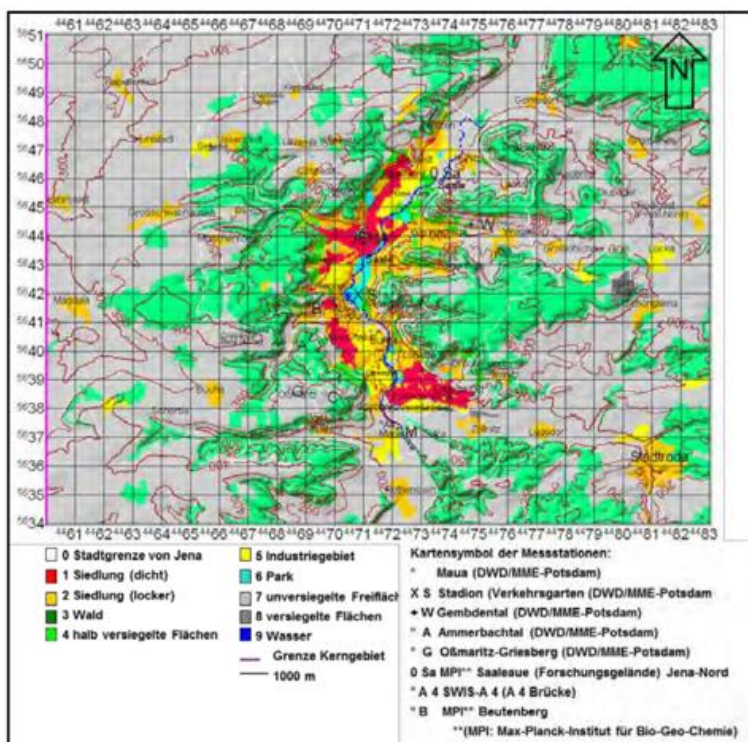


Abbildung 50: Geländehöhen und Flächennutzungsklassen im Planzustand im Kerngebiet um Jena (23 km * 17 km) mit Lage der Messstationen

oder Kleingärten ausgewiesenen Flächen. Ein Schwerpunkt für die Schaffung neuer Industrie- und Gewerbegebiete liegt im Süden der Stadt. Daneben sind im Norden neue Industrie- und Gewerbeflächen geplant. Die Bebauung von Arealen mit Einzelhäusern soll vorwiegend östlich der Saale im Bereich des Gembdentals erfolgen. Die Schaffung neuer Grünflächen ist kaum in den bisherigen Planungen vorgesehen. Im Südosten der Stadt ist auf einem bislang als Freifläche ausgewiesenen Areal die Errichtung von Kleingärten geplant. Abgesehen von leichten Bebauungszuwächsen in den umgebenden Ortschaften Isserstedt, Maua und Cospeda ist in den übrigen Bereichen des administrativen Stadtgebietes mit keinen größeren städtebaulichen Änderungen zu rechnen. Die meisten der sehr vielen Nutzungsänderungen in zweistelliger Anzahl, beschränkt auf ab 2 Hektar Größe, sind so kleinräumig, dass diese wegen des Maßstabes und der sehr kleinen Darstellung gar nicht in den hier gezeigten Abbildungen ersichtlich werden. Nur die großflächigsten Nutzungsänderungen über viele Hektar Größe, wie die

Die Unterschiede zwischen der bisherigen und der geplanten Landnutzung halten sich insgesamt in engen Grenzen. Zwar verteilen sich die geplanten Nutzungsänderungen dispers über das gesamte Stadtgebiet, allerdings sind sie – abgesehen von einem geplanten Kleingartengebiet im Südosten der Stadt – überwiegend von kleinräumiger Natur. Dabei umfassen die Planungen zumeist Flächennutzungsänderungen: die Schaffung neuer Einzelhäuser

(niedrig und hoch) und neuer Industrie- und Gewerbegebäude auf bisher als Freiflächen

oben erwähnten, werden vielleicht in Abbildung 50 gegenüber Abbildung 40 ersichtlich. Folglich ist davon auszugehen, dass sich die Auswirkungen auf das städtische Lokalklima in relativ engen Grenzen halten werden. Effekte werden mit großer Wahrscheinlichkeit vorwiegend in Stadtteilen, in denen größere Veränderungen geplant sind, in den Ergebniskarten ersichtlich werden.

Mit den größten Abweichungen vom Istzustand ist allgemein zu Beginn der simulierten Strahlungsnacht, während der ersten Nachthälfte, zu rechnen. In diesem Zeitfenster spielt der Einfluss der Oberflächenrauigkeit noch eine vergleichsweise erhebliche Rolle. Dieser wird jedoch relativ rasch im Verlauf der Strahlungsnacht und mit Anwachsen der Kaltluflhöhe nachlassen. Daneben machen sich die Veränderungen der Landnutzung im Planzustand vor allem bei der lokalen Kaltluftproduktion bemerkbar. Flächen, die im Istzustand vergleichsweise viel Kaltluft produziert haben (z. B. Gärten, Wiesen, Parks), fallen im Planzustand durch Umwidmung in Flächen (Industrie-, Gewerbe-, Wohnbebauung), deren Kaltluftproduktion gegen Null geht, weg (im Folgenden auch als Erwärmungsflächen bezeichnet). Zugleich stellt die neue Bebauung ein Strömungshindernis dar. Zu Beginn der Simulationszeit ergeben sich daher sehr wahrscheinlich negative Entwicklungen im Bereich vorgenannter Flächen (reduzierte Kaltluflhöhen, geringere Strömungsgeschwindigkeiten und verminderte Kaltluftvolumenströme). Es ist über den Plangebietes zumeist mit einer Herabsetzung der lokalen Kaltluftproduktion zu rechnen, v. a. im Bereich von Flächen mit geplantem Bebauungszuwachs. Die lokale Kaltluftproduktion dürfte zu Beginn der Simulationszeit deutlich gegenüber Kaltluftadvektionsvorgängen aus dem Umland überwiegen, was sich allerdings recht schnell im weiteren Verlauf umkehren oder ausgleichen dürfte. Eine möglichst uneingeschränkte Kaltluftadvektion aus der Umgebung gewinnt daher mit zunehmender Bebauungsdichte und Oberflächenrauigkeit im Planzustand im Vergleich zum Istzustand an Bedeutung.

Anfängliche negative Entwicklungen werden sich im Planzustand, einmal abgesehen vom Bodenniveau, allmählich im Verlauf der simulierten Nacht – über die Höhe der Kaltluftsicht gemittelt – näherungsweise „aufheben“. Anfangs wird sich zwar über den o. g. Arealen im Mittel ein Defizit hinsichtlich Kaltluftvolumenstrom, Kaltluflhöhe und Strömungsgeschwindigkeit ergeben, da über den zusätzlich bebauten Flächen selbst keine Kaltluftproduktion mehr erfolgt und – begünstigt durch die erhöhte Bodenrauigkeit – zunächst keine oder nur schwerlich Austauschbewegungen (Kaltluftadvektion aus der Umgebung) einsetzen. Mit Anwachsen der Kaltluft und kontinuierlichem Nachströmen von Kaltluft aus der Umgebung in das Stadtgebiet hinein, wird die Kernstadt aber am Ende der Simulationszeit mit Kaltluft mehrheitlich überströmt werden und aufgefüllt sein.

Anmerkung: Verbleibende negative Entwicklungen in äußerster Bodennähe durch die Planungszustände treten am Ende der Strahlungsnacht zumindest im Kernstadtbereich und im Saaletal in den Differenz-Ergebnisfeldern (PLZU – Ist) wegen der Mittelung über die zu diesem Zeitpunkt bereits sehr große Kaltluftmächtigkeit nicht mehr so deutlich hervor. Sie werden gegenüber den dann dominierenden Überströmungsvorgängen nach Kaltluftadvektion teilweise weggemittelt. Am aussagekräftigsten über maximale Auswirkungen in Bodennähe sind daher die Differenzfelder des Planzustandes gegenüber der Istsituation am Anfang und aus der ersten Hälfte der Strahlungsnacht.

Abbildung 51 zeigt die berechnete Geschwindigkeitsdifferenz der Kaltluftströmung im Höhenmittel zwischen der Planungsvariante und der Istsituation nach einer Stunde Integrationszeit. In den Stadtteilen, in denen mit einem Bebauungszuwachs und damit einer erhöhten Oberflächenrauigkeit zu rechnen ist, ergeben sich verminderte Strömungsgeschwindigkeiten dort, wo neue Bebauung entstehen soll. Dies betrifft vorwiegend Gebiete in Isserstedt, Wenigenjena, Lobeda-West und Maua sowie einige

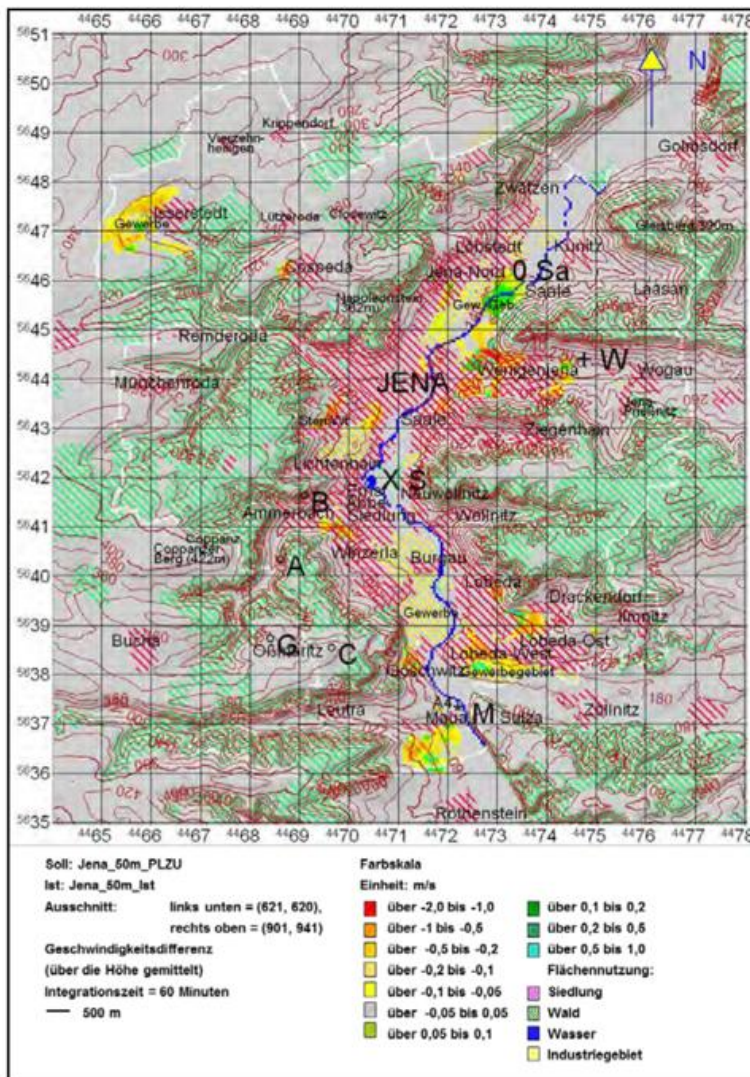


Abbildung 51: Geschwindigkeitsdifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach einer Stunde über die Höhe gemittelt

Die negativen Entwicklungen im Verlauf der Strahlungsnacht zunehmend relativieren. Zunächst wird die Kaltluftströmungsgeschwindigkeit aber über den Flächen mit der neuen, erhöhten Rauigkeit (Planzustand) im Vergleich zur vorherigen Situation (Istzustand) gebremst und fällt dadurch geringer aus. Zum anderen wird advehierte Kaltluft die neue Bebauung umströmen. Hierbei kann es zur Beschleunigung der Strömungsgeschwindigkeit kommen, wenn die Kaltluft beispielsweise zwischen zwei hohen Gebäuden hindurchströmt. Dies erklärt einen Teil der positiven Abweichungen, die zumeist in direkter Nachbarschaft zu den negativen Abweichungen auftreten (Abbildung 51 bis Abbildung 53).

Die „krassste“ Abnahme der mittleren Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich zu Beginn der simulierten Nacht über einem Areal in Wenigenjena am Ausgang des Gembdental, zwischen den nachverdichteten Arealen am Fuße des Jenzigs und des Hausbergs (Klasse > -2 bis -1 m/s). In einem annähernden Halbbogen von Nordnordost bis Südsüdwest um das im Planzustand erweiterte Gewerbegebiet Isserstedts ist mit einer Abnahme der Geschwindigkeit um ca. 0,05 bis 0,5 m/s zu rechnen. Ebenso ist nördlich bis westlich des neuen, erweiterten Gewerbegebietes in Maua und östlich bis nördlich desjenigen in Lobeda-West eine herabgesetzte Kaltluftgeschwindigkeit zu erwarten. Die Abweichungen (negatives Vorzeichen) betragen dort ca. 0,05 bis 0,5 m/s. Im Bereich des

kleinere Arealen in Winzerla und der Innenstadt. Allerdings befinden sich in unmittelbarer Nachbarschaft zu diesen Arealen zumeist Gebiete mit einer erhöhten Strömungsgeschwindigkeit. Dies ist sehr wahrscheinlich auf Ablenkungs- und Düseneffekte zurückzuführen. Die Kaltluft wird im Planzustand nicht mehr – wie im Istzustand – über weniger raue Oberfläche strömen. Im Gegenteil, die Oberflächenrauigkeit ist mit der neuen zusätzlichen Bebauung des Planzustandes erhöht. Einerseits wird sich einströmende Kaltluft aus der näheren Umgebung im Planzustand vor den neuen Hindernissen anstauen, bis sie mit der Zeit die erforderliche Mächtigkeit erreicht hat und diese schließlich überströmen kann. Dadurch werden sich die

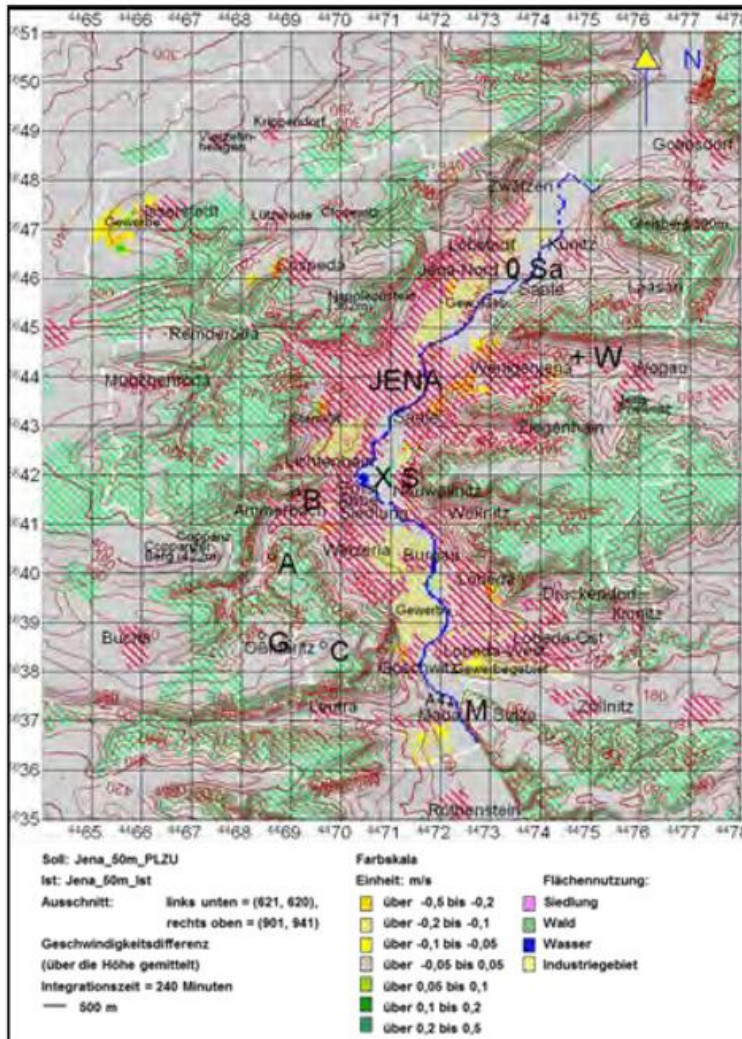


Abbildung 52: Geschwindigkeitsdifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach vier Stunden über die Höhe gemittelt

neuen Wohnbebauung bei Jena-Nord und in Winzerla. Vereinzelt kommt es auch zu einer Erhöhung um bis zu ca. 1,0 m/s, z. B. nahe der nachträglich verdichteten Wohngebiete in Lobeda-Ost und Wenigenjena sowie den weiter ausgebauten Industrie- und Gewerbegebieten in Lobeda-West und Maua. Die Nachverdichtung in Jena-Nord und in Wenigenjena wirkt sich in einem verhältnismäßig breiten Band entlang der Saale bis auf Höhe des Steinbachs aus (vorrangig Klasse > 0,1 bis 0,2 m/s). Kanalisierungseffekte könnten hierfür die Ursache sein. In allen übrigen Bereichen (grau eingefärbt) ist mit keiner nennenswerten Änderung zu rechnen (Abbildung 51).

Zur Mitte der Simulationszeit fallen die Abweichungen nur noch sehr gering aus. Erneut zeigen sich Rasterpunkte mit positiven (Zunahme) direkt neben solchen mit negativen Abweichungen (Abnahme) (Abbildung 52). Allerdings scheint, wie in Abbildung 51 ersichtlich, flächenmäßig die (im Mittel) relativ geringe Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit zu überwiegen. Die Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit (negatives Vorzeichen) liegt nach vier Stunden nur noch in einem Bereich von ca. 0,05 bis 0,5 m/s. Die Zunahme (positives Vorzeichen) schwankt zwischen 0,05 und 0,5 m/s und tritt nur noch vereinzelt in Isserstedt, Wenigenjena und Lobeda auf.

erweiterten Wohnviertels bei Lobeda-Ost ergeben sich vorwiegend östlich bis südlich der neuen Bebauung ähnlich herabgesetzte Strömungsgeschwindigkeiten. Im erneuerten Siedlungsabschnitt bei Winzerla fallen die Strömungsgeschwindigkeiten westlich bis südlich der Verdichtung entlang der Hangzone im Vergleich zur Istsituation etwas geringer aus (negatives Vorzeichen), ca. 0,05 bis 0,5 m/s. Punktuell treten in den vor- genannten Arealen z. T. auch Abnahmen bis zu ca. 1,0 m/s auf. Erhöhungen der Strömungsgeschwindigkeit (positives Vorzeichen) für den Plan im Vergleich zum Istzustand betragen im Großen und Ganzen zwischen 0,05 bis etwa 0,5 m/s, wie etwa auf dem erweiterten Gewerbeareal bei Isserstedt oder im Bereich der

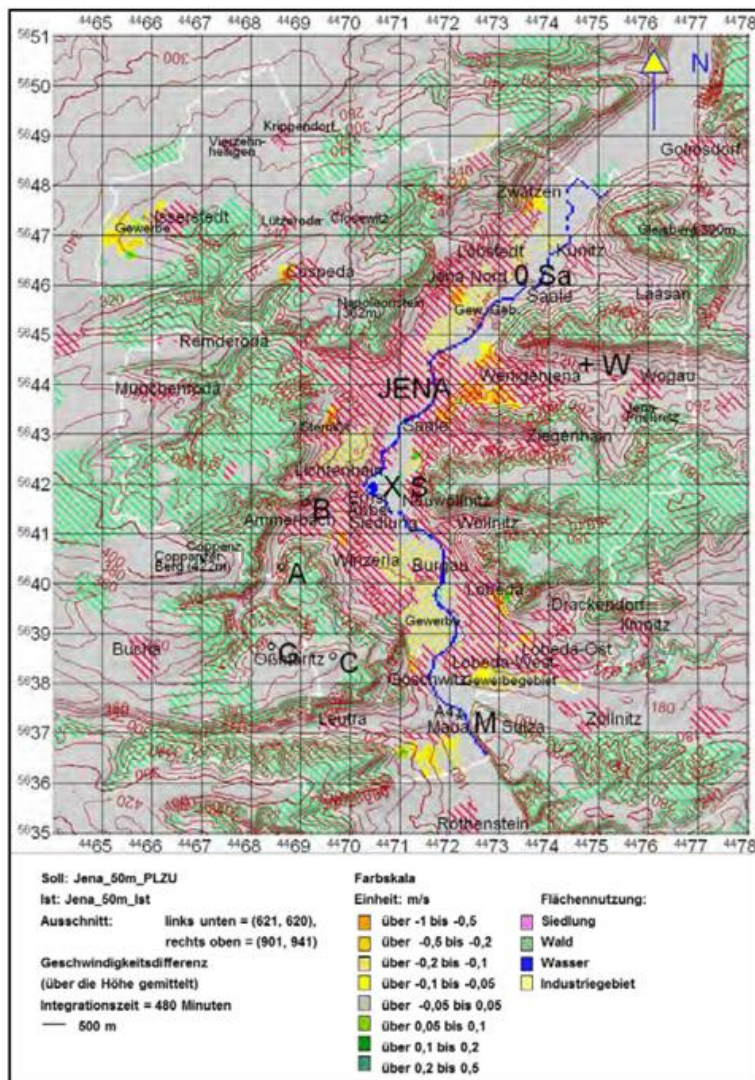


Abbildung 53: Geschwindigkeitsdifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach acht Stunden über die Höhe gemittelt

verteilte Kaltluftabsenkungs- und Kaltfluterhöhungsgebiete von unterschiedlicher Größe. In allen Bereichen mit Bebauungszuwachs wird die Kaltluflhöhe während der ersten 30 Minuten der simulierten Strahlungsnacht in ihrer Ausbildung mehr oder minder stark beeinträchtigt.

Dabei bewegt sich die Abnahme der Kaltluflhöhe (negatives Vorzeichen) nach einer Andauer der simulierten Strahlungsnacht von nur 30 Minuten in einem Bereich von ca. 1 bis 19 m, die Zunahme (positives Vorzeichen) beträgt zwischen 1 und 9 m (Abbildung 54). In den Bereichen mit einer geplanten Nachverdichtung der Wohnbebauung (Wenigenjena, Lobeda-Ost, Winzerla) oder Erweiterung von Industrie- und Gewerbeflächen, (Maua, Isserstedt) treten nach 30 Minuten Kaltluftabsenkungsgebiete auf. Der Grund hierfür liegt u. a. in der im Vergleich zum Istzustand herabgesetzten bzw. gegen Null gehenden lokalen Kaltluftproduktionsrate (vgl. Angaben in Tabelle 15). In direkter Nachbarschaft zu den Kaltluftabsenkungsgebieten treten gleichzeitig Kaltfluterhöhungsgebiete gegenüber der Istsituation auf. Die erhöhte Kaltluftmächtigkeit resultiert sehr wahrscheinlich zum Großteil aus den zusätzlichen Kaltluftstauwirkungen der Zusatzbebauung und andererseits aus Kaltluftadvektion der unmittelbaren Umgebung. Diese wird sicherlich durch Kanalisierungs- und/oder Düsenwirkungen an den neuen Strömungshindernissen verstärkt, so dass sich in kurzer Zeit eine sehr viel größere

Auch zum Ende der simulierten Nacht zeigt sich keine weitere nennenswerte Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit im Vergleich zum Zeitausschnitt nach vier Stunden. Die Spannweite der Abnahme (negatives Vorzeichen) reicht von 0,05 bis 0,5 m/s, vorwiegend in Wenigenjena, Maua, Lobeda und Isserstedt. Der Range der Zunahme (positives Vorzeichen) reicht von 0,05 bis 0,5 m/s und ist punktuell z. B. in Lobeda, Maua, Wenigenjena und Isserstedt auszumachen.

Abbildung 54 bis Abbildung 56 sind die Auswirkungen zusätzlicher Bebauung auf die Ausbildung der Kaltluflhöhe zu entnehmen. Die dargestellten Differenzen der Kaltluflhöhe zwischen dem Plan- und Istzustand zeigen dispers über das gesamte Stadtgebiet

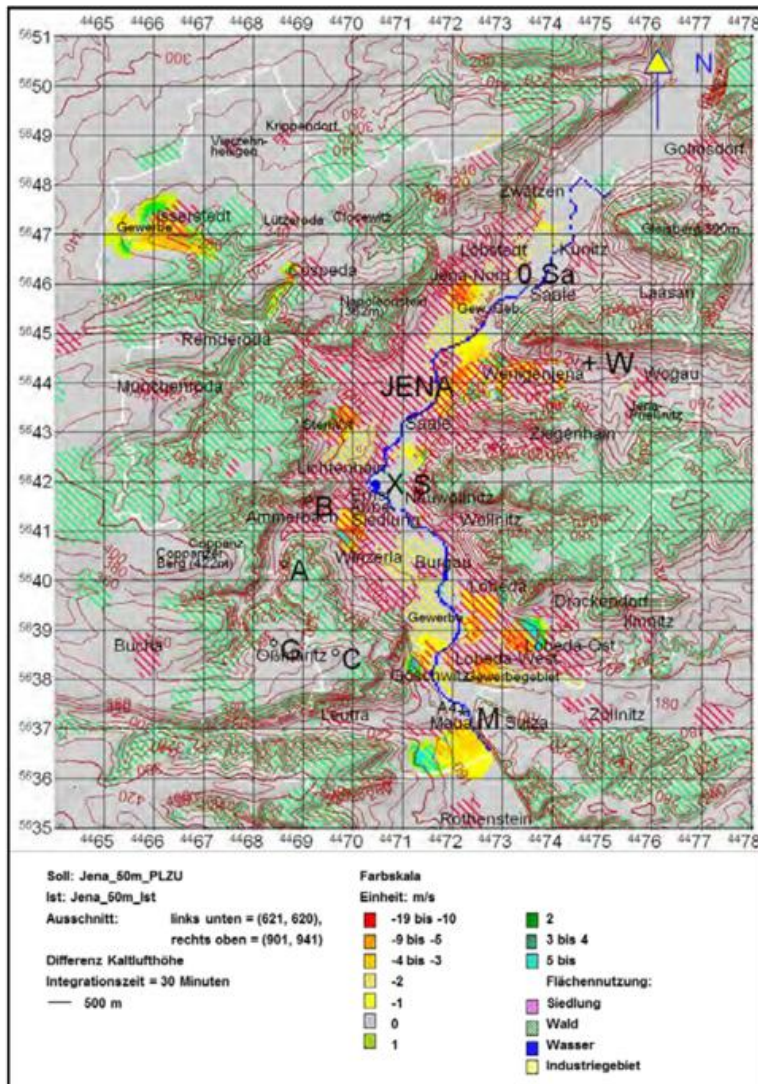


Abbildung 54: Kaltluflthohendifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach 30 Minuten

Kaltluflthöhe nahe einigen Hindernissen ausbilden kann. Die Kaltluflthöhungsgebiete erstrecken sich i. d. R. über etwas kleinere Flächen als die Kaltluftabsenkungsgebiete und liegen zumeist im Luv letzterer. Lediglich in Lobeda-West und Jena-Nord sind nach 30 Minuten Integrationszeit keine Kaltluflthöhungen im Bereich der neuen Bebauung auszumachen. Die Maxima der Kaltluflthöhenreduzierung (negatives Vorzeichen) gegenüber der Istsituation liegen nach 30 Minuten Simulationszeit mit bis zu 19 m in Lobeda-West und in Jena-Nord. Die Maxima der Erhöhung der Kaltluflthöhe (positives Vorzeichen) gegenüber der Istsituation sind mit bis zu 9 m für Maua, Winzerla, Göschwitz, Lobeda-Ost und Wenigenjena (dispers) auszumachen.

genjena (dispers) auszumachen.

Nach 90 Minuten simulierter Strahlungsnacht sind Kaltluftabsenkungs- und Kaltluflthöhungsgebiete immer noch im Stadtgebiet auszumachen. Allerdings treten im Vergleich zur Istsituation die Verminderungen mit 1 bis 9 m generell in abgeschwächter, die Erhöhungen mit 1 bis 19 m stellenweise in verstärkter Form auf.

Insgesamt hat sich nach 90 Minuten Simulationszeit das Gebiet mit einer Kaltluftverminderung gegenüber der Istsituation flächenmäßig stark ausgedehnt, dabei beträgt die Abnahme jedoch im Schnitt nur etwa 1 m Höhe (negatives Vorzeichen). Dies trifft vor allem auf ein ausgedehntes Band südöstlich von Isserstedt über den Isserstedter Grund, das Ziskauer Tal, den Schwabhäuser Grund bis in das Mühlthal zu sowie für einen ausgesprochen breiten Streifen, ausgehend vom Fuß des Jenzigs über die Untere Aue bis zur nördlichen Stadtgrenze bei Zwätzen. Die Gebiete mit zusätzlichen Kaltluftstaus, verbunden mit einer Kaltluflthöhung gegenüber dem Istzustand (z. B. bei Wenigenjena, Lobeda-Ost und Maua), haben sich deutlich in ihrer „Stärke“ und etwas in ihrer Flächenausdehnung vergrößert. Am deutlichsten tritt dies vor dem Talausgang bei Wenigenjena zu Tage.

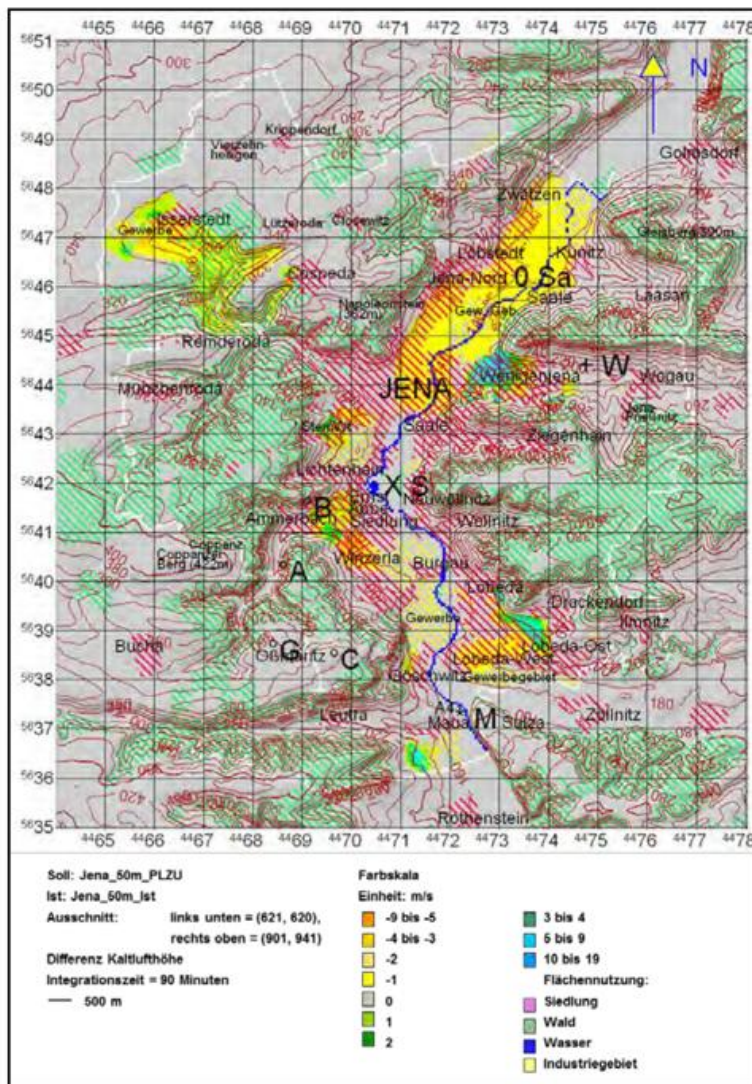


Abbildung 55: Kaltfluthöhendifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach 90 Minuten

Nach zwei Stunden simulierter Strahlungsnacht hat sich das Gebiet mit einer Kaltluftverminderung über 1 m Höhe (negatives Vorzeichen) gegenüber der Istsituation flächenmäßig insgesamt deutlich verringert. Insbesondere nördlich der Ausgänge des Gembdentials und des Mühltales über die Untere Aue bis zur nördlichen Stadtgrenze bei Zwätzen sind keine nennenswerten Effekte mehr festzustellen. Sie liegen in diesem Fall bereits unter dem dargestellten Schwellenwert von 1 m Höhe. Auch in Maua und Lobeda-West ist die Abnahme der Kaltfluthöhe mit Größen über 1 m auf ein Minimum geschrumpft. Lediglich um Isserstedt hält die flächenmäßige Ausbreitung der Kaltluftreduzierung (ca. 1 m) gegenüber dem Istzustand weiterhin an. Im Bereich dieser Hoch-

fläche und der umgebenden Seitentäler sind die gesamte Strahlungsnacht hindurch ähnliche Strömungsverhältnisse vorzufinden. Das Strömungssystem kommt dort wegen der starken Gefälleunterschiede auf kurzer Distanz, vergleichsweise geringer Rauigkeiten, eines flächenmäßig großen Kaltlufteinzugsgebietes und einer hohen lokalen Kaltluftproduktionsrate bei gleichzeitig geringen Kaltluftmächtigkeiten nicht zum Erliegen. Im Westen von Wenigenjena und in Lobeda-Ost treten nach zwei Stunden Simulationszeit im Planzustand gegenüber dem Istzustand hingegen weiterhin deutliche Kaltluftstaus (Erhöhung) (1 bis 19 m) auf, die auch noch bis zur Mitte der Strahlungsnacht anhalten. Zwischen Ammerbach und Winzerla zeichnet sich ein relativ ausgewogenes flächenmäßiges Verhältnis von Kaltluftstaus (Zuwächse) (1 bis 2 m) und Kaltluftreduzierung (1 bis 9 m) ab. Dabei sind die Zuwächse grob am nördlichen Talaustritt, die Abnahmen im Süden geplanter Bebauung auszumachen. In Lobeda-Ost wird die erhöhte Kaltfluthöhe durch den Zustrom von den Hängen gespeist. Die Kaltluft staut sich hier offenbar vor der neuen Bebauung (im Luv). Dahinter (im Lee der Bebauung) zeigt sich eher eine Reduzierung der Kaltfluthöhe.

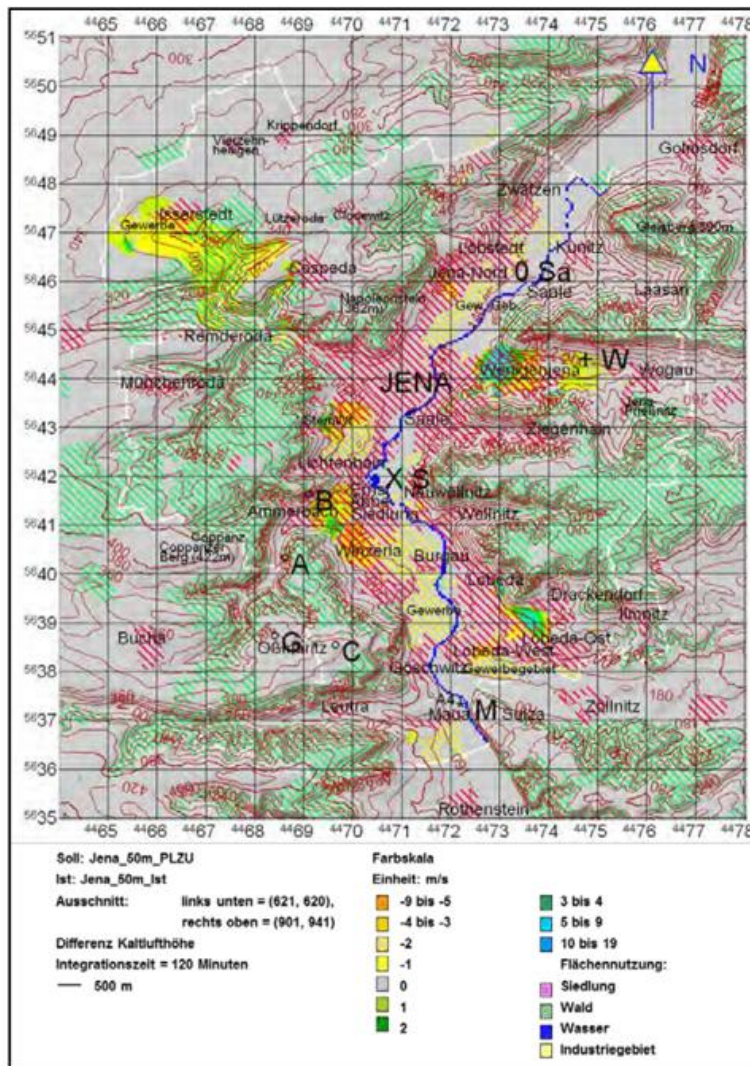


Abbildung 56: Kaltluflhöhendifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach zwei Stunden

der Istsituation. Nach einer Stunde Simulationszeit ist in den Gebieten mit neuer Bebauung ein um ca. 0,5 bis etwa 20,0 m³/ms verminderter Volumenstrom (negatives Vorzeichen) zu erkennen (Abbildung 57). Allerdings beschränkt sich diese Abnahme jeweils nur auf einen sehr engen Raum. In Wenigenjena ist der verminderte Volumenstrom am Talaustritt über den geplanten Verdichtungen am Fuß des Jenzigs und des Hausbergs auszumachen. Bei Isserstedt ist ebenso nördlich und südlich etwa über den Erweiterungsflächen des Gewerbegebietes ein reduzierter Volumenstrom festzustellen, wie auch in Maua, Ammerbach und ähnlich in Lobeda-Ost. Punktuell sind daneben durch Umlenkungseffekte der Kaltluft auch erhöhte Volumenströme auszumachen (positives Vorzeichen), vor allem in Jena-Nord entlang der Saale (ca. 0,5 bis 2,0 m³/ms) sowie in unmittelbarer Nachbarschaft zu den nachträglich verdichteten Flächen in Lobeda-Ost, Winzerla, Maua und Wenigenjena (ca. 0,5 bis 5,0 m³/ms).

Die Veränderungen nach vier Stunden Simulationszeit gegenüber einer Stunde Simulationszeit halten sich in recht engen Grenzen (Abbildung 58). In Wenigenjena schwächt sich die Volumenstromreduzierung (negatives Vorzeichen) ab und erreicht nur noch Werte bis maximal etwa 10,0 m³/ms. Allerdings reicht der verminderte Volumenstrom nun bis zum Ausgang des Ziegenhainer Tals. Die Erhöhung des Kaltluftvolumenstroms entlang der Saale bei Jena-Nord hebt sich zur Mitte der

Da Zu- und Abnahme der Kaltluflhöhe im Planzustand gegenüber dem Istzustand im weiteren Simulationsverlauf auf Grund weiter oben genannter Effekte zunehmend nachlassen und sich keine weiteren nennenswerten Abweichungen ergeben, wird auf die Darstellung weiterer Karten für die zweite Nachthälfte verzichtet.

Die historische Kernstadt ist hinsichtlich der Kaltluflhöhenverminderung kaum betroffen. Ebenso ergeben sich diesbezüglich für Burgau, Wöllnitz, Neuwöllnitz oder die Ernst-Abbe-Siedlung keine nennenswerten Effekte.

Abbildung 57 bis Abbildung 59 zeigen die Entwicklung des Kaltluftvolumenstromes in m³/ms für den Planzustand gegenüber

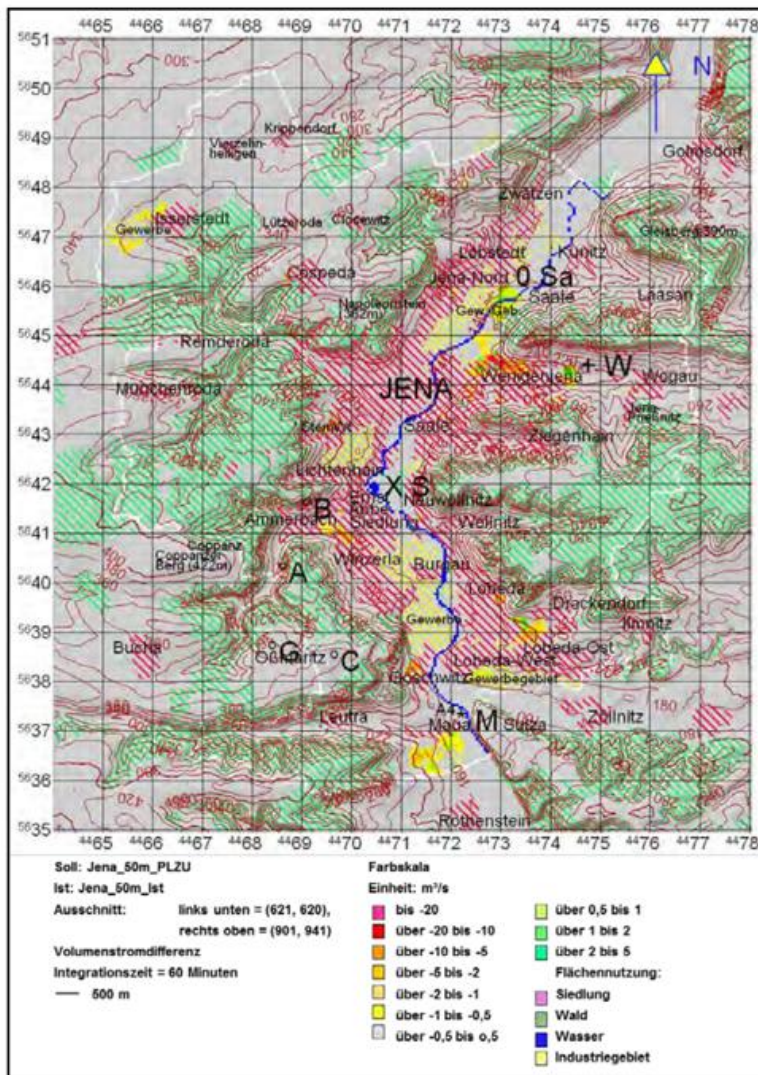


Abbildung 57: Kaltluftvolumenstromdifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach einer Stunde

Abweichungen gegenüber dem Istzustand auszumachen. Allerdings bleibt die Situation des unmittelbaren Nebeneinanders von Arealen, die durch eine Zu- bzw. Abnahme gekennzeichnet sind, bestehen (Abbildung 59). Es fällt auf, dass der Volumenstrom des Planungszustandes in Jena-Nord zwischen den neu bebauten Arealen gegenüber dem Istzustand deutlich erhöht ist (bis ca. 10 m³/ms), über der Bebauung jedoch noch stärker gegenüber dem Istzustand herabgesetzt ist (bis zu etwa 20 m³/ms). Bei Zwätzen liegen westlich der Saale Zonen mit einer Volumenstromerhöhung (zwischen Hang und baulicher Nachverdichtung von Wohnen und Gewerbe) und -reduzierung (über den neu verdichteten Flächen) dicht beieinander. Am Ausgang des Gembdentals bei Wenigenjena und südwestlich davon sind nach acht Stunden Simulationszeit vermehrt reduzierte Volumenströme festzustellen, die beim Eintritt in das Saaletal stark entlang der Hänge und Bebauung abgelenkt werden und durch die in Richtung Stadtzentrum zunehmend erhöhte Bebauung auch eine gewisse Verminderung erfahren.

Westlich des Gembdentals, zwischen der Karl-Liebkecht-Straße, der Straße Am Erlkönig in Richtung Saale bis etwa zur Bahntrasse und B 88 (Camburger Straße), ist hingegen eine Erhöhung des Kaltluftvolumenstromes um ca. 0,5 bis 5,0 m³/ms auszumachen. In Lobeda-Ost und -West, Winzerla, Göschwitz und Maua ist ebenfalls nach acht Stunden über den neu versiegelten Flächen mit verminderten Volumenströmen (ca. 0,5 bis 5,0 m³/ms) zu rechnen. In direkter Nachbarschaft hierzu ergeben sich infolge

simulierten Nacht auf. Dafür zeichnet sich ein reduzierter Volumenstrom westlich der Saale etwa über den neu verdichteten Arealen in Jena-Nord ab. Dort ergeben sich um etwa 0,5 bis 5,0 m³/ms herabgesetzte Volumenströme. Gleiches zeigt sich für Lobeda-West, Maua und Winzerla. An den Flanken der neuen Bebauung der vorgenannten Stadtteile sind hingegen Volumenstromerhöhungen teilweise bis zu 5,0 m³/ms auszumachen. Bei Isserstedt ist mit keiner großen Veränderung im Vergleich zum Ausschnitt nach einer Stunde zu rechnen.

Im Gegensatz zu Kaltfluthöhe und Strömungsgeschwindigkeit sind hinsichtlich der Entwicklung des Volumenstromes am Ende der Simulationszeit die größten

von Düsen-, Stau- und Kanalisierungseffekten erhöhte Volumenströme (um etwa 0,5 bis 10 m³/ms). Im Vergleich zum vorherigen Zeitschritt ist für das erweiterte Gewerbegebiet um Isserstedt keine sonderliche Veränderung festzustellen.

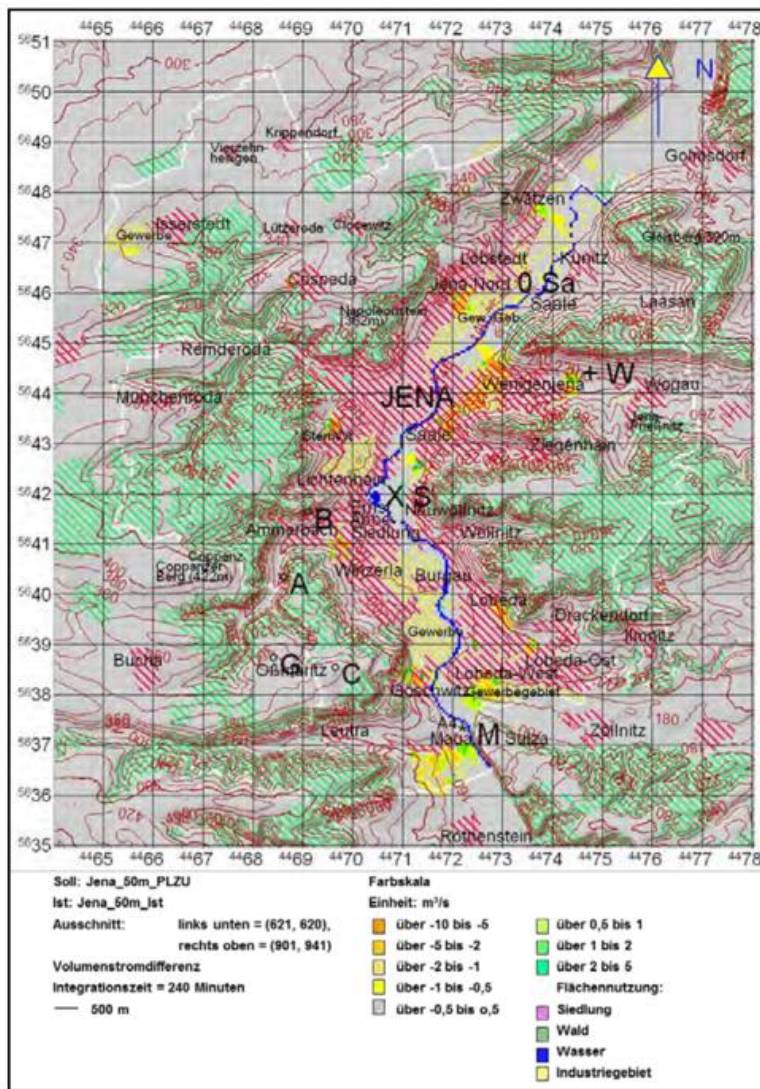


Abbildung 58: Kaltluftvolumenstromdifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach vier Stunden

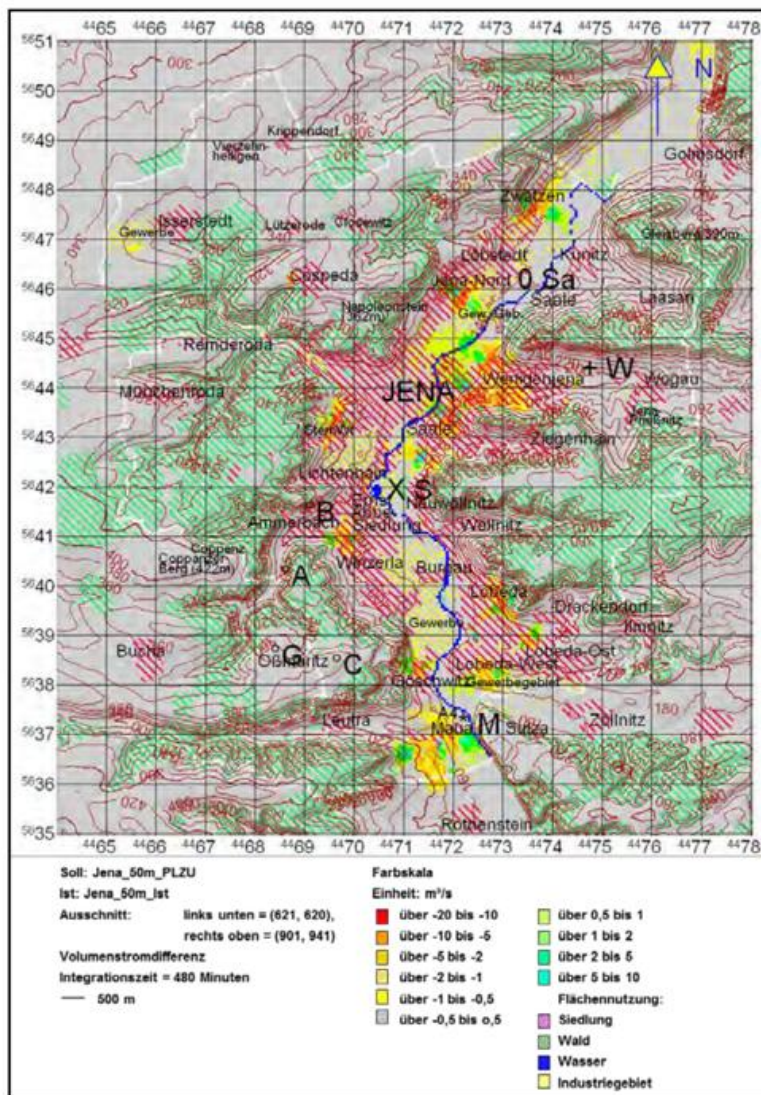


Abbildung 59: Kaltluftvolumenstromdifferenz im Planzustand im kleineren Kerngebiet um Jena (14 km * 16 km) nach acht Stunden

Der Vollständigkeit halber sind nachfolgend (Abbildung 60 bis Abbildung 62) die Geländequerschnitte für die Kaltfluthöhe in m und die Normalkomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s für den Planzustand aufgeführt. Allerdings fallen die Unterschiede gegenüber dem Istzustand äußerst gering aus und beschränken sich zumeist auf die westliche Talsohle und den westlichen Hangbereich des Saaletals.

Mit Blick auf die Entwicklung der Kaltfluthöhe (insgesamt produzierte Kaltluft) kommt es über die gesamte Simulationszeit zu keinen spürbaren Veränderungen. Nach acht Stunden ist das Tal wie im Istzustand gut mit Kaltluft aufgefüllt. Aber hinsichtlich der mittleren Strömungsgeschwindigkeit ist zu Beginn und Ende der Strahlungsnacht mit leichten Abweichungen zwischen Planzustand und Istzustand zu rechnen. Nach einer Stunde Simulationszeit kommt es in einem schmalen Streifen westlich der Saale zunächst zu einer Verminderung (um ca. -0,1 bis 0,1 m/s) gegenüber dem Istzustand (ca. 0,1 bis 0,5 m/s). Nach vier Stunden zeigt sich in der gewählten Klassenaufteilung keine ersichtliche Veränderung. Am Ende der Simulationszeit ist am Hang westlich der Saale (ca. 200 m über NN) eine Abnahme der Normalkomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit des Planzustandes gegenüber dem Istzustand (Planzustand: ca. 0,1 bis 0,5 m/s; Istzustand: ca. 0,5 bis 1,5 m/s) auszumachen. Der gesamte Kaltluftstrom (m³/s) ist bei jedem der Zeitausschnitte im Vergleich zum Istzustand nur leicht herabgesetzt. Beim Ausschnitt nach einer Stunde Simulationsdauer ist die

Abweichung erwartungsgemäß am größten. Sie beträgt rund 6,75 %. Nach vier Stunden liegt die Differenz bei etwa 0,44 % und nach acht Stunden unterscheidet sich der Plan- vom Istzustand um nur etwa 0,51 %.

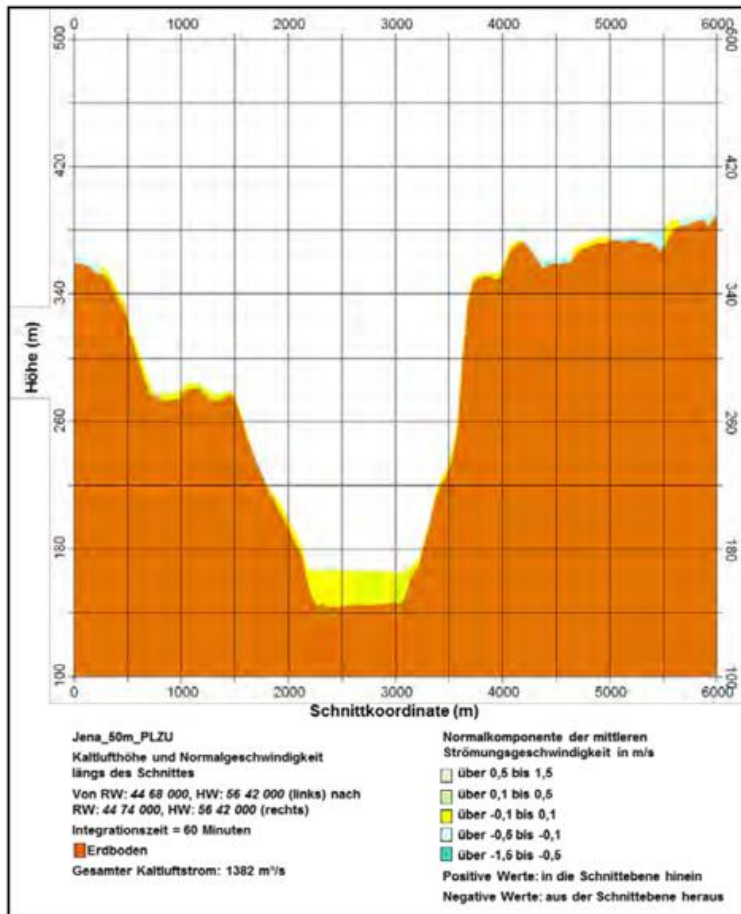


Abbildung 60: Kaltluflhöhe und Normalkomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s nach einer Stunde, Planzustand (Geländequerschnitt)

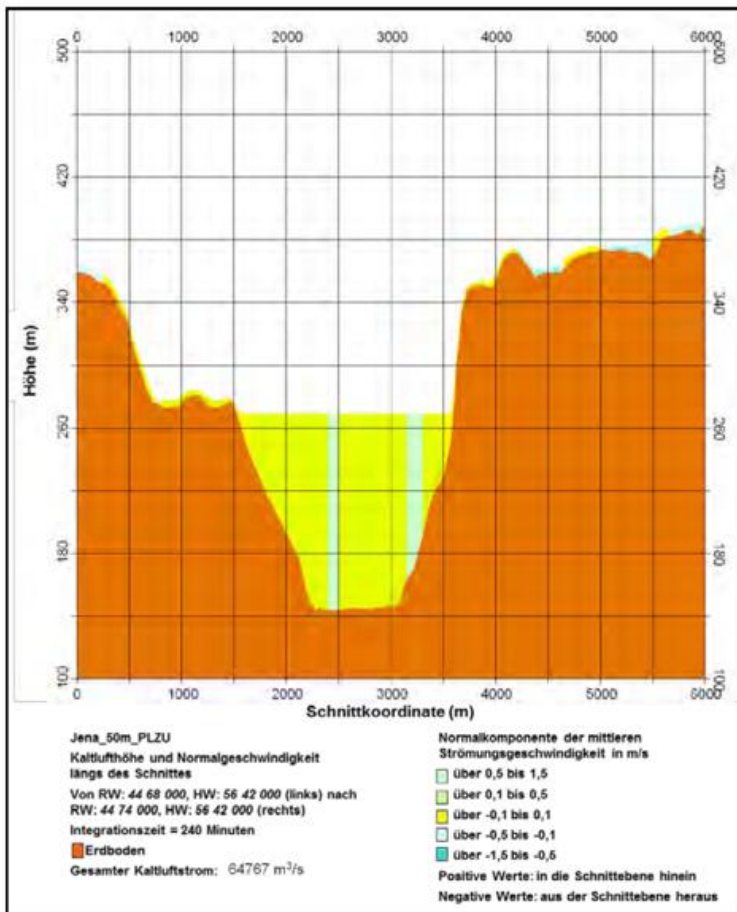


Abbildung 61: Kaltluflhöhe und Normalkomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s nach vier Stunden, Planzustand (Geländequerschnitt)

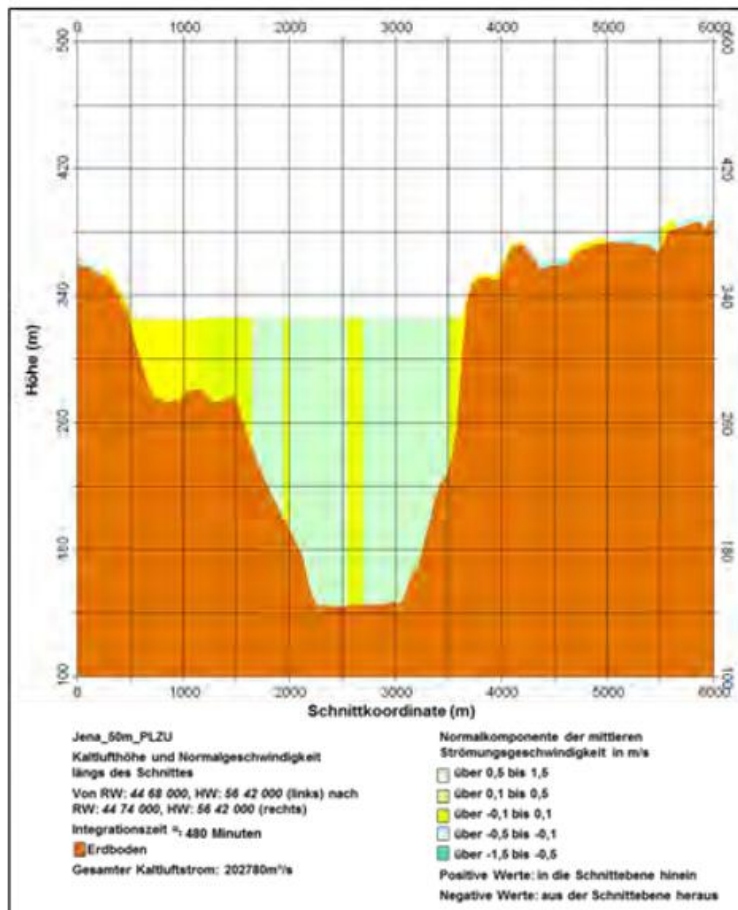


Abbildung 62: Kaltlufluthöhe und Normalkomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s nach acht Stunden, Planzustand (Geländequerschnitt)

12.5.3 Zusammenfassung Ergebnisse Ist- und Planzustand

Neu bebaute Areale verteilen sich gemäß Planzustand über das gesamte Stadtgebiet, in mehr oder minder starkem Umfang (vgl. Abbildung 40 und Abbildung 50). In Abhängigkeit vom Ausmaß der geplanten Bauvorhaben fallen die Auswirkungen auf die Kaltluftverhältnisse (Kaltluftbildungspotential, flächenhafte Verteilung der Kaltlufluthöhe und ihrer mittleren Fließgeschwindigkeit) im Verlauf einer windschwachen Strahlungsnacht entsprechend stark oder weniger stark aus.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass durch die zusätzliche Bebauung:

- die Oberflächenrauigkeit im Jenaer Stadtgebiet zunimmt und neue Kaltluftstaubereiche entstehen (Strömungshindernisse),
- die lokale Kaltluftproduktion im Jenaer Stadtgebiet (unmittelbar über neu verdichteten/bebauten Flächen und damit insgesamt) abnimmt und infolge dessen der Kaltluftadvektion aus dem Umland eine zunehmende Bedeutung zukommt,
- die Strömungsgeschwindigkeit (unmittelbar über neu verdichteten Flächen) abnimmt,
- Düsen- und Kanalisierungseffekte an den Flanken neuer Bebauung nicht auszuschließen sind

(vgl. Abbildung 51 bis Abbildung 54 und Abbildung 56). Vor allem macht sich eine weitere Bebauung des Ausgangsbereiches des Gembdentals durch erhöhte Volumenströme im Stadtgebiet und zugleich herabgesetzten Volumenströme über den neu verdichteten Flächen bemerkbar. Das Auftreten von Düsen- und Kanalisierungseffekten ist – je nach Art und Maß der Bebauung sowie deren Anordnung im Raum – nicht auszuschließen (vgl. Abbildung 51 oder Abbildung 57). Es ist davon auszugehen, dass sich an den Flanken der neu bebauten Flächen erhöhte Volumenströme und Strömungsgeschwindigkeiten ergeben können (z. B. in Lobeda-West, Jena-Nord, Wenigenjena).

Es ist mit einer Verminderung der Kaltluflhöhe über neu bebauten Flächen und einer vermehrten Ansammlung von Kaltluft im Luv neuer Bebauung zu rechnen, vor allem zu Beginn windschwacher Strahlungsnächte. An neuen Hindernissen wird sich die Kaltluft anstauen, bis sie die notwendige Mächtigkeit erreicht hat, um diese zu überströmen. Andererseits umströmt advehierte Kaltluft einzelne neue Gebäude. Hierbei kann es zu Kanalisierungs- und Düseneffekten kommen, wobei Volumenströme und Strömungsgeschwindigkeiten im Planzustand im Gegensatz zur Istsituation gewiss stellenweise höher ausfallen werden. Im Bereich des Gembdentals können sich beispielsweise entsprechende Effekte einstellen, da beiderseits des Talausganges zusätzliche Bebauung geplant ist.

Zusammenfassend ist zu konstatieren, dass zu Beginn der Strahlungsnacht die lokale Kaltluftproduktion gegenüber der Kaltluftadvektion aus der näheren Umgebung überwiegt. Dies ändert sich jedoch im weiteren Verlauf der Nacht. Der „Wegfall“ kaltluftproduzierender Flächen trägt allgemein zur Verminderung der lokalen Kaltluftproduktion bei. Folglich kommt Advektionsvorgängen aus der Umgebung im Planzustand eine größere Bedeutung zu. In der Gesamtbilanz zeigen sich die größten Unterschiede vom Ist- zum Planzustand vorwiegend in den ersten Stunden der simulierten Strahlungsnacht. Diese Unterschiede der ersten Stunden der Strahlungsnacht treten – wird wirklich nur die bodennahe Schicht der Bebauung betrachtet – zu einem gewissen Teil, jedoch durch Überströmungseffekte in der Gesamtbilanz überkompensiert und verdeckt, auch noch in der Mitte und in der zweiten Nachthälfte auf. Da aber für die Gesamtbilanz ein kontinuierliches Nachströmen von Kaltluft aus den Seitentälern und von den umgebenden Hängen in das Saaletal – trotz zusätzlicher Bebauung – über die gesamte Nacht gewährleistet ist, unterscheiden sich Kaltluftvolumen und Kaltluftstrom am Ende der Simulationszeit im Planzustand gegenüber der Istsituation letztlich nur um einen geringen Betrag (vgl. Abbildung 60 bis Abbildung 62).

12.6 Vergleich Modellergebnisse mit Messungen

Die KLAM_21-Simulationsergebnisse spiegeln die Resultate der Messungen mittels zweier Ultraschallanemometer, mehrerer Windmasten an temporär eingerichteten Messstationen und stationären Messstationen sowie eines SODAR-Gerätes vor Ort für windschwache Strahlungswetterlagen recht gut wider (vgl. DWD-Bericht 243, Kapitel 5.3). Die Ergebnisse der bodennahen Schwachwindmessungen zeigen z. B., wie auch die KLAM_21-Simulationsergebnisse, dass die mittleren Windgeschwindigkeiten in den stark geneigten, engen Seitentälern gegenüber breiteren Tälern mit einer geringeren Neigung etwas höher ausfallen (vgl. Kapitel 5.3.4 ebd.). Anhand der Ergebnisse der Schwachwindmessungen ist zu schließen, dass Kaltluftströme in den Seitentälern zeitlich etwas eher einsetzen als im Saaletal. In den Seitentälern bildet sich im Vergleich frühzeitig ein talabwärts gerichteter Kaltluftfluss mit etwas höheren Fließgeschwindigkeiten als im Saaletal aus. Dabei strömt die Kaltluft aus den Seitentälern der Gefälleneigung folgend ins Saaletal (Talabwind) und trägt nach und nach zur Auffüllung des Saaltetals mit Kaltluft bei (Advektion).

Im Saaletal selbst stellt sich, wie die KLAM_21-Ergebnisse und SODAR-Datenauswertungen zeigen, noch während der ersten Nachthälfte ein Talabwind entlang der Saale ein, der sich im Verlauf der windschwachen Strahlungsnacht hinsichtlich seiner Mächtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit weiter verstärkt und ein vom überregionalen Höhenwind losgelöstes, autarkes System darstellt (vgl. Kapitel 5.3.2.3.1 ebd.). Dieser Saaletalwind weht allerdings im Bereich des Gebäudeniveaus mit (im Mittel) vergleichsweise geringen Geschwindigkeiten von ca. 1,0 m/s. Über dem Dachniveau können sich (im Mittel) etwas höhere Geschwindigkeiten von ca. 1,0 bis 2,5 m/s und darüber hinaus ausbilden (vgl. Kapitel 5.3.2.3.1 und 5.3.4 ebd.).

Anhand der Messergebnisse wird deutlich, dass das Saaletal bezogen auf den Messzeitraum und ausgewählte windschwache Strahlungsnächte eher schwach durchlüftet ist, was sich über die erhöhten Oberflächenrauigkeiten erklärt (vgl. Kapitel 5.3.2.3 ebd.): Kaltluftflüsse in Bodennähe weisen eine mittlere Geschwindigkeit um 1 bis zu 2 m/s auf (vgl. Kapitel 5.3.4 und 5.3.5 ebd.). Auch anhand der Modellrechnungen zeichnen sich nur geringe Strömungsgeschwindigkeiten ab. Unter zusätzlicher Einbeziehung der temporären Stationsmessergebnisse wird deutlich, dass der Wind im Saaletal erwartungsgemäß stark durch die lokale Orografie und Topografie determiniert wird (vgl. Kapitel 5.3.2.3 ebd.). Die spiegelt sich auch in den KLAM_21-Karten sehr gut wider.

12.7 Zusammenfassung

Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes simuliert die zeitliche Entwicklung von Kaltluftflüssen (vertikale Mächtigkeit und horizontale Strömungsrichtung) und die Ansammlung von Kaltluft für windschwache Strahlungsnächte in einem beliebig auswählbaren, rechteckig begrenzten Untersuchungsgelände in Abhängigkeit von der Flächennutzung (z. B. Bewuchs, Gebäude) und der damit verbundenen Kälteproduktionsrate (in W/m^2) sowie der „Rauigkeit“ und weiterer Parameter, wie z. B. die Grundflächenzahl, die mittlere Gebäudehöhe, der Wandflächenindex, der Blattflächenindex, die mittlere Baumhöhe und der mittlere Bedeckungsgrad des Bodens mit Bäumen als Maß für den aerodynamischen Widerstand (Bodenreibung) beim Überströmen einer Fläche. Für die Erstellung des vorliegenden Berichtes wurde das Modellgebiet so gewählt, dass es die wesentlichen Einzugsgebiete der Kaltluft für das Saaletal und seiner Seitentäler umfasst (ca. 38 km südlich bis 38 km nördlich Jena). In Südwest-Nordost-Richtung erstreckt sich das Rechengelände entlang der Saale von den nordöstlichen Ausläufern des Thüringer Waldes südwestlich von Rudolstadt bis nach Halle (Saale) im Nordosten.

Windschwache Strahlungsnächte, in denen sich auf Grund der unterschiedlichen Strahlungseigenschaften unterschiedlicher Landnutzungen horizontale Unterschiede der Lufttemperatur und damit lokale oder mesokosmische Windsysteme (z. B. Kaltluftflüsse) einstellen können, treten in Jena im Jahresmittel etwa an 36 bis 45 Nächten auf (vgl. DWD-Bericht 243, Kapitel 5.2.6.2). In diesen Nächten kann es in der Jenaer Innenstadt zu um mehr als 4 °C höheren Lufttemperaturen kommen als im etwa gleich hoch gelegenen Umland (vgl. Anlage 2 zum DWD-Bericht 243, Kapitel 13.4).

Zudem kann sich, wie die Ergebnisse der KLAM_21-Simulationen für die Istsituation ergeben, während einer windschwachen Strahlungsnacht ein das gesamte Jenaer Saaletal umfassendes thermisch induziertes, regionales Windsystem ausbilden (vgl. DWD-Bericht 243), das der Geländeneigung des Saaletals folgend flussabwärts vordringt. Dieser talabwärts gerichtete nächtliche Wind erreicht dabei im Jenaer Stadtgebiet Geschwindigkeiten von im Mittel 1,0 m/s im Bodenniveau und ab dem Dachniveau Werte um ca. 1,0 bis 2,5 m/s und ggf. darüber hinaus.

Die KLAM_21-Simulationsergebnisse für die Istsituation zeigen die für Jena typischen Strömungsverhältnisse während einer nächtlichen Schwachwindsituation auf. Die Ergebnisse von im Jenaer Stadtgebiet durchgeführten Feldmessungen (vgl. ebd.) bestätigen die KLAM_21-Simulationsergebnisse für den Istzustand im Großen und Ganzen.

Zusätzlich zur Istsituation wurde eine vom Auftraggeber vorgegebene Planungsvariante mit KLAM_21 für das administrative Stadtgebiet von Jena simuliert.

Die Simulationsergebnisse für die Planungsvariante lassen infolge geplanter Flächenumnutzungen und damit verbundener – zumeist – erhöhter Rauigkeiten vorrangig während der ersten Hälfte der simulierten Strahlungsnacht Änderungen im Kaltluftwindfeld gegenüber der Istsituation erkennen. Davon betroffen sind vor allem Bereiche mit bestehender Wohnbebauung, für die eine Nachverdichtung vorgesehen ist und Bereiche, in denen eine Erweiterung von Industrie- und Gewerbeflächen geplant ist, aber auch die direkte und weitere Umgebung (ca. 1 km bis zu etwa 4 km Entfernung) der vorgenannten Flächen. Dabei treten positive und negative Abweichungen gegenüber dem Istzustand (Geschwindigkeitsdifferenzen, Kaltluflhöhdifferenzen, Volumestromdifferenzen) zumeist in direkter Nachbarschaft zueinander auf.

Für den Planzustand ergibt sich gegenüber dem Istzustand wegen der zumeist höheren Rauigkeit eine Geschwindigkeitsverminderung der anströmenden Kaltluft um etwa 0,05 bis maximal 2,0 m/s. In den angrenzenden Arealen oder zwischen den nachträglich verdichteten Flächen kommt es z. T. parallel zu einer Erhöhung der Kaltluftgeschwindigkeit in einem Bereich von ca. 0,05 bis maximal etwa 1,0 m/s.

Die Gebiete, in denen mit einer Änderung der mittleren Kaltluflhöhe gegenüber dem Istzustand zu rechnen ist, erstrecken sich im Bereich und Umfeld derjenigen Flächen, für die eine veränderte Landnutzung geplant ist. Dabei kommt es über den im Planzustand neu verdichteten Flächen (Erwärmungsflächen) insbesondere während der ersten simulierten Nachthälfte zu einer Kaltluftabsenkung um bis zu maximal 19 m (vgl. Abbildung 54). Die Zunahme der Kaltluflhöhe in benachbarten Arealen beträgt bis zu maximal 19 m (Abbildung 55).

Kaltlufterhöhungs- und -absenkungsgebiete zeichnen sich etwa bis zur Strahlungsnachtmittag am besten in den Ergebniskarten für den Planzustand gegenüber der Istsituation ab, da zu dieser Zeit die lokale Kaltluftproduktion die Kaltluftadvektion aus dem Umland überwiegt. Zudem ist die lokale Kaltluftproduktion im Planzustand gegenüber dem Istzustand infolge neu geschaffener „Erwärmungsflächen“ und Strömungshindernisse herabgesetzt. Mit weiterem Anwachsen der Kaltluft über die simulierte Strahlungsnacht gleichen sich anfängliche Unterschiede (Ist- versus Planzustand) – bezogen auf die dann sehr viel mächtigere und über das Dachniveau der Bebauung hinausgehende Kaltluftschicht – jedoch zunehmend aus. Kaltluftadvektion aus dem Umland überwiegt die lokale Kaltluftproduktion im Stadtgebiet etwa ab der Mitte der simulierten Strahlungsnacht und füllt das Saaletal zunehmend mit Kaltluft auf. Da für den betrachteten Planungsfall Flächenanteile mit zusätzlicher baulicher Verdichtung gegenüber zusätzlichen Grünflächen und Rückbaumaßnahmen überwiegen, übersteigen die Kaltluftabsenkungsgebiete die Kaltlufterhöhungsgebiete bezogen auf deren flächenmäßige Ausdehnung (Abbildung 55).

Betragsmäßig übersteigen die Kaltlufterhöhungsgebiete die Kaltluftabsenkungsgebiete. Insbesondere zur Mitte der simulierten Strahlungsnacht dehnen sich die Kaltlufterhöhungsgebiete (Staugebiete) über einige der bestehenden und geplanten Flächenerweiterungen (bauliche Nachverdichtung) hinaus aus. Dies trifft vor allem auf ein ausgedehntes Band zu, das sich südöstlich von Isserstedt über den Isserstedter Grund,

das Ziskauer Tal, den Schwabhäuser Grund bis in das Mühlthal erstreckt sowie für einen ausgesprochen breiten Streifen, ausgehend vom Fuß des Jenzigs über die Untere Aue bis zur nördlichen Stadtgrenze bei Zwätzen.

Kaltfluthöhendifferenzen sind insgesamt vorwiegend während der ersten Nachthälfte festzustellen. Durch kontinuierliche Kaltluftadvektion aus der Umgebung über den gesamten Simulationszeitraum wird das Saaletal zum Ende der Nacht bis knapp zum Niveau der Randhöhen mit Kaltluft aufgefüllt. Es ergeben sich dann auch wegen der insgesamt sehr großen Kaltluftmächtigkeit und verstärkter Überströmungen im Saaletal kaum mehr signifikante Unterschiede bzgl. der Kaltfluthöhe des Plan- und Istzustandes.

Änderungen in den Kaltluftvolumenströmen für den Plan- gegenüber dem Istzustand sind sowohl am Beginn als auch am Ende der Simulationszeit auszumachen (Abbildung 57 bis Abbildung 59). Minderungen betragen bis zu maximal ca. 20 m³/ms und sind über den Flächen mit neu erhöhter Rauigkeit zu finden. Erhöhungen treten in direkter Nachbarschaft hierzu auf und betragen bis zu maximal 10 m³/ms.

Die Ergebnisse der simulierten Kaltluftverhältnisse zeigen, dass Änderungen infolge der Planvariante nicht über die politisch-administrative Stadtgrenze hinausgehen. Im Norden dehnen sie sich allerdings z. T. bis kurz vor die Stadtgrenze aus. Durch Nachverdichtung verursachte Auswirkungen auf das Kaltluftfeld machen sich in moderatem Umfang vom Ausgang des Gembdentals nach Westen bis über die Saale und den Bahndamm hinweg zur B 88 bemerkbar (ca. 2 km Luftlinie), nach Süden bis zum Pennickental (ca. 1 km Luftlinie) sowie nach Norden bis zur unteren Aue (etwa 3 bis 4 km Luftlinie). Ausschlaggebend für diesen großflächigen Einfluss sind geplante Baumaßnahmen in Wenigenjena. Aber auch die zusätzliche Bebauung im Westen von Jena-Nord wirkt sich bis zur Saale, in die Untere Aue und nach Zwätzen aus. Insbesondere die Erweiterung des Gewerbegebietes bei Isserstedt sorgt für großräumige Abweichungen gegenüber dem Istzustand, die bis weit in das Mühlthal reichen – ausgehend vom Standort sind es ca. 3 bis 4 km bis etwa zum Münchenrodaer Grund.

Die mit der Schaffung neuer Bebauung (Wegfall von Kaltluftproduktionsflächen durch neue Bebauung) bzw. Strömungshindernissen einhergehenden und zu erwartenden „Verluste“ bzgl. des Kaltluftstroms (m³/s) halten sich in Grenzen. Am größten fallen sie (gegenüber der Istsituation) mit knapp 7 % zu Beginn der simulierten Strahlungsnacht aus, gleichen sich jedoch zum Ende der Simulationszeit durch Kaltluftadvektion aus der Umgebung, vor allem aber auch prozentual wegen der dann im Saaletal bereits sehr großen Kaltluftmächtigkeiten – mit großem Anteil von ausgleichender Dachüberströmung – annähernd aus. Der Unterschied zum Istzustand beträgt dann im Mittel wegen des relativ kleinen bodennahen Niveaus in Relation zur großen Kaltluftmächtigkeit nur noch etwa 0,5 %. Die verminderte lokale Kaltluftproduktion und teilweise herabgesetzte Strömungsgeschwindigkeit über den von Nutzungsänderungen betroffenen Flächen (zumeist Nachverdichtung) wirkt sich über die gesamte Kaltfluthöhe gemittelt vorrangig innerhalb der ersten Nachthälfte im Jenaer Stadtgebiet aus. Dies wird sich in einem verzögerten Kaltlufteintrag und einer anteilig nur geringen Gebäudeüberströmung äußern. Zum Ende der simulierten Strahlungsnacht wird das komplette Stadtgebiet und damit das Jenaer Saaletal wie auch im Istzustand gut mit Kaltluft aufgefüllt sein. Kuppen und Anhöhen ragen über die gesamte Simulationszeit aus der Kaltluft heraus (vgl. DWD-Bericht 243).

Aussagen zu Auswirkungen erwarteter regionalklimatischer Änderungen und städtebaulicher Veränderungen auf die thermische Belastungssituation Jenas werden erst im Einsatz des mikroskaligen urbanen Klimamodells MUKLIMO_3 möglich (siehe Anlage 2 zum DWD-Bericht 243).

12.8 Hinweise

Modelle dienen dazu, die Verhältnisse der Realität so gut es geht abzubilden. Eine vollkommene Übereinstimmung von Modellergebnissen mit den Bedingungen der Realität ist streng genommen unmöglich, da Modellrechnungen i. d. R. vereinfachende, vergrößernde oder verallgemeinernde Annahmen zugrunde liegen. Lokale Besonderheiten, die bei der Modellierung nicht oder nur unzureichend berücksichtigt werden, können sich auch nicht in den Ergebnissen widerspiegeln. Feinheiten werden verallgemeinert. Dies betrifft etwa die Abbildung der realen Landnutzungsverhältnisse wegen der dem Modell KLAM_21 zugrundeliegenden geringen Klassenzahl. Komplexere Standorte werden im Modell u. U. schlechter wiedergegeben als „einfache“ Standorte, wie z. B. größere Freiflächen. Abweichungen in den Modellinputdaten (z. B. die der digitalisierten Landnutzung) führen unweigerlich zu einer verminderten Genauigkeit im Output der Simulationen.

Zusatzanmerkungen:

Nachträglich, auf Anfragen der Stadt Jena zum asymmetrischen Kaltluftabflussverhalten im Gembdental bei Wenigenjena, stellte sich heraus, dass zumindest ein Teil der von der Stadt als Parkanlagen (Landnutzungs-kategorie 6) deklarierten Landnutzungsflächen, wie z. B. ein großes, wohl zu zwei Dritteln offenes Sportplatzgelände und ein Freibad nicht gänzlich mit dieser doch recht rauen Landnutzungs-kategorie hätte bedacht werden sollen, sondern zumindest in größeren Bereichen (5 - 6 Rasterpunkte des 50-Meter-Rasters) auch mit der Landnutzungs-kategorie 7 bzw. der glatteren Klasse ‚Freifläche‘. Wie es mit den Flächen anderer Parks im Verhältnis zu möglicherweise besser gewählten Freiflächenrasterpunkten im Saaletal steht, wurde an dieser Stelle nicht weiter untersucht.

Die Landnutzungs-kategorie 6 (Park) wurde in dieser Untersuchung nicht mehr stellenweise durch eine Landnutzungs-kategorie 7 (Freifläche) nachdigitalisiert bzw. ersetzt. Hierzu müssten die Freiflächen als auch die Stadtparkflächen gänzlich neu und aufwendig nachdigitalisiert werden. Der ‚Fehler‘ hält sich wahrscheinlich auch ‚nur‘ in engen Grenzen mit etwas zu niedrig simulierten Geschwindigkeiten (Kaltluftvolumenströmen) über den größeren, möglicherweise nicht aufgelösten Freiflächen (z. B. Sportplätze, größere offene Rasenflächen ohne größere Bäume) innerhalb der Stadtparkanlagen.

Im Falle des Gembdentales lässt sich nach nachträglichen kürzeren Testrechnungen mit leicht variierenden hier nicht aufgezeigten etwas rauerem Landnutzungsparametern der Gärten bzw. der ‚halb versiegelten Flächen‘ (Kategorie 4), jedoch ohne eine Veränderung (Nachdigitalisierung) der vorliegenden Parkflächen (Kategorie 6) allgemein aussagen, dass die maximale Strömung des Gembdentales (maximaler Kaltluftvolumenstrom) am Talausgang weiterhin rechts der Talachse ausweicht. Der maximale Kaltluftvolumenstrom über dem weniger rauen Block der Kleingartenanlagen im Nordwesten Wenigenjenas variiert hier gegenüber demjenigen des südlich davon und massiv auch über der Talachse gelegenen sehr rauen Blocks dichter und lockerer Bebauung sowie der Parkanlagen des Sportplatzgeländes und Bades im Schwankungsbereich von nur +/- 10 %. Die in diesem Endbericht getroffenen Aussagen haben in diesem Rahmen also auch über den Kleingartenanlagen im Großen und Ganzen Bestand.

Die maximalen Kaltluftvolumenströme würden sich am Beispiel des Talausgangs Gembdental wahrscheinlich jedoch geringfügig in Richtung Talachse verschieben, wenn mehr Freiflächen innerhalb der dortigen Parkanlagen berücksichtigt worden wären. Hierzu müsste man allerdings Park für Park im Hinblick auf mögliche größere ‚lohnende‘ Freiflächen untersuchen und diese Flächen dann von Landnutzungs-kategorie 6 (Park) auf 7

(Freifläche) umsetzen. Eine solche aufwendige Flächenkonvertierung fand für diesen Bericht jedoch nachträglich nicht mehr statt.

Grundsätzlich handelt es sich bei den mit diesem Bericht vorliegenden Simulationsergebnissen um eine Einzelfallstudie zu einer bestimmten Wetterlage. Es wird also lediglich ein Ausschnitt der realen Verhältnisse betrachtet und in den Simulationsergebnissen wiedergegeben.

Grenzen zwischen den einzelnen Intensitätsangaben der gezeigten Auszugskarten (insbesondere linien- und flächenhafte farbliche Darstellungen) sollten nicht als starre Ergebnisse interpretiert werden. Im Gegenteil, gemäß dem Charakter klimatologischer Kennwerte sind sie vielmehr als räumlich fließend zu verstehen. Ferner sollten einzelne kleinräumige Abweichungen hinsichtlich ihrer dargestellten Ausprägung (Intensität, Verlauf etc.) in einer sonst eher gleichförmig abgebildeten Umgebung nicht überbewertet werden. Auflösungsbedingt können mikroklimatische Effekte in komplex strukturierten Bereichen nicht ausreichend genau wiedergegeben werden. Es ist von einer verallgemeinernden Darstellung von Feinheiten auszugehen, weshalb einzelne Pixel und Pfeile nicht überbewertet werden sollten (vgl. DWD 2003).

Auf der anderen Seite ist zu konstatieren, dass die Modellaussagen umso sicherer sind, je mehr ein Gebiet durch einheitliche lokalklimatische Verhältnisse geprägt ist (z. B. enge Talsysteme, homogene Kaltluftabflussbereiche über ganze Hangzonen).

Des Weiteren ist zu beachten, dass der Modelloutput wohl quantitative Ergebnisse z. B. zu den Kaltluftvolumenströmen liefert, jedoch keine quantitativen Ergebnisse z. B. hinsichtlich der Temperaturen. Kaltluftquell- und -staugebiete können zwar bestimmt werden, allerdings kann keine Aussage dazu getroffen werden, um wie viel Grad kälter Kaltluftstaugebiete gegenüber ihrer Umgebung sind.

Anlage 2

**Stadtklimasimulationen mit dem Modell MUKLIMO_3
zur Veränderung sommerlicher Temperaturverhältnisse
durch Klimawandel und Bebauungsveränderungen
in Jena
- Ein Beitrag zum ExWoSt-Projekt JenKAS -**

Von
Meinolf Koßmann, Barbara Früh

Deutscher Wetterdienst
Abteilung
Klima- und Umweltberatung
Offenbach/Potsdam, 26.11.2012

Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt Computersimulationen, die mit dem 3-dimensionalen mikroskaligen urbanen Klimamodell MUKLIMO_3 des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Veränderung der sommerlichen Temperaturverhältnisse – verursacht durch den Klimawandel und Bebauungsänderungen – in Jena durchgeführt wurden.

Zur Berechnung räumlich hoch aufgelöster Klimatologien der vergangenen und zukünftigen sommerlichen Temperaturverhältnisse wurde die „Quadermethode“, ein dynamisch-statistisches Downscaling-Verfahren, verwendet (FRÜH et al., 2011a und 2011b). Hierbei werden hoch aufgelöste Simulationen sommerlicher Tagesgänge mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 mit langjährigen Zeitreihen aus Klimabeobachtungen und regionalen Klimaprojektionen kombiniert. Um die Bandbreite der erwarteten Klimaänderungen abschätzen zu können, wurden die Ergebnisse eines auf vier Regionalmodellen basierenden Ensembles von Klimaprojektionen als Eingangsdaten verwendet. Als Kennzahlen der sommerlichen Temperaturverhältnisse wurde die mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen ($T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$) und heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) für den Zeitraum 1971/2000 und deren Änderung bis 2021/2050 bestimmt. Neben den Berechnungen für den Istzustand der Stadt wurden auch die klimatischen Auswirkungen größerer Planungsvorhaben und eines hypothetischen Planzustandes der Stadt Jena abgeschätzt.

Die räumliche Variabilität der Klimaindizes (Sommertage und heiße Tage) im Stadtgebiet ist stark durch die Überlagerung der Auswirkungen der Bebauung (städtischer Wärmeineffekt) und der orographischen Einflüsse auf die Lufttemperatur geprägt. So zeigen die Ergebnisse des Istzustandes (1971/2000) für die Anzahl an Sommertagen ($N_{T_{\max} \geq 25}$), dass diese in dicht bebauten Tallagen, wie in der Innenstadt und in den Gewerbegebieten von Jena, am höchsten ist. Gleiches gilt für die berechnete Anzahl an heißen Tagen ($N_{T_{\max} \geq 30}$), wobei in den ländlichen Kuppenlagen die 30-°C-Temperaturschwelle bisher nur selten überschritten wird.

Die Auswertung für die verschiedenen Landnutzungen bzw. Bebauungsstrukturen im Innenstadtgebiet für den Istzustand (1971/2000) zeigt für Wald die geringste Anzahl an Sommertagen. Die höchste Anzahl an Sommertagen ergibt sich bei hoher Bebauungsdichte und hohem Versiegelungsgrad – zum einen bei Blockbebauung und Zeilenbebauung, zum anderen aber auch in Industrie- und Gewerbegebieten. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Landnutzungen finden sich auch bei der Auswertung der mittleren jährlichen Anzahl der heißen Tage, allerdings ergeben sich erwartungsgemäß niedrigere Absolutwerte als bei den Sommertagen. In den Waldgebieten sind heiße Tage besonders selten.

Zur Untersuchung der Auswirkungen von Planungsvorhaben auf das Stadtklima wurden vom Auftraggeber zukünftig geplante (Planzustand) und hypothetische (Planspiel) Landnutzungsänderungen für Flächen $\geq 2 \text{ ha}$ (neue Bebauungsgebiete, Änderungen von Bebauungsstrukturen, Schaffung von Grünflächen etc.) in digitaler Form zur Verfügung gestellt.

Aus den Simulationsergebnissen für den Planzustand und das Planspiel ergibt sich jeweils gegenüber dem Istzustand, dass Baumaßnahmen überwiegend zu einer Erhöhung und neue Grünflächen überwiegend zu einer Reduzierung der Anzahl der Sommertage bzw. der heißen Tage führen. Die stärkste Zunahme an Sommertagen und heißen Tagen ergibt sich nach den Berechnungen für die Areale mit geplanten Industrie- bzw. Gewerbegebieten im Süden der Stadt. Die Auswirkungen auf die klimatologischen

Kenntage beschränken sich hierbei im Wesentlichen auf die nähere Umgebung der Flächen mit einer geplanten Landnutzungsänderung.

Die Auswirkungen des regionalen Klimawandels wurden auf der Grundlage des moderaten IPCC Emissionsszenarios A1B berechnet. Auf dem 90%-Signifikanzniveau ergibt sich bis zum Jahr 2050 auf der Basis von vier Regionalmodellen für das Innenstadtgebiet von Jena eine Zunahme der mittleren jährlichen Anzahl von Sommertagen um 2 bis 29 Tage (Flächenmittelwerte). Gleichzeitig wird auch die mittlere jährliche Anzahl heißer Tage um 1 bis 10 Tage ansteigen. Damit wird es Mitte des Jahrhunderts im Sommerhalbjahr (April bis September) in Jena an etwa jedem zweiten Tag wärmer als 25 °C und an etwa jedem neunten Tag wärmer als 30 °C werden.

Die Zunahme der Sommertage und heißen Tage bis Mitte des Jahrhunderts unterscheidet sich nicht signifikant zwischen dicht und locker bebauten Stadtteilen oder den Grünflächen. Die Anzahl der Tage mit hohen Temperaturen wird also gleichermaßen stark zunehmen und zukünftig auch dort am höchsten sein, wo sie es heute schon ist. Das heißt, die Unterschiede zwischen Stadt und Umland werden sich nicht – wie befürchtet – verschärfen, aber die Wahrscheinlichkeit, dass ausgeprägte Hitzesommer – wie beispielsweise im Jahr 2003 – auftreten werden, nimmt bis Mitte des Jahrhunderts zu.

Die Berechnung der kombinierten Auswirkungen von Landnutzungsänderungen und regionalem Klimawandel bis Mitte des Jahrhunderts ergibt, dass in den Gebieten, in denen das Klimaänderungssignal durch Bebauungsverdichtung oder Versiegelung überlagert ist, die Änderung der Anzahl der Sommertage und heißen Tage am größten ist. Es zeigt sich, dass durch die zusätzliche Bebauungsverdichtung oder Versiegelung die maximale Änderung der Anzahl der Sommertage um 70 bis 160 % und die der heißen Tage um 30 bis 100 % zunehmen kann. Für die mittlere jährliche Anzahl der Sommertage sind bis Mitte dieses Jahrhunderts also die Klimaänderungssignale durch zusätzliche Bebauungsverdichtung oder Versiegelung lokal von vergleichbarer bis nahezu zweifacher Größenordnung wie die Änderungssignale durch den regionalen Klimawandel. Bei der mittleren jährlichen Anzahl heißer Tage ist hingegen das Klimaänderungssignal durch den regionalen Klimawandel tendenziell etwas größer als das Änderungssignal durch die Landnutzungsänderungen.

13 Stadtklimasimulationen mit dem Modell MUKLIMO_3

13.1 Stadtklimasimulationen mit MUKLIMO_3 für die Stadt Jena

Der vorliegende Beitrag zu Stadtklimasimulationen mit dem Modell MUKLIMO_3 stellt eine Ergänzung des DWD-Berichtes 243 „Klimauntersuchungen in Jena für die Anpassung an den Klimawandel und seine erwarteten Folgen“, der im Zuge der Unterstützung der Stadt Jena durch den Deutschen Wetterdienst bei der Realisierung ihres Modellvorhabens Jenaer Klima-Anpassungs-Strategie (JenKAS) erstellt wurde, dar (vgl. hierzu auch Anlage 1 zu o. g. Bericht). Auf Grund des erheblichen Umfangs der Beiträge zu den Messungen und Simulationen mit KLAM_21 und MUKLIMO_3 sowie zur Vermeidung von Redundanzen, werden in vorliegendem Beitrag lediglich Methoden, Vorgehen, Modellierungsgrundlagen sowie Ergebnisse präsentiert. Nähere Informationen

- zum Hintergrund des Modellvorhabens (JenKAS) und den in diesem Zusammenhang durch den DWD erbrachten Leistungen,
- zu den Charakteristika des betrachteten Untersuchungsgebietes,
- zur Betrachtung der Ergebnisse aus den stadtklimatologischen Messungen, KLAM_21- und MUKLIMO_3-Simulationen in der Gesamtschau sowie
- zu daraus abgeleiteten Hinweisen für die Stadtplanung

sind übergeordnet dem Ergebnisbericht „Klimauntersuchungen in Jena“ zu entnehmen.

Dieser Beitrag beschreibt die Durchführung und Auswertung von Computersimulationen, die mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 (3-dimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell) des DWD zur Abschätzung der aktuellen und zukünftigen sommerlichen Temperaturverhältnisse in der Stadt Jena realisiert wurden. Er baut auf einer für die Stadt Frankfurt am Main durchgeführten Pilotstudie auf und stimmt in einigen Teilen (insbesondere bei der Methodenbeschreibung) auch mit dem hierzu vorliegenden Bericht von FRÜH et al. (2011b) überein.

Das speziell für stadtklimatologische Fragestellungen entwickelte Modell wird bereits seit vielen Jahren zur Untersuchung von Wärmebelastungssituationen erfolgreich eingesetzt. Bei den Modellrechnungen wird besonderer Wert auf die detailgenaue Modellierung der unterschiedlichen Bebauungsstrukturen innerhalb des Stadtgebietes gelegt. Darüber hinaus können mit dem computergestützten Stadtklimamodell im Vorfeld die Auswirkungen bereits geplanter oder eventuell weiterer zukünftiger Eingriffe in das System Stadt gezielt untersucht werden, ohne diese in der Realität umsetzen zu müssen.

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

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

Der vorliegende Beitrag gliedert sich in den DWD-Bericht 243 „Klimauntersuchungen in Jena für die Anpassung an den Klimawandel und seine erwarteten Folgen“ ein und ist wie folgt strukturiert: Kapitel 13.2 gibt eine detaillierte Beschreibung des verwendeten Stadtklimamodells MUKLIMO_3, der Quadermethode und der dafür benötigten regionalen Klimaprojektionen wieder. Kapitel 13.3 enthält die Beschreibung der speziell für die Simulation der Stadt Jena eingesetzten Daten. In Kapitel 13.4 werden die Ergebnisse der Quadermethode für den Zeitraum 1971/2000 vorgestellt. Diese umfassen zum einen die erfolgreiche Evaluierung des Verfahrens und zum anderen die Analyse der unterschiedlichen Auswirkung verschiedener Gebäudestrukturen und anderer Landnutzungen auf die hier betrachteten sommerlichen Temperaturverhältnisse der Stadt Jena. Des Weiteren wird in Kapitel 13.4 die Auswirkung der Umsetzung der Planungsvorhaben auf ausgewählte Klimaindizes (mittlere jährliche Anzahl der Sommertage und heißen Tage) beschrieben. Informationen zum Klimaänderungssignal der Zukunft können Kapitel 13.5 entnommen werden. Dort wird sowohl die Änderung der Anzahl der Sommertage und heißen Tage auf Grund der Klimaänderung zur Mitte dieses Jahrhunderts diskutiert, als auch die durch die Überlagerung von Klima- und Landnutzungsänderung. Kapitel 13.6 enthält den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Klimamessungen (vgl. DWD-Bericht 243).

Informationen zu grundsätzlichem und weiterführendem Fachwissen sowie verwendeten Quellen sind dem Literaturverzeichnis im DWD-Bericht 243 zu entnehmen. In vorgenanntem Bericht sind zudem wichtige Fachbegriffe in einem Glossar erläutert.

13.2 Methodik

13.2.1 Allgemeine Erläuterungen

Die zukünftig zu erwartenden globalen Klimaänderungen werden in regelmäßigen Sachstandsberichten durch den Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change) zusammengefasst (IPCC 2007). Die Klimaänderungssignale für Zeiträume bis Ende dieses Jahrhunderts werden hierbei durch ein großes Ensemble von Projektionsrechnungen mit verschiedenen gekoppelten globalen Klimamodellen und verschiedenen Emissionsszenarien für klimarelevante Spurenstoffe abgeschätzt. Da diese Simulationsrechnungen eine horizontale Auflösung (Rechengitterweite) in der Größenordnung von 200 km und mehr aufweisen, müssen für städtische Fragestellungen die Ergebnisse auf eine deutlich höhere Auflösung herunterskaliert werden. Dies erfolgt aufgrund des großen Skalenunterschiedes in zwei Arbeitsschritten, wobei die Ergebnisse der Simulationen auf der gröberen Skala jeweils als Eingabedaten für die Simulationen der feineren Skala dienen (Abbildung 63). Im ersten Skalierungsschritt werden die globalen Klimaprojektionsrechnungen mittels dynamischer und statistischer Methoden auf eine regionale Skala mit einer typischen Auflösung von 10 bis 20 km heruntergerechnet. Auf diese Weise erhaltene regionale Klimaprojektionen stehen für Deutschland in verschiedenen Datenbanken allen Interessierten zur Nutzung bereit. Sie erlauben, die in Deutschland regional unterschiedlich ausfallende Klimaänderung abzuschätzen. Die in dieser Studie genutzten regionalen Klimaprojektionen werden in Kapitel 13.2.1.4 beschrieben.

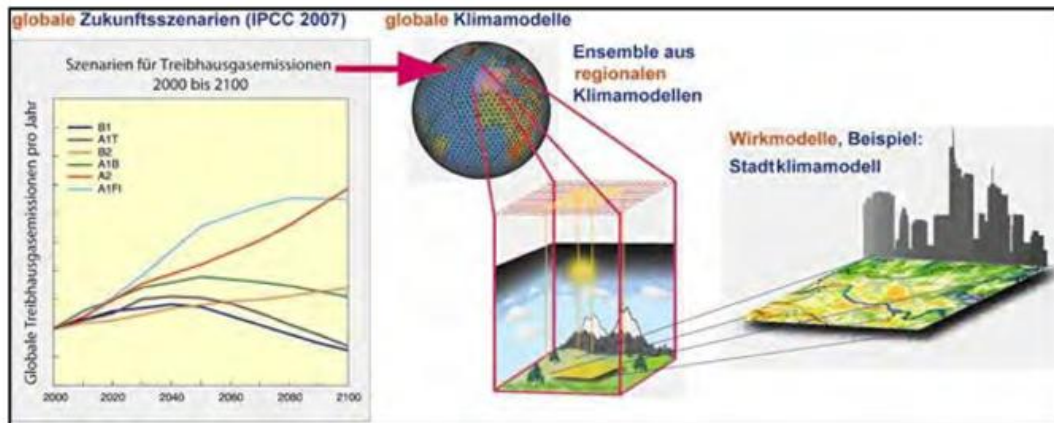


Abbildung 63: Schematische Darstellung der räumlichen Verfeinerung (Downscaling) der Klimasimulationsrechnungen von der globalen Skala zur städtischen Skala. Die auf IPCC Emissionsszenarien basierenden globalen Klimasimulationen dienen als Antrieb für ein Ensemble höher auflösender regionaler Klimamodelle. Die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle dienen wiederum als Eingabedaten des Stadtklimamodells MUKLIMO_3 zur Berechnung der Änderung des urbanen Klimas.

Für den zweiten Skalierungsschritt von der regionalen auf die (lokale) städtische Skala wird in dieser Untersuchung das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Für die Kopplung zwischen regionaler und städtischer Skala wurde eine als „Quadermethode“ bezeichnete spezielle Technik entwickelt und eingesetzt (FRÜH et al. 2011a). Die wichtigsten Aspekte der Quadermethode werden in Kapitel 13.2.1.3 beschrieben.

13.2.2 Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3

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

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

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

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

Zur Beschreibung der Struktur der städtischen Bebauung werden folgende statistische Parameter verwendet: mittlerer prozentualer Gebäudegrundflächenanteil γ_b , mittlere Gebäudehöhe h_b , mittlerer Wandflächenindex w_b und mittlerer prozentualer Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden v (siehe Tabelle 16). Die Definition der MUKLIMO_3-Landnutzungsklassen für Bebauung orientiert sich an der technischen Beschreibung von neun verschiedenen Bebauungsstrukturen des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (BMBau 1980) und wird für individuelle Städte gegebenenfalls aktualisiert. Da bei der verwendeten horizontalen Modellauflösung die Bebauungsstrukturen in einer Modellgitterzelle stark variieren können, erlaubt MUKLIMO_3 neben der primären (häufigsten) Bebauungsstruktur auch eine sekundäre (zweitwichtigste) Bebauungsstruktur zu simulieren (z. B. für die Klasse 67).

Tabelle 16: Statistische Parameter zur Beschreibung der städtischen Bebauung für die MUKLIMO_3 Landnutzungsklassen: mittlerer prozentualer Gebäudegrundflächenanteil γ_b , mittlere Gebäudehöhe h_b in m, mittlerer Wandflächenindex w_b und mittlerer prozentualer Versiegelung der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden v .

Klasse	Beschreibung	γ_b	h_b	w_b	v
1	Siedlung (dicht)	0,30	15	2,70	0,80
12	Dorfkern	0,50	9	2,23	0,80
14	verdichtete Bebauung, offene Bauweise	0,30	16	3,68	0,80
16	verdichtete Bebauung, geschlossene Bauweise	0,32	19	3,08	0,80
17	City (ab Mitte 19. Jh.)	0,55	19	2,14	0,90
19	Industrie und Gewerbe	0,52	12	0,90	0,95
29	Landwirtschaftsbetriebe	0,30	12	0,90	0,95
61	Einzelhäuser (niedrig)	0,20	7	2,88	0,30
62	Einzelhäuser (hoch)	0,20	11	2,88	0,30
67	Zeilenbebauung mit Hochhäusern	0,12 0,02	40 54	4,49 10,53	0,55

Der mittlere Gebäudegrundflächenanteil γ_b wird, zur Berücksichtigung von Straßen und Plätzen, als die um 10 % verminderte Grundflächenzahl bestimmt (BMBau 1980). Die mittlere Gebäudehöhe h_b wird aus der für die Bebauungsstruktur typischen Anzahl der Gebäudestockwerke abgeschätzt (5 m Höhe für das erste Stockwerk plus 3,5 m Höhe für jedes weitere Stockwerk). Der mittlere Wandflächenindex w_b entspricht dem Verhältnis der Gebäudeaußenwandfläche (ohne Dachfläche) zur Gebäudegrundfläche. Die aerodynamische Rauiglänge z_0 für die städtischen Landnutzungsklassen (Tabelle 16) gilt für die nicht bebauten Flächenanteile einer Rechengitterzelle und beträgt einheitlich 0,20 m. Die Reibungseffekte der Gebäude (Wände, Dächer) werden extra berechnet. Die nicht bebauten und nicht versiegelten Flächenanteile der städtischen Landnutzungsklassen sind mit einer (bodennahen) baumlosen Vegetationsschicht bedeckt (FRÜH et al. 2011a).

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

Die langwellige (thermische) und kurzwellige (solare) Strahlung werden oberhalb der Bebauung separat berechnet. Die Berechnung der direkten und der diffusen kurzwelligen Strahlung erfolgt nach einem empirischen Ansatz (VDI 1994). Für die langwellige Strahlungsbilanz werden Parametrisierungen von MÖLLER (1954) und ZDUNKOWSKI et al. (1975) mit einem zusätzlichen Ansatz zur Berücksichtigung des Wolkenbedeckungsgrades verwendet. Für Gitterzellen mit Bebauung wird in Abhängigkeit von der Gebäudedichte die kurzwellige Strahlung von Wänden und Dächern reflektiert und absorbiert (SIEVERS und FRÜH 2012). Zusätzlich wird die Emission und Absorption der langwelligen Strahlung durch die Gebäude berechnet.

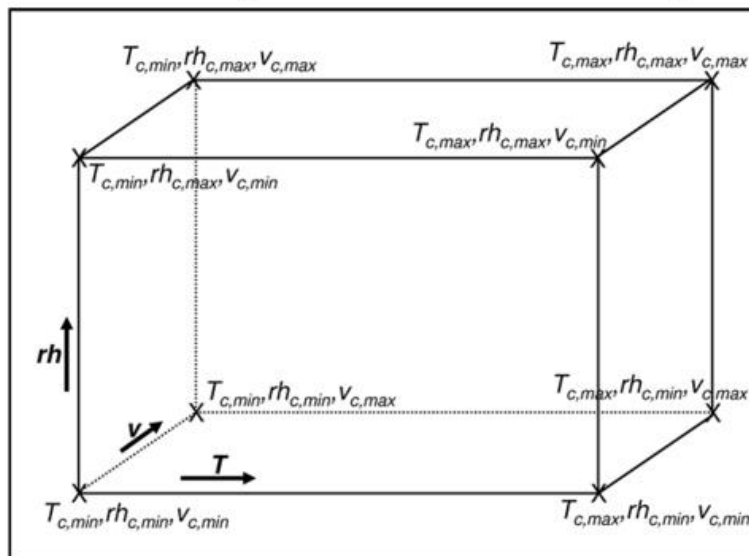
Das Modellgebiet für MUKLIMO_3 sollte horizontal mindestens die doppelte Ausdehnung der jeweils untersuchten Stadt haben, um die Simulation von städtischen Wärmeinselzirkulationen (sog. Flurwinde) adäquat zu ermöglichen. Um die Anzahl der benötigten Rechengitterzellen zu minimieren, kann das Modellgebiet auch gegen Nord gedreht sein. Die horizontale Rechengitterauflösung kann konstant oder variabel gewählt werden. Vertikal sollte die Auflösung in Bodennähe möglichst hoch gewählt werden, kann aber zur Reduktion der Anzahl der Rechengitterzellen mit zunehmender Höhe schrittweise reduziert werden. Aus numerischen Gründen kann das Modellgebiet noch von einem aus mehreren Gitterzellen bestehenden Streifen umsäumt werden. In diesem Streifen erfolgt am Einströmrand der Übergang zwischen den vorgegebenen regionalen Klimabedingungen und den lokalen Klimabedingungen im Untersuchungsgebiet. Die in diesem Übergangsbereich berechneten Werte werden deshalb nicht dargestellt oder ausgewertet. Neben den Daten der Bebauungsstrukturen bzw. Landnutzungsklassen müssen zusätzlich die Daten der Geländehöhe für das gesamte Modellgitter zur Verfügung stehen. Die Details des für diese Studie gewählten Modellgitters und der verwendeten Daten sind in Kapitel 13.3.1 beschrieben.

13.2.3 Quadermethode

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

Die Quadermethode basiert auf der Annahme, dass das lokale Auftreten wärmebelastender Wetterlagen im Wesentlichen von den regional repräsentativen Werten dreier Klimaparameter abhängt. Die Minima und Maxima dieser drei Klimaparameter beschreiben einen dreidimensionalen Ereignisraum, der als Quader visualisiert werden kann (Abbildung 64).

Für Wärmebelastungssituationen in einer Stadt wird angenommen, dass diese besonders



stark von den drei Klimaparametern Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit in Bodennähe abhängen und nur auftreten, wenn die Werte dieser Parameter außerhalb des städtisch beeinflussten Bereiches (d. h. regional) in einem gewissen Wertebereich liegen. Da Klimabeobachtungen über sehr lange Zeiträume in der Regel zwar die Tagesmaximum- und Tagesminimumtemperatur umfassen, nicht aber die Tagesextrema für die relative Feuchte und

Abbildung 64: Skizze des Quaders zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der multiplen linearen Interpolation. Die Quadereckpunkte werden durch Tagesmittelwerte der Lufttemperatur T_c , der relativen Luftfeuchtigkeit rh_c und der Windgeschwindigkeit v_c bestimmt und sind für Jena in Tabelle 16 aufgelistet.

für die Windgeschwindigkeit, wird im Folgenden der Wertebereich ihrer Tagesmittelwerte betrachtet. Die für Jena gewählten Tagesmittelwerte der Quadereckpunkte werden in Kapitel 13.3.2 vorgestellt.

Da die Wärmebelastung durch Luv- und Lee-Effekte auch von der Anströmrichtung abhängig ist, müssen die bei relevanten Wetterlagen dominierenden Hauptwindrichtungen

ermittelt werden (siehe Kapitel 13.3.3). Es sind dann für jede dieser Hauptwindrichtungen acht als Eckpunktsimulationen bezeichnete Berechnungen von räumlich hoch aufgelösten Tagesgängen mit dem Modell MUKLIMO_3 durchzuführen, die den in Abbildung 64 skizzierten Quader aufspannen.

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

Der für klimatische Auswertungen notwendige Rechenaufwand verringert sich durch die Quadermethode enorm. Für einen 30-jährigen Zeitraum reduziert sich beispielsweise bei zwei Hauptwindrichtungen die Anzahl der mit MUKLIMO_3 zu simulierenden Tage von fast 11.000 (30×365 Tage) auf 16 (2×8 Tage). Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Verfahrens ist die lineare Skalierbarkeit der untersuchten Größen. Die hierzu notwendige technische Evaluierung der Quadermethode kann in FRÜH et al. (2011a) nachgelesen werden. Sie zeigt, dass insbesondere die für Wärmebelastung bedeutsamen Tagesmaximumtemperaturen durch die Annahme der Linearität sehr gut erfasst werden.

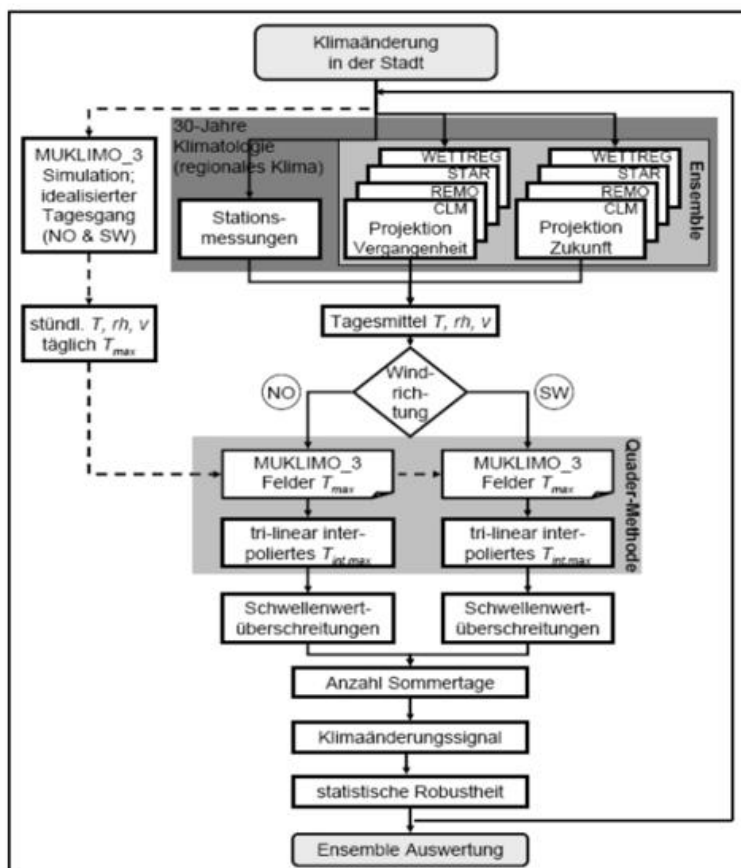


Abbildung 65: Skizze der Arbeitsschritte zur Berechnung der räumlich hoch aufgelösten Änderung der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen in einer Stadt, beispielhaft für die zwei Hauptwindrichtungen NO und SW. Das Verfahren basiert auf der hoch aufgelösten Simulation von einzelnen Tagesgängen mit MUKLIMO_3 und auf 30-jährigen regionalen Klimazeitreihen, die als Tageswerte entweder aus Beobachtungen oder regionalen Klimaprojektionen vorliegen. Weitere Details sind im Text erläutert.

Abbildung 65 zeigt einen Überblick über das gesamte Verfahren, beginnend mit den MUKLIMO_3-Simulationen des idealisierten Tagesganges und den Zeitreihen des regionalen Hintergrundklimas über die Quadermethode bis zur statistischen Auswertung der Ergebnisse. Die für das Verfahren genutzten Klimabeobachtungen und das Ensemble regionaler Klimaprojektionen werden im folgenden Kapitel vorgestellt. Die Auswertung von Schwellenwertüberschreitungen (z. B. für Sommertage) und die Bestimmung der statistischen Robustheit der Ergebnisse werden in den anschließenden Kapiteln diskutiert.

13.2.4 Klimazeitreihen für die Quadermethode

Um die Quadermethode bezüglich ihrer Eignung für die Untersuchung des zukünftigen städtischen Klimawandels beurteilen zu können, werden langjährige Messreihen der wichtigsten Klimaparameter für einen zurückliegenden Zeitraum (z. B. 1971/2000) als Tageswerte benötigt. Zum einen werden Zeitreihen verwendet, die repräsentativ für die Region um die Stadt sind (ähnliche topografische Lage), aber möglichst frei von städtischen Einflüssen sind. Diese Zeitreihen dienen als Eingangsdaten für die in Kap. 2.3 beschriebene trilineare Interpolation. Zum anderen ist es notwendig, langjährige gemessene Klimazeitreihen innerhalb des MUKLIMO_3-Modellgebietes verfügbar zu haben, um die räumlich detaillierten Ergebnisse der Quadermethode (z. B. mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen) punktuell evaluieren zu können.

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

Eine der beiden numerischen regionalen Klimaprojektionen wurde mit dem hydrostatischen Modell REMO (JACOB, 2001) erzeugt und vom Umweltbundesamt (JACOB et al. 2008) (Gitterweite: $0,088^\circ \approx 10$ km) in Auftrag gegeben. Für die zweite wurden die von HOLLWEG et al. (2008) mit dem nicht-hydrostatischen Klimamodell CLM (BÖHM et al. 2006) durchgeführten Konsortialsimulationen ausgewertet (Gitterweite: $0,165^\circ \approx 18$ km). Beide Regionalmodelle sind aus Wettervorhersagemodellen abgeleitet und für Klimaanwendungen angepasst. Des Weiteren wurden Projektionen der beiden auf Klimastationsdaten basierenden statistischen Verfahren WETTREG (ENKE et al., 2005) und STAR (ORLOWSKY et al., 2008) verwendet. Alle in dieser Studie verwendeten regionalen Klimaprojektionen sind mit Daten des globalen Klimamodells ECHAM5 (ROECKNER et al., 2006a und 2006b; HAGEMANN et al. 2006) angetrieben (siehe Abbildung 63). Simulationen für Zeiträume im 20. Jahrhundert werden mit „C20“ (historischer Lauf) bezeichnet. Simulationen für zukünftige Zeiträume werden nach den verwendeten SRES (Special Report on Emission Scenarios) Emissionsszenarien für klimarelevante Spurenstoffe bezeichnet und liegen bei den regionalen Projektionen dieser Studie bis Mitte oder Ende des 21. Jahrhunderts vor. Hier dargestellte Auswertungen nutzen die Zeiträume 1971/2000 (historischer Vergleichszeitraum C20) und 2021/2050 (aus SRES Szenario A1B, NAKICENOVIC und SWART 2000). Ein detaillierter Überblick über die Modelle und Simulationen ist FRÜH et al. (2011a) zu entnehmen.

Abbildung 66 zeigt die Änderung der 30-jährigen Mitteltemperatur in Deutschland im Vergleich zur Referenzperiode 1971/2000. Die rötlichen Linien beziehen sich auf drei ECHAM5 Realisierungen (r1, r2, r3), welche sich durch leicht unterschiedliche Klimabedingungen zu Beginn der Industrialisierung unterscheiden. Als Antrieb für die Regionalisierungsverfahren wurde ECHAM5-r1 verwendet, d. h. im Vergleich zu den beiden anderen Realisierungen r2 und r3 wird in den ersten Jahrzehnten des 21. Jahrhunderts eher eine geringe Temperaturzunahme und in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts eine zwischen r2 und r3 liegende Temperaturzunahme projiziert. Die magentafarbene und die blaue Linie zeigen die projizierte Temperaturzunahme der beiden regionalen Klimamodelle REMO und CLM, die nur wenige zehntel Grad voneinander abweichen. Die grüne Linie zeigt die mit WETTREG berechnete Temperaturzunahme als Mittel aller 20 verfügbaren Realisierungen auf der Basis von ECHAM5-r1. Im Vergleich zu allen anderen Verfahren ist die 30-jährige Mitteltemperatur in Deutschland aus WETTREG deutlich niedriger. Die violette Linie zeigt eine vom PIK (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung) ausgewählte Realisierung der STAR-Ergebnisse, welche im

Vergleich zu den anderen eine deutlich höhere Temperaturzunahme projiziert. Sie ist im Jahr 2040 nahezu identisch mit der wärmsten ECHAM5 Realisierung r2.

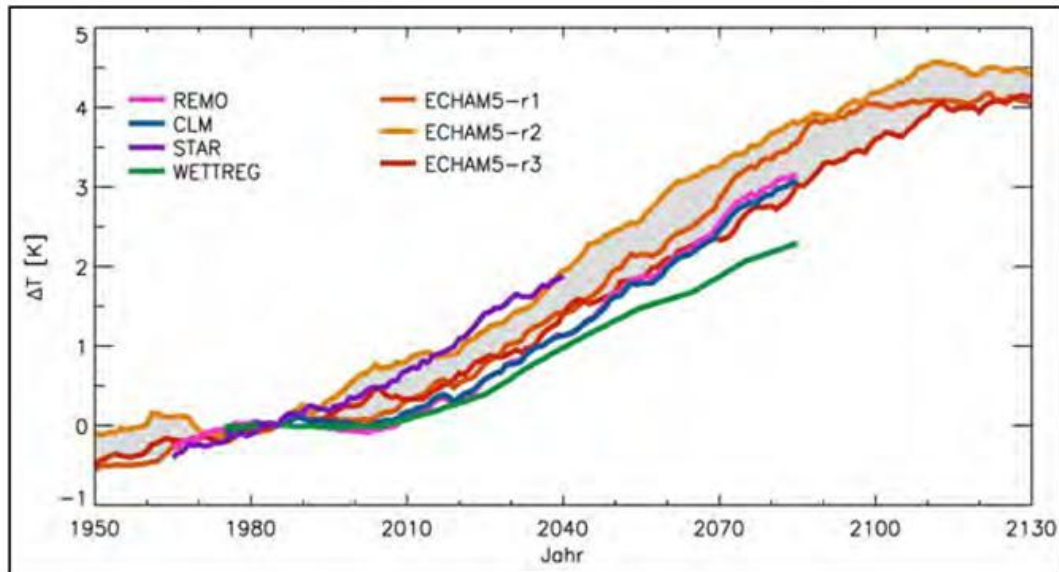


Abbildung 66: Änderung der 30-jährigen Mitteltemperatur in Deutschland aus den Klimaprojektionsrechnungen für Vergangenheit und Zukunft (C20 und A1B, gleitendes Mittel) im Vergleich zur Referenzperiode 1971/2000.

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

13.3 Modellkonfiguration für Jena

13.3.1 Das MUKLIMO_3-Modellgebiet

Für die vorliegende Studie wurden die Stadtklimasimulationen mit der MUKLIMO_3-Modellversion vom 09.01.2012 durchgeführt. Alle Modellsimulationen erfolgten für das Datum 16. Juli, einem Tag mit mittlerem sommerlichen Sonnenstand.

Das 24,95 km x 23,75 km große Simulationsgebiet umfasst folgende Gauß-Krüger Koordinaten: Rechtswert 44 61 450 bis 44 86 400, Hochwert 56 31 250 bis 56 55 000. Innerhalb dieses Gebietes wurde in einem 13,95 km x 16,15 km großen inneren Modellgebiet (Gauß-Krüger Koordinaten: Rechtswert 44 64 100 bis 44 78 050, Hochwert 56 35 100 bis 56 51 250) mit der konstanten Auflösung von 50 m simuliert. Das politische Stadtgebiet Jenas liegt vollständig in diesem inneren Modellgebiet und ist in den Kartendarstellungen durch ein strichliertes Polygon gekennzeichnet. Außerhalb des inneren Modellgebietes schließen sich in alle Richtungen je eine Gitterzelle von 60 m und 90 m an. Daran anschließend wurde im äußeren Modellgebiet mit einer konstanten Gitterweite von 100 m simuliert. Die vertikale Auflösung des Modellrechengitters reicht von 10 m in den untersten 100 m bis zu 50 m zwischen 200 m und 750 m Höhe bei

insgesamt 25 Schichten. Das Modellgebiet ist nicht gegen Nord gedreht. Die für die Modellsimulationen benötigten Geländehöhendaten und Landnutzungsdaten stellte die Stadt Jena über die Forschungsassistenz (Firma ThINK, Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz) zur Verfügung.

Da aufgrund numerischer Randeffekte die MUKLIMO_3-Simulationsergebnisse nur im inneren Modellgebiet interpretierbar sind, werden Ergebnisse (Abbildungen und Rasterdaten) lediglich für das innere Modellgebiet an den Auftraggeber abgegeben. Ein signifikanter Anteil des politischen Stadtgebietes Jenas ist durch Kuppenlagen und außerstädtischen Wald geprägt. Um für die Bewohner Jenas relevante Klimaauswertungen mit Signifikanzprüfung zu erhalten, wurde daher ein „Innenstadtgebiet“ definiert, das in den Kartendarstellungen durch ein strichpunktiertes Polygon gekennzeichnet ist.

Abbildung 67 zeigt die Geländehöhe für das gesamte MUKLIMO_3-Modellgebiet und für das innere Modellgebiet. Die Saale fließt von Süd nach Nord. Die Geländeerhebungen um die Stadt erreichen 400 m ü. NN und steigen nach Süden in Richtung des Thüringer Waldes generell an. Die niedrigsten Geländehöhen in der Nähe der Saale liegen unter 150 m ü. NN, wobei die Talsohle in Tallängsrichtung nur eine geringe Neigung aufweist. Innerhalb des Stadtgebietes münden von Westen und Osten her einige, teils recht steile Seitentäler in das Saaletal.

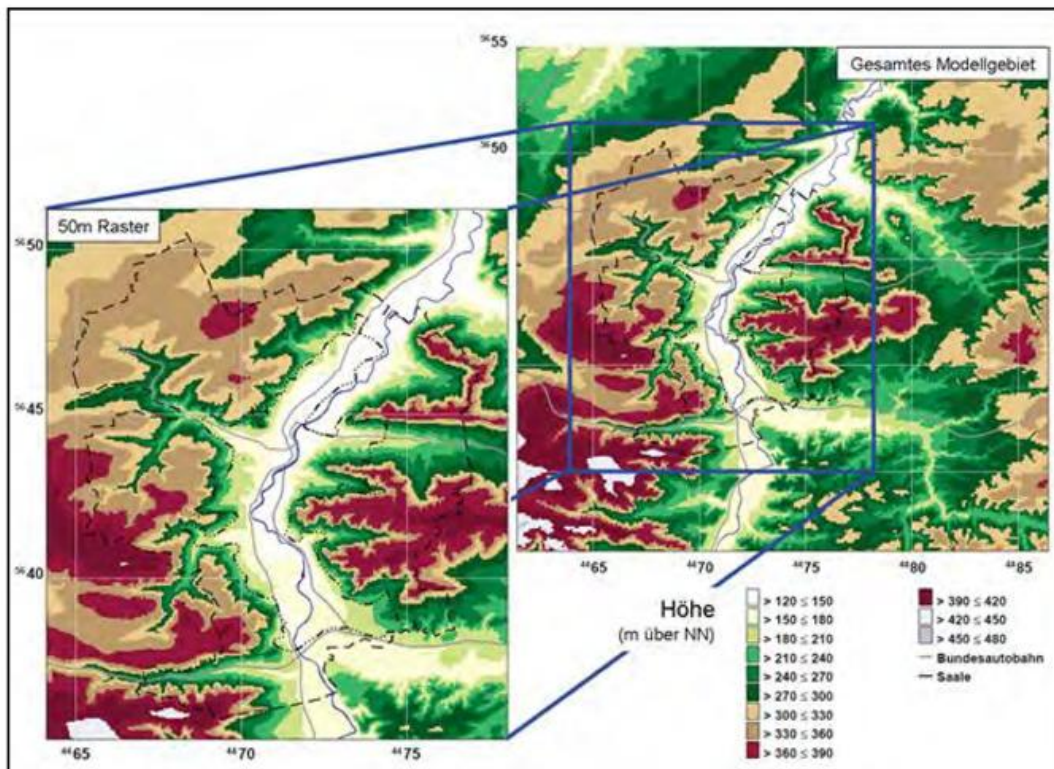


Abbildung 67: Geländehöhe im MUKLIMO_3-Modellgebiet. Rechts: Gesamtes Modellgebiet. Links: Inneres Modellgebiet. Das politische Stadtgebiet von Jena ist durch eine strichlierte Linie gekennzeichnet. Die strichpunktierte Linie markiert das für die Signifikanzprüfung der Modellergebnisse festgelegte Innenstadtgebiet von Jena.

Abbildung 68 zeigt die für MUKLIMO_3 klassifizierten Landnutzungen in Jena. Die physikalischen Parameter der städtischen Landnutzungsklassen (Bebauungsstrukturen) sind in Tabelle 16 beschrieben. Verdichtete Bebauung in geschlossener und offener Bauweise (Landnutzungsklassen 14 und 16) ist typisch für das Stadtzentrum. Jena weist im Stadtgebiet aber auch einen hohen Flächenanteil an Industrie- und Gewerbegebieten (Klasse 19) auf. Wohngebiete sind durch Einzelhäuser unterschiedlicher Höhe geprägt (Klassen 61, 62 und 67). Im Süden der Stadt fallen insbesondere die recht hohen Plattenbauten in den Stadtteilen Winzerla und Lobeda auf. Die Jena umgebenden Randhöhen weisen größere Wald- und Freiflächen sowie dörfliche Siedlungen auf. Die Landnutzungen basieren auf CIR/OBK Luftbilddaten. Für das Stadtgebiet und eine Zone von 5 km um das Stadtgebiet erfolgte eine manuelle Aktualisierung/Validierung der Daten durch die Stadt Jena. Abbildung 69 zeigt einige typische Beispiele für die verschiedenen Landnutzungsklassen in Jena.

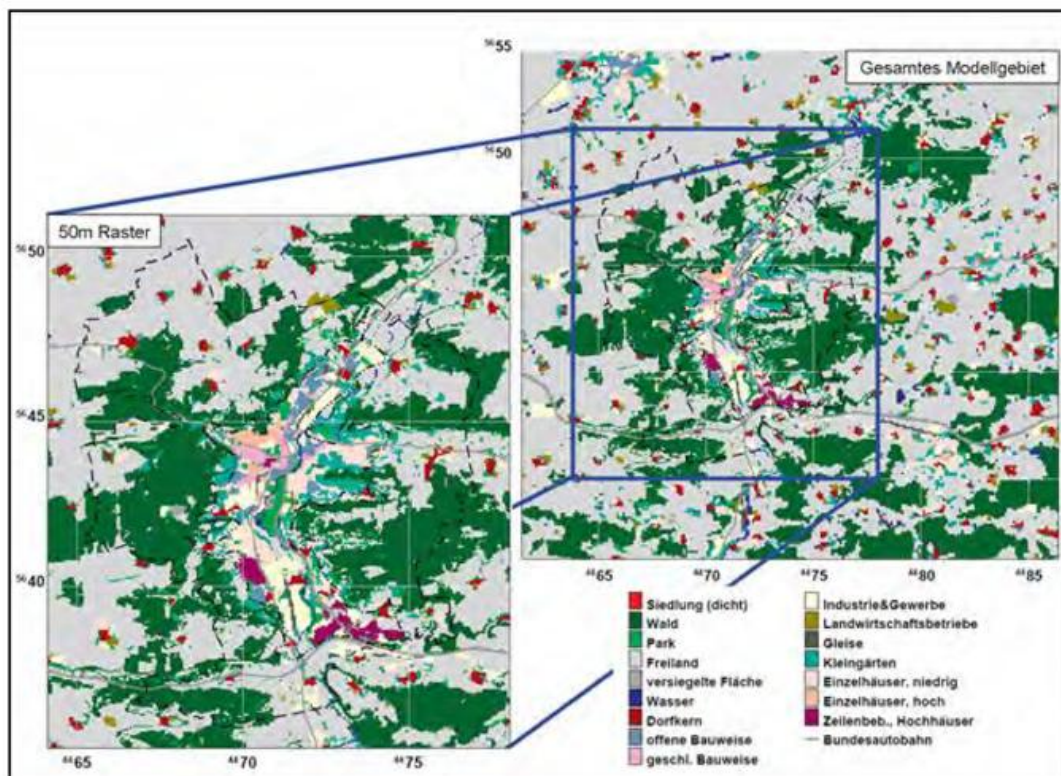
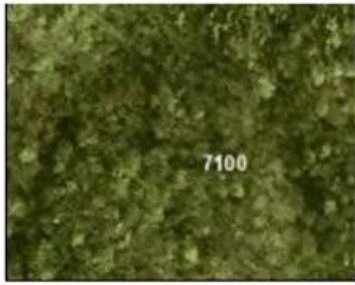


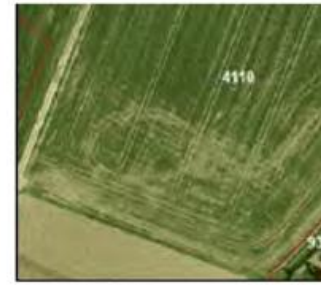
Abbildung 68: Landnutzung im MUKLIMO_3-Modellgebiet. Rechts: Gesamtes Modellgebiet. Links: Inneres Modellgebiet. Das politische Stadtgebiet von Jena ist durch eine strichlierte Linie gekennzeichnet. Die strichpunktierte Linie markiert das für die Signifikanzprüfung der Modellergebnisse festgelegte Innenstadtgebiet von Jena.



3 Wald



4 Park



7 Freifläche



9 Gewässer



12 Dorf



14 dichte Bebauung
(offen)



16 dichte Bebauung
(geschlossen)



19 Industrie und Gewerbe



29 Landwirtschaftsbetriebe



61 Einzelhäuser (niedrig)



62 Einzelhäuser (hoch)



67 Zeilenbebauung mit
Hochhäusern

Abbildung 69: Beispiele zu ausgewählten Landnutzungsklassen in Jena (CIR/OBK Luftbilddaten der Stadt Jena).

13.3.2 Der Quader

Die zuvor beschriebene Quadermethode (Kapitel 13.2.1.3) wird hier auf das Stadtgebiet von Jena zur Analyse sommerlicher Hitzeperioden angewendet. Die aus der Quadermethode resultierenden, interpolierten Temperaturfelder werden anschließend hinsichtlich der Überschreitung ausgewählter Schwellenwerte für 30-jährige Zeiträume ausgezählt (klimatologische Kenntage). Die untersuchten Schwellenwerte sind wie folgt definiert:

- Sommertage mit einer Tageshöchsttemperatur $\geq 25 \text{ °C}$ ($N_{T_{\max} \geq 25}$),
- Heiße Tage mit einer Tageshöchsttemperatur $\geq 30 \text{ °C}$ ($N_{T_{\max} \geq 30}$).

Die Sommertage und heißen Tage geben Auskunft über die Wärmebelastung am Nachmittag, der Zeit in der in der Regel das Tagesmaximum der Lufttemperatur erreicht wird.

Tabelle 17: Vorgegebene Tagesmittelwerte bodennaher Klimaparameter für die in Abbildung 64 illustrierten acht MUKLIMO_3-Eckpunktsimulationen der Quadermethode.

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

Der für das Regionalklima um Jena festgelegte Quader für die MUKLIMO_3-Simulationen erstreckt sich zwischen den Eckpunkten (Index c) über den Bereich der Tagesmitteltemperatur zwischen $T_{c,min} = 15 \text{ °C}$ und $T_{c,max} = 25 \text{ °C}$. Für das städtische Umland von Jena deckt dieser Bereich der mittleren Tagestemperatur (T_i) alle Tage mit potenzieller sommerlicher Hitze ab. Für Tagesmitteltemperaturen kleiner $T_{c,min}$, z. B. in den Wintermonaten, ist die Wahrscheinlichkeit einer Schwellenwertüberschreitung im urbanen Temperaturfeld sehr gering, so dass der extrapolationsbedingte Fehler nur für eine sehr geringe Anzahl an Tagen auftritt und daher vernachlässigbar ist (Liegt der Zielwert der Interpolation außerhalb der Stützstellen der Interpolation, wird von Extrapolation gesprochen. Diese ist generell mit einem größeren Fehler behaftet als eine Interpolation.). An Tagen, an denen die Tagesmitteltemperatur T_i größer ist als $T_{c,max}$, ist die Wahrscheinlichkeit einer Schwellenwertüberschreitung innerhalb des Modellgebietes nahezu überall Eins (entspricht 100 %), so dass auch in diesem Fall die Unsicherheit auf Grund der Extrapolation vernachlässigbar ist. Für das Tagesmittel der relativen Feuchte erstreckt sich der Quader zwischen $rh_{c,min} = 42 \text{ %}$ und $rh_{c,max} = 80 \text{ %}$ und deckt damit nahezu den gesamten Bereich mittlerer Tageswerte im Sommer in Jena ab. Die Quaderdimension für das Tagesmittel der Windgeschwindigkeit erstreckt sich über den

Bereich zwischen $v_{c,\min} = 0,7$ m/s und $v_{c,\max} = 3,0$ m/s. Für alle Tage mit Windgeschwindigkeiten unterhalb 0,7 m/s bzw. oberhalb 3,0 m/s werden $v_{c,\min}$ bzw. $v_{c,\max}$ als Tagesmittel angenommen. Die untere Grenze der Windgeschwindigkeit wurde gewählt, da eine weitere Verminderung keine signifikanten Unterschiede im Temperaturfeld zur Folge hat. Eine Windgeschwindigkeit von 3 m/s oder mehr unterdrückt dagegen die Entwicklung eines lokalen Strömungssystems und damit die Ausbildung eines charakteristischen urbanen Temperaturfeldes. Für den Fall großräumiger vorherrschender moderater bis starker Winde ist daher ein nahezu homogenes Temperaturfeld zu erwarten. Tabelle 17 fasst die verwendeten Tagesmittelwerte an den acht Quadereckpunkten zusammen.

13.3.3 Verwendete Zeitreihen

Die 30-jährigen Zeitreihen, die die für Jena an der Saale regional repräsentativen Umgebungsbedingungen widerspiegeln und als Eingabedaten der Quadermethode dienen, stammen sowohl aus Beobachtungen als auch aus Klimaprojektionen. Die Zeitreihe 1971/2000 der DWD-Messstation in Artern wird zur Evaluierung der klimatologischen Kenntage verwendet. Zur Abschätzung der Klimaänderung werden Zeitreihen regionaler Klimamodelle und statistischer Regionalisierungsverfahren verwendet (Kapitel 13.2.1.4).

Aus den Projektionen der numerischen, regionalen Klimamodelle REMO und CLM werden Zeitreihen von vier Gitterzellen in der Nähe von Jena extrahiert (13.2.1.4). Dann wird aus dem Tagesmittelwert der 2-m-Lufttemperatur (T_i) und dem 2-m-Taupunkt die relative Luftfeuchte (rh_i) berechnet. Aus den Horizontalkomponenten des 10-m-Windes wird sowohl die Windgeschwindigkeit (v_i) als auch die Windrichtung abgeleitet. Anschließend werden die Zeitreihen von vier Gitterzellen räumlich gemittelt, um als Eingabe für den Quader zu dienen. Die vier ausgewählten Gitterzellen liegen nordwestlich der Stadt (REMO: $51,3^\circ$ N – $51,5^\circ$ N/ $11,6^\circ$ O – $11,8^\circ$ O; CLM: $51,1^\circ$ N – $51,5^\circ$ N/ $11,5^\circ$ O – $11,9^\circ$ O) und wurden als Eingabe für den Quader gewählt, weil sie in der Nähe der Stadt liegen, überwiegend ländlich geprägt sind und die Geländehöhen dieser Gitterzellen gut mit denen im Innenstadtgebiet der Stadt Jena übereinstimmen (REMO: 134 m bis 182 m NN; CLM: 138 m bis 203 m NN).

Aus den beiden statistischen Regionalisierungsverfahren WETTREG und STAR wurden die Zeitreihen an den Stationen Artern (164 m NN), Gera (311 m NN) und Jena/Sternwarte (155 m NN) ausgewählt. Beide Verfahren liefern jeweils die Tagesmittelwerte für T_i , rh_i und v_i die im Mittel über die drei Stationen verwendet werden.

Zur Berücksichtigung der Windrichtungsabhängigkeit des Temperaturfeldes wurde pro statistisch relevanter Windrichtung jeweils ein Quader aufgespannt. Die relevanten Windrichtungen in der Region und an der Messstation Artern für den Zeitraum 1971/2000 sind Nordost (NO) und Südwest (SW) (Abbildung 70). Die acht MUKLIMO_3-Rechnungen für jeden Eckpunkt eines Quaders wurden für beide Windrichtungen (NO und SW) durchgeführt. Dadurch ergeben sich ein NO- und ein SW-Quader. Für alle Tage mit einer mittleren Windrichtung zwischen 315° und 135° wird der NO-Quader, für alle anderen Tage der SW-Quader zur Interpolation verwendet.

Da weder WETTREG noch STAR Informationen über die Windrichtung liefern, wird hierfür eine zufällige Zeitreihe generiert, die im Mittel der beobachteten Windrichtungsverteilung in Artern entspricht. Diese Abschätzung basiert auf der Annahme, dass die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung für WETTREG und STAR der beobachteten Windrichtungsverteilung entspricht und während des gesamten Projektionszeitraumes konstant bleibt. Für nähere Informationen zu diesem Verfahren sei auf FRÜH et al. (2011a) verwiesen.

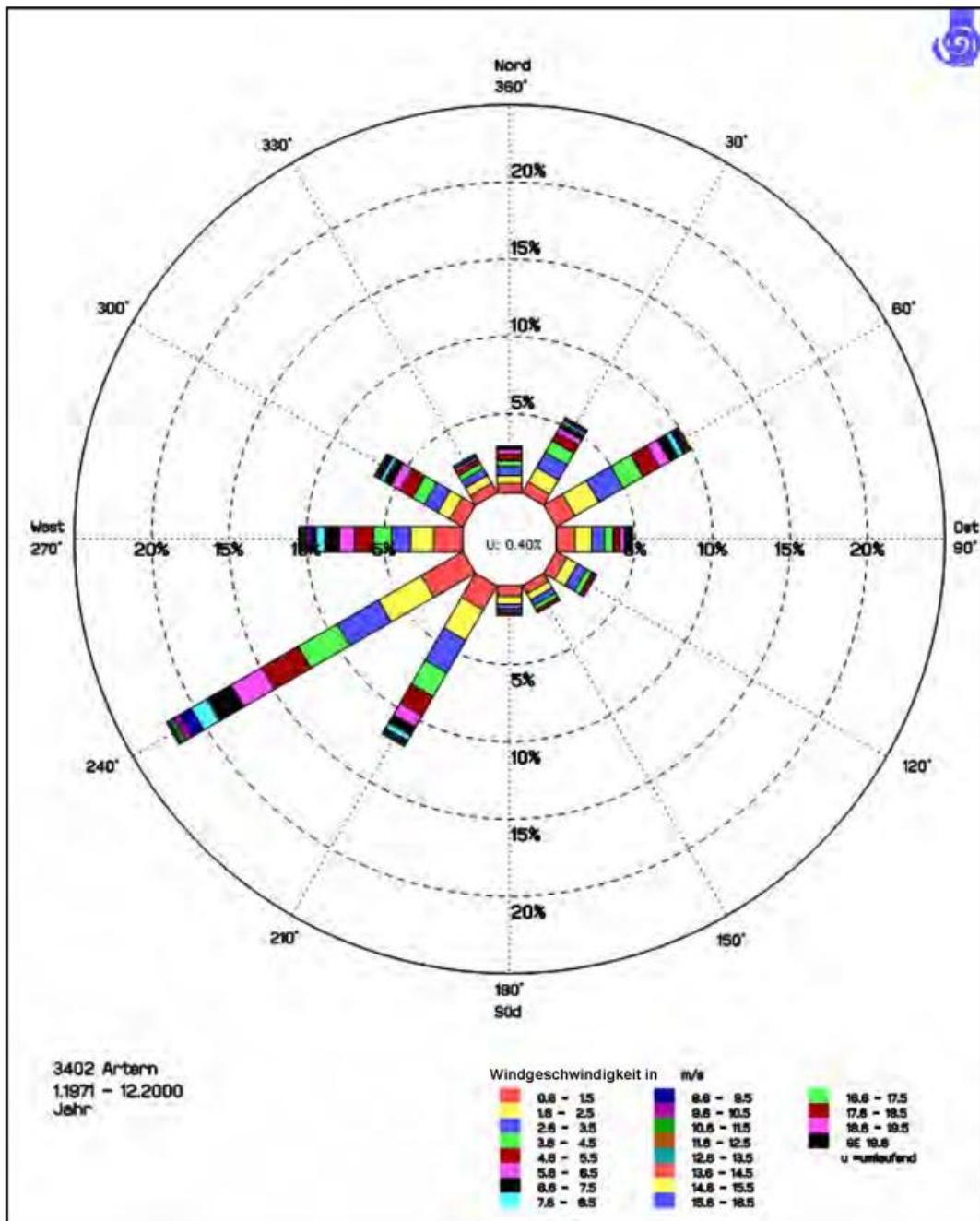


Abbildung 70: Relative Häufigkeit der Windrichtung und Windgeschwindigkeit, Artern 1971/2000 (Basis: Stundenwerte)

13.3.4 Modellsimulation für einen Tag

Nachfolgend wird beispielhaft für den Fall einer nordöstlichen Anströmung mit der Initialisierung einer der Quadereckpunkte (Simulation 110 nach Tabelle 17: $T_{c,max} = 25 \text{ °C}$, $rh_{c,max} = 80 \text{ %}$ und $v_{c,min} = 0,7 \text{ m/s}$) der mit MUKLIMO_3 simulierte Tagesgang für das Modellgebiet Jena vorgestellt.

Die 48-stündigen eindimensionalen Simulationen von MUKLIMO_3 für das Regionalklima um Jena werden am 15. Juli um 09 Uhr MESZ gestartet. Die 24-stündigen dreidimensionalen Simulationen für das Lokalklima in Jena beginnen am 16. Juli um 09 Uhr MESZ, wobei die Ergebnisse der eindimensionalen Simulationen als Anfangs- und Randwerte verwendet werden. Die ein- und dreidimensionalen Simulationen enden am

17. Juli um 09 Uhr MESZ. Die Tagesmittelwerte der 2-m-Lufttemperatur, der 2-m-relativen Feuchte und der 10-m-Windgeschwindigkeit aus den eindimensionalen Simulationen vom 16. Juli 09 Uhr MESZ bis 17. Juli 09 Uhr MESZ entsprechen jeweils einem Eckpunkt des Quaders.

Abbildung 71 zeigt die Lufttemperatur und horizontalen Windvektoren in 5 m über Grund um 14 Uhr MESZ. Zu dieser Zeit ist die Lufttemperatur noch etwas unterhalb des Tagesmaximums. In Gebieten mit hoher Gebäudedichte ist die Temperatur aufgrund der durch die Gebäude beeinflussten Energieumsetzungen (verminderte Verdunstung etc.) höher als in Gebieten mit geringer oder ohne Bebauung. Darüber hinaus ist die horizontale Variabilität im Modellgebiet orographisch geprägt, mit höheren Lufttemperaturen in den Tallagen und niedrigeren Temperaturen auf den Kuppenlagen (vgl. DWD-Bericht 243, Kapitel 5.3). Die Temperatur um 14 Uhr MESZ variiert im Modellgebiet zwischen einem minimalen Wert von 27,4 °C und einem Maximum von 32,7 °C. Wegen der sehr geringen Windgeschwindigkeit von etwa 1 m/s dominieren die lokalen über die regionalen Einflüsse. Die Windgeschwindigkeit in 5 m Höhe ist im Wald und in dichter Bebauung stark reduziert.

Abbildung 72 zeigt die nächtlichen Temperatur- und Windverhältnisse um 00 Uhr MESZ. Während der Nacht entwickeln sich Kaltluftabflüsse von den Hängen und Seitentälern des Saaletals, die kühlere und in der Regel frische Luft in die Stadt transportieren. Die Windgeschwindigkeiten sind hierbei aber generell sehr gering (vgl. DWD-Bericht 243, Kapitel 5.3 und Anlage 1, Kapitel 12.5). Die Lufttemperatur ist um 00 Uhr MESZ aufgrund der hohen Luftfeuchtigkeit (und der somit relativ geringen langwelligen Ausstrahlung der Oberflächen) noch sehr hoch und variiert zwischen 24,8 °C und 27,5 °C. Die höchsten Lufttemperaturen treten in Arealen mit dichter Bebauung auf. Die niedrigsten Temperaturwerte finden sich westlich der Stadt, im engen und steilen Mühlthal und seinen Seitentälern. Am Ausgang des Mühlthals ins Saaletal ist die kühlende Wirkung des nächtlichen Mühlthalwindes (vgl. KOCH 1953) auf die dortigen Bereiche der Innenstadt gut zu erkennen.

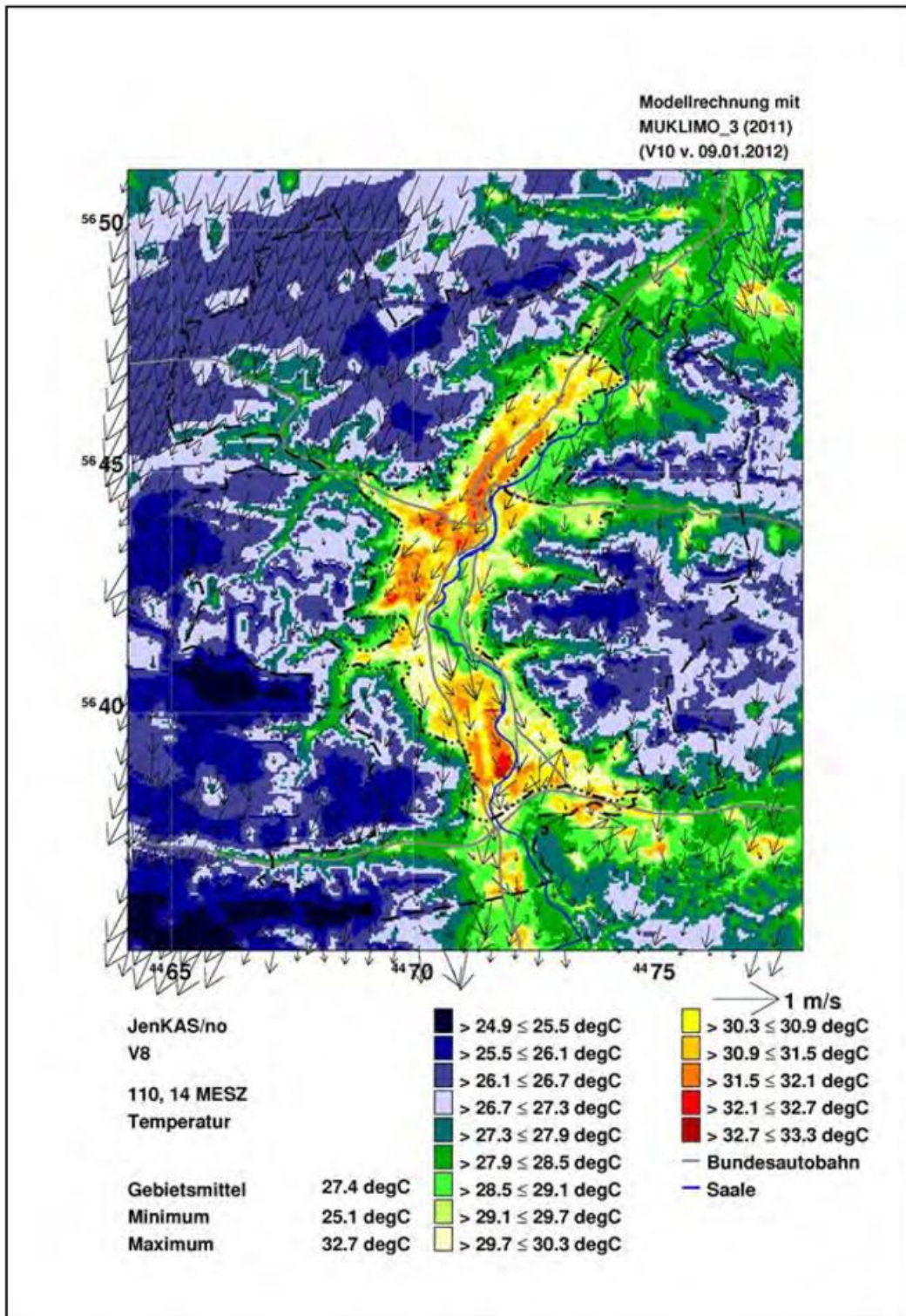


Abbildung 71: Lufttemperatur und horizontale Windvektoren in 5 m über Grund um 14 Uhr MESZ für die Anströmung NO mit der Initialisierung $T_{c,max} = 25 \text{ °C}$, $rh_{c,max} = 80 \%$ und $v_{c,min} = 0,7 \text{ m/s}$.

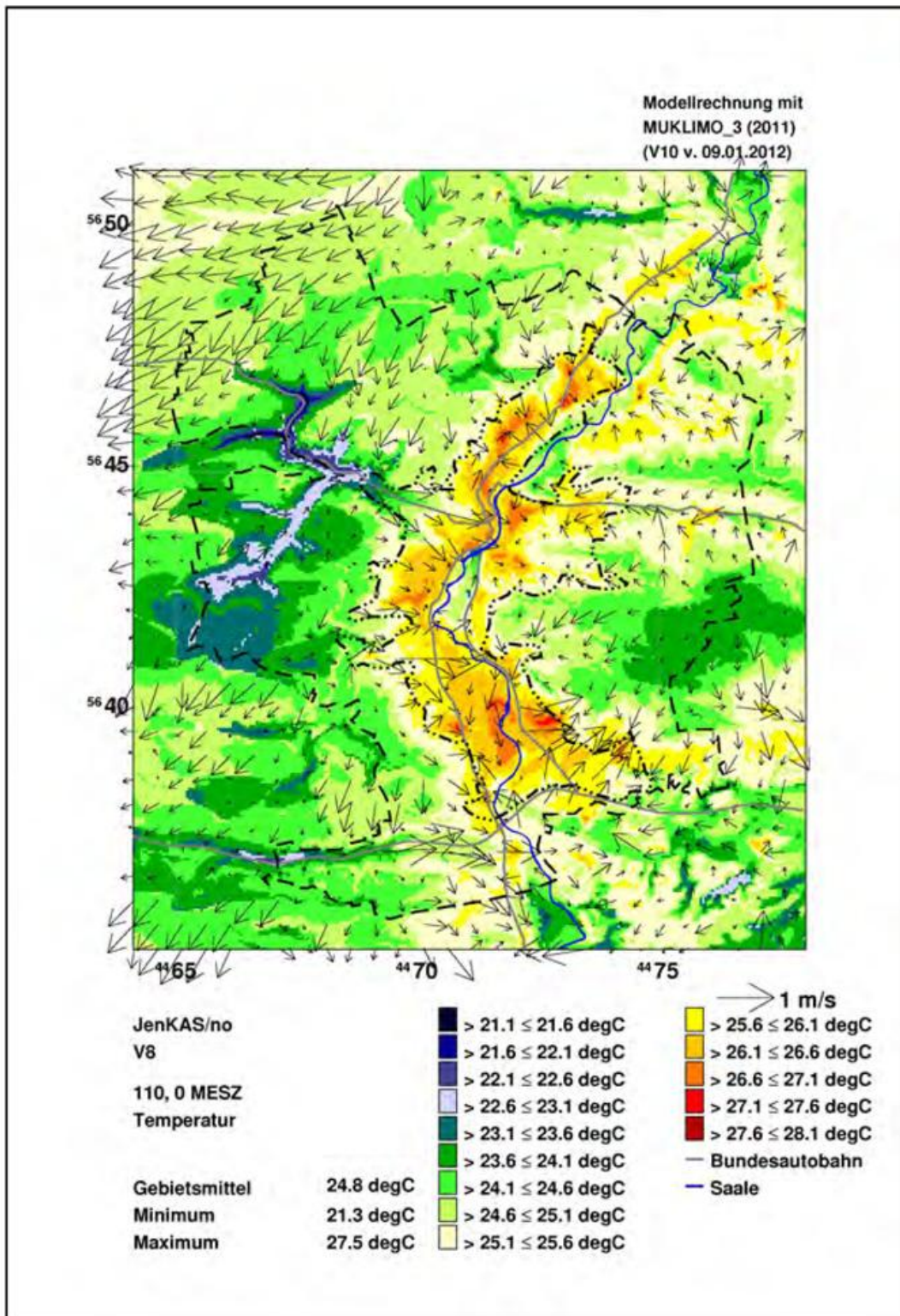


Abbildung 72: Lufttemperatur und horizontale Windvektoren in 5 m über Grund um 00 Uhr MESZ für die Anströmung NO mit der Initialisierung $T_{c,max} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $rh_{c,max} = 80 \%$ und $v_{c,min} = 0,7 \text{ m/s}$.

13.4 Ergebnisse für den Zeitraum 1971/2000

13.4.1 Evaluierung der simulierten Klimaindizes

Zunächst wird die beobachtete Zeitreihe der DWD Station Artern für den Zeitraum 1971/2000 als Eingabe für die Quadermethode gewählt. Diese Simulation wird zur Überprüfung der Belastbarkeit der Ergebnisse und zur Evaluierung des gesamten Verfahrens genutzt. Sie wird im Folgenden EVAL (Evaluierungslauf) genannt. Für den Vergleich der klimatologischen Kenntage aus den Messungen mit den Simulationsergebnissen wird die Zeitreihe der Messstation Jena/Sternwarte herangezogen.

Tabelle 18 stellt die klimatologischen Kenntage aus den Beobachtungen (OBS) den Ergebnissen der Quadermethode (EVAL) für den Zeitraum 1971/2000 gegenüber. Aus den Simulationsergebnissen EVAL wurden die Tagesmaximumtemperaturen (Sommertage, heiße Tage) ausgewertet. Die klimatologischen Kenntage für EVAL wurden über ein Gebiet von je 3 x 3 Gitterzellen um die Messstation Jena/Sternwarte gemittelt. Die Abweichung zwischen beobachteter und berechneter mittlerer jährlicher Anzahl der Tage ist mit +3 % für die Sommertage und -9 % für die heißen Tage sehr gering. Die höhere prozentuale Abweichung der heißen Tage ist hauptsächlich durch die geringe Absolutanzahl dieser Ereignisse im Vergleich zu den Sommertagen verursacht.

Die vorliegenden Evaluierungsergebnisse deuten darauf hin, dass die Quadermethode mit den Werten der Eckpunkte, wie sie hier verwendet wurden, gut für die Analyse der Sommertage und der heißen Tage geeignet ist. Die Evaluation für abendliche und nächtliche Kenntage (z. B. jährliche Anzahl der Tropennächte) fiel deutlich schlechter aus. Auf eine Auswertung und Präsentation der entsprechenden Ergebnisse wird daher verzichtet.

Tabelle 18: Vergleich der beobachteten und simulierten Klimaindizes für 1971/2000 (mittlere jährliche Anzahl der Tage). Die Werte OBS stammen von der Messstation Jena/Sternwarte. Die Werte unter EVAL resultieren aus der Quadermethode (siehe Text). Proz. Abw. steht für prozentuale Abweichung von EVAL zu OBS.

Klimaindex	Messstation	OBS	EVAL	proz. Abw.
Sommertage ($N_{T_{\max} \geq 25}$)	Jena/Sternwarte	47,6	48,8*	+3 %
Heiße Tage ($N_{T_{\max} \geq 30}$)	Jena/Sternwarte	10,8	9,8*	-9 %

*Mittelwert über 3 x 3 MUKLIMO_3-Gitterpunkte

13.4.2 Analyse des Istzustandes 1971/2000

Die räumliche Variabilität der Klimaindizes im Stadtgebiet ist stark durch die Überlagerung der Auswirkungen der Bebauung (städtischer Wärminseleffekt) und der orographischen Einflüsse auf die Lufttemperatur geprägt. So zeigt die Karte der berechneten Anzahl an Sommertagen ($N_{T_{\max} \geq 25}$) für EVAL, dass diese in dicht bebauten Tallagen, wie in der Innenstadt und in den Gewerbegebieten von Jena, am höchsten ist (Abbildung 73). Gleiches gilt für die berechnete Anzahl an heißen Tagen ($N_{T_{\max} \geq 30}$, Abbildung 74), wobei in den ländlichen Kuppenlagen mit im Mittel bis zu 2 heißen Tagen pro Jahr die 30-°C-Temperschwelle bisher nur selten überschritten wird.

Der Vergleich der Klimaindizes längs der Sohle des Saaletals ermöglicht — da die Geländehöhe hier nur wenig variiert — die Auswirkung der Bebauung von derjenigen der Orografie näherungsweise zu separieren. Während sich für die ländlichen Flächen südlich

und nördlich der Stadt im Saaletal etwa 25 bis 30 Sommertage und etwa 2 bis 4 heiße Tage pro Jahr ergeben, werden in den dicht bebauten Tallagen etwa 45 bis 60 Sommertage und etwa 8 bis 14 heiße Tage pro Jahr berechnet.

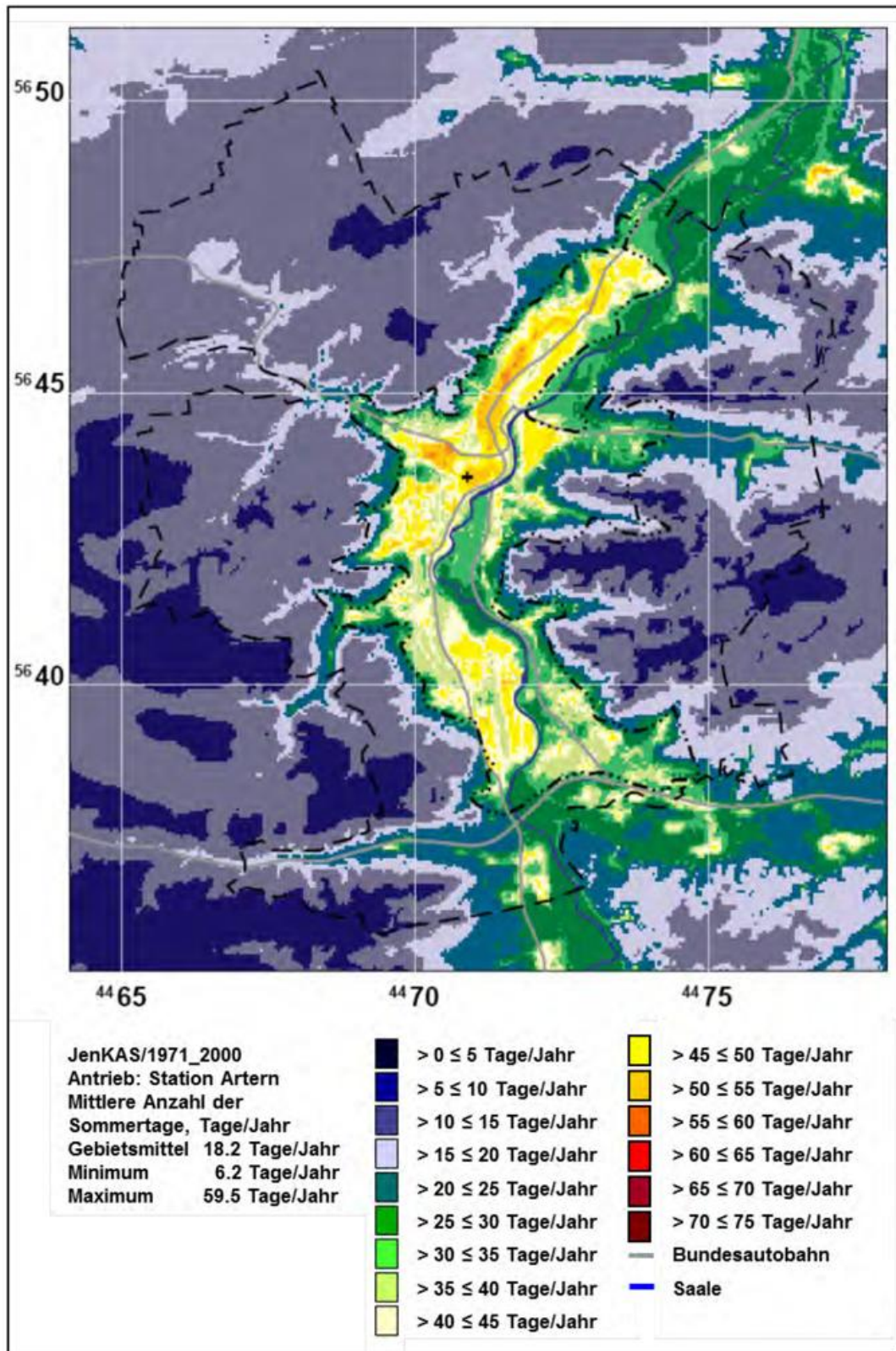


Abbildung 73: Mittlere jährliche Anzahl der Sommertage im inneren Modellgebiet für den Evaluierungslauf 1971/2000. Die Position der DWD-Messstation Jena/Sternwarte ist mit einem '+' gekennzeichnet.

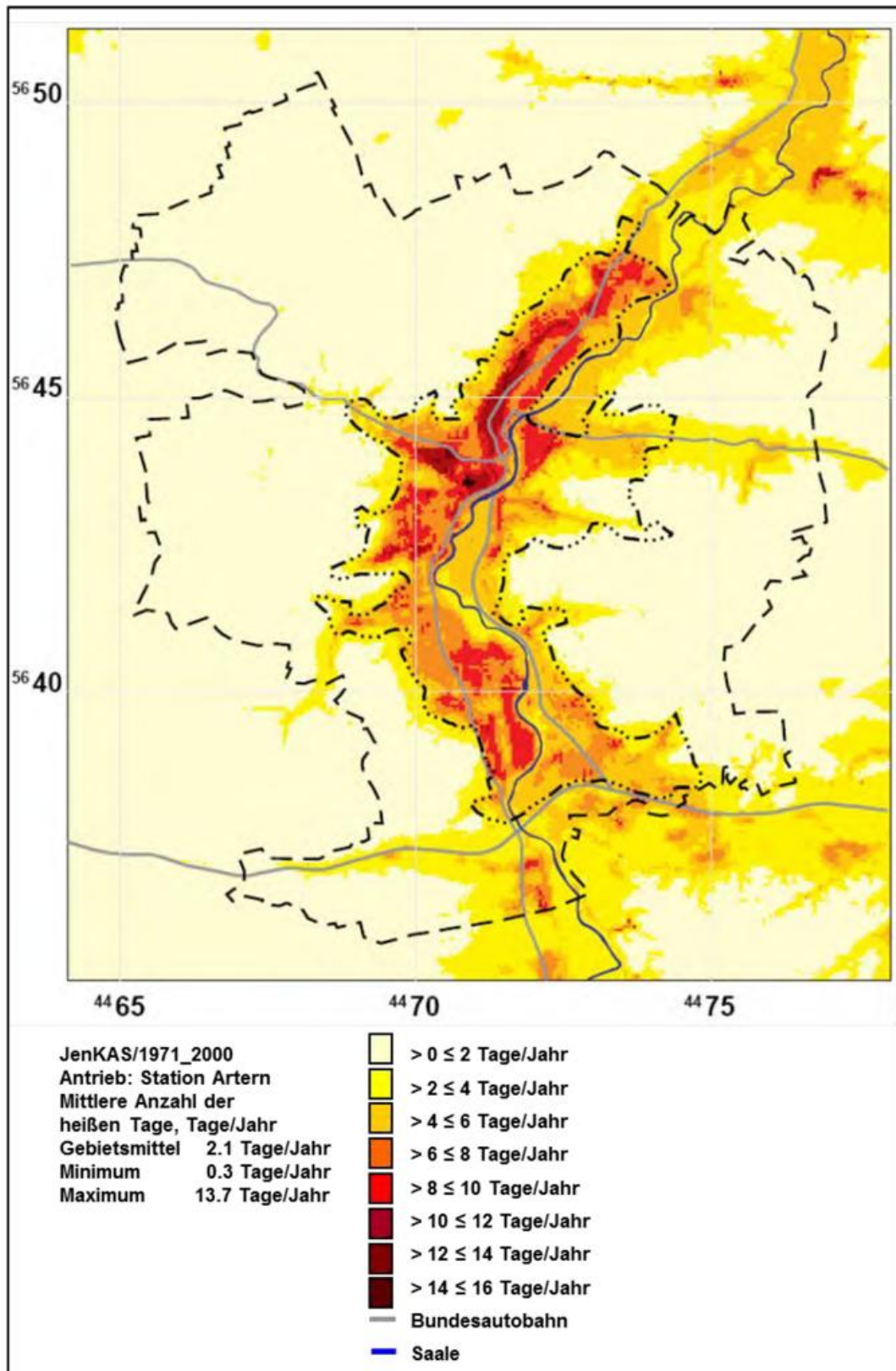


Abbildung 74: Mittlere jährliche Anzahl der heißen Tage im inneren Modellgebiet für den Evaluierungslauf 1971/2000. Die Position der DWD-Messstation Jena/Sternwarte ist mit einem '+' gekennzeichnet.

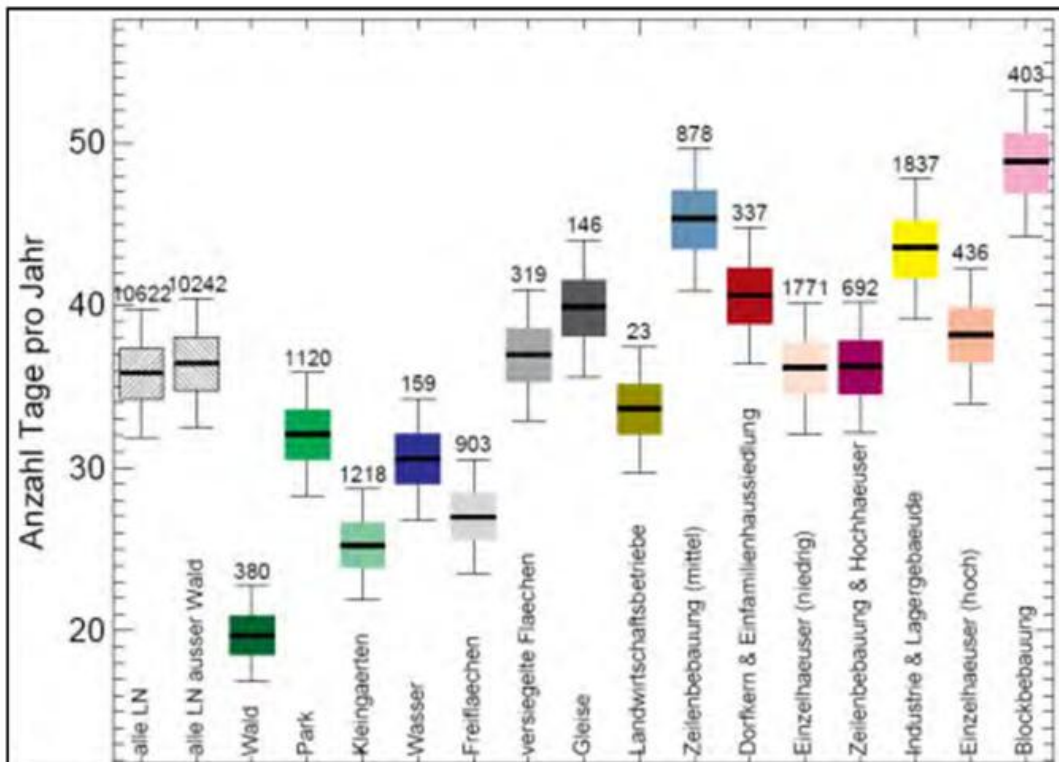
13.4.3 Auswirkungen unterschiedlicher Bebauungsstrukturen

Um die klimatologischen Auswirkungen der Landnutzung und der Bebauungsstruktur systematisch zu untersuchen, wurden statistische Auswertungen durchgeführt, die mit einem Box-Whisker-Plot visualisiert werden.

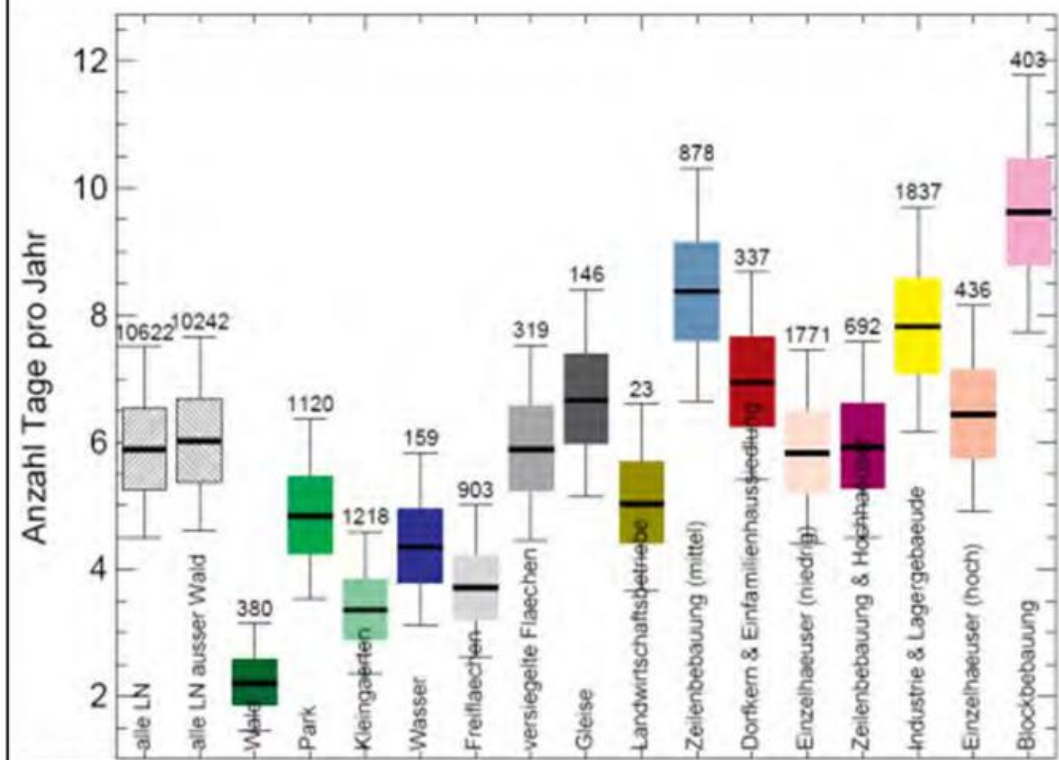
Abbildung 75a zeigt für die Anzahl der Sommertage ($N_{T_{\max} \geq 25}$) die Box-Whisker-Plots für jede einzelne Landnutzungs-kategorie ausgewertet für das Innenstadtgebiet von Jena für den Istzustand 1971/2000 (EVAL). Die niedrigste Anzahl der Sommertage findet sich im Wald. Sie ist signifikant geringer als die über alle anderen Landnutzungs-kategorien gemittelte Anzahl der Sommertage. Die geringe Anzahl im Wald ist durch den Schattenwurf der Bäume verursacht. Die Absorption und Reflexion der Sonnenstrahlung erfolgt überwiegend im Kronenbereich der Bäume. Neben Landnutzungen mit viel Grünfläche, wie Parks und Kleingärten, weisen auch Wasserflächen eine relativ niedrige Anzahl an Sommertagen auf. Da Wasserflächen aber tagsüber viel Wärme speichern und wie Gebäude die gespeicherte Wärme nachts wieder abgeben, können Wasserflächen nachts zu Wärmebelastung beitragen und sind daher zur Milderung von städtischer Wärmebelastung nur eingeschränkt geeignet.

Die höchste Anzahl an Sommertagen ergibt sich bei hoher Bebauungsdichte und hohem Versiegelungsgrad – zum einen bei Blockbebauung und Zeilenbebauung, zum anderen aber auch in Industrie- und Gewerbegebieten. Dies bedeutet, dass in Quartieren mit hoher Bebauungsdichte der tagsüber durch die Gebäude entstehende Schattenwurf die Aufheizung durch die stark reduzierte Verdunstung und den reduzierten horizontalen Luftaustausch nicht ausgleichen kann.

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Landnutzungen finden sich auch bei der Auswertung der mittleren jährlichen Anzahl der heißen Tage (Abbildung 75b), allerdings ergeben sich erwartungsgemäß niedrigere Absolutwerte als bei den Sommertagen. In den Waldgebieten des ausgewerteten Innenstadtgebietes sind heiße Tage besonders selten. Bei der landnutzungsspezifischen Auswertung von Sommertagen und heißen Tagen ist grundsätzlich zu beachten, dass auch die Größe der Areale mit nahezu einheitlicher Landnutzung von Bedeutung ist. Bei größeren zusammenhängenden Gebieten einer Landnutzung kann sich das charakteristische Mikroklima gut ausprägen, wohingegen bei räumlich stark variierender Landnutzung die Temperaturwerte durch Luftaustauschprozesse auch stark durch benachbarte Landnutzungen beeinflusst sind. Untersuchungen haben gezeigt, dass schon kleinere Parkanlagen mit Flächen unter 10 ha eine deutlich die Temperatur reduzierende Wirkung aufweisen (BONGARDT 2006).



(a) Anzahl der Sommertage (NT_{max≥25})



(b) Anzahl der heißen Tage (NT_{max≥30})

Abbildung 75: Box-Whisker-Plots für jede Landnutzungsclass im Mittel über das Innenstadtgebiet von Jena für 1971/2000 (EVAL) für die mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen (a) und heißen Tagen (b). Die beiden linken Klassen beziehen sich jeweils auf die Anzahl der Tage gemittelt über alle Landnutzungsclassen (1. Klasse von links) bzw. gemittelt über alle Landnutzungen mit Ausnahme des Waldes (2. Klasse von links). Die Zahlen über den Box-Whiskers geben die Anzahl der Gitterzellen für jede Landnutzungsclass an.

13.4.4 Auswirkungen der geplanten Bebauung und eines Planspiels

Zur Untersuchung der Auswirkungen von Planungsvorhaben auf das Stadtklima stellte die Stadt Jena Informationen über zukünftig geplante Landnutzungsänderungen (neue Bebauungsgebiete, Änderungen von Bebauungsstrukturen, Schaffung von Grünflächen etc.) zur Verfügung. Um weitere Erkenntnisse über mögliche Anpassungsmaßnahmen zu gewinnen, wurden neben dem Planzustand auch die Landnutzungsänderungen für ein hypothetisches Planspiel bereitgestellt. Sowohl für den Planzustand als auch für das Planspiel wurden aufgrund der begrenzten Modellauflösung nur Nutzungsänderungen für Flächen ≥ 2 ha berücksichtigt. Die Zuordnung der geplanten Nutzungen in MUKLIMO_3-Landnutzungsänderungen übernahm die Firma ThINK Jena (Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz).

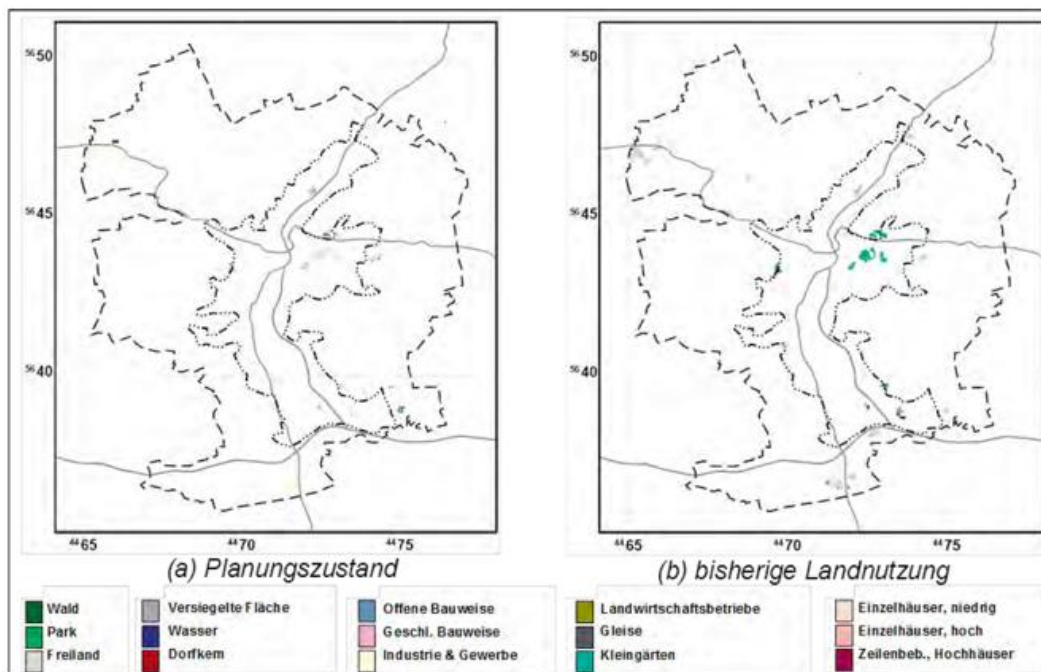


Abbildung 76: Geplante Landnutzung (a) im Vergleich zur bisherigen Landnutzung (b). Weiße Flächen bedeuten keine Änderung der Landnutzung. Graue Linien zeigen den Verlauf wichtiger Straßen.

Abbildung 76 zeigt die Flächen, auf denen eine Landnutzungsänderung geplant ist: In Abbildung 76a ist die neue und in Abbildung 76b die bisherige Landnutzung (siehe Kapitel 13.3.1) auf diesen Flächen dargestellt. Die geplanten städtebaulichen Veränderungen umfassen im Wesentlichen die Schaffung neuer Areale mit Einzelhäusern (niedrig und hoch) und neuer Industrie- und Gewerbegebiete (Abbildung 76a). Die Bauvorhaben sind auf bisher als Freiflächen oder Kleingärten kategorisierten Flächen geplant (Abbildung 76b) und sind über das gesamte Stadtgebiet verteilt. Ein Schwerpunkt für neue Industrie- und Gewerbegebiete liegt im Süden der Stadt. Neue Areale mit Einzelhäusern sind insbesondere östlich der Saale im Bereich des Gembdentals geplant. Neue Grünflächen sind kaum geplant, im Südosten der Stadt sollen jedoch auf einer bisherigen Freifläche Kleingärten entstehen.

Abbildung 77 zeigt die Landnutzungsänderungen eines Planspiels im Vergleich zu den bisherigen Nutzungen. Die Unterschiede des Planspiels zum Planzustand sind

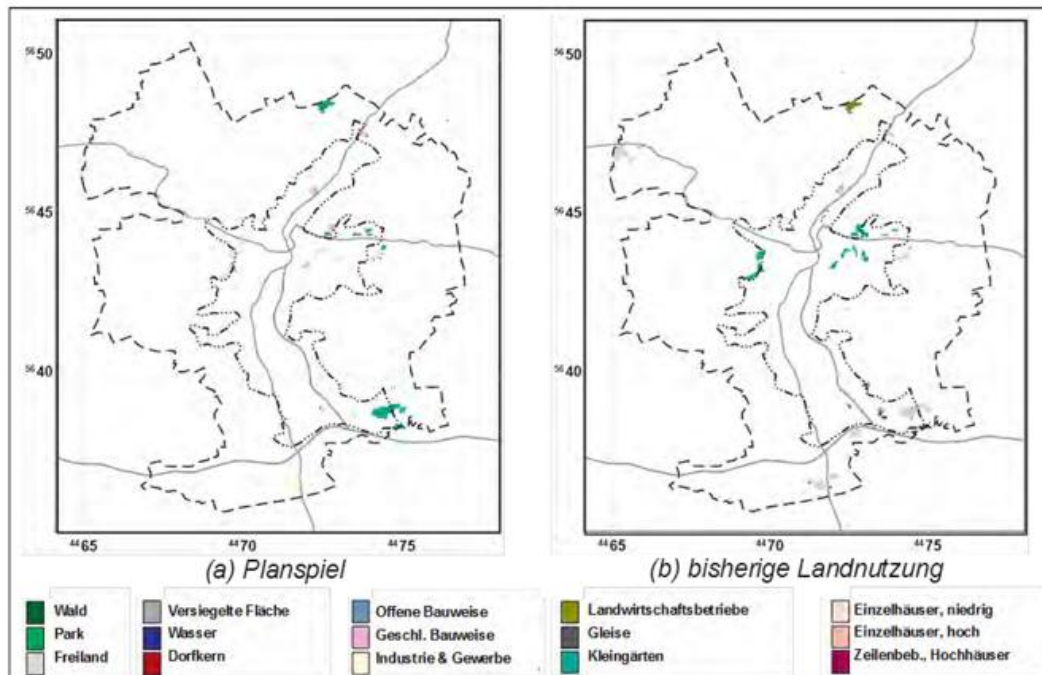


Abbildung 77: Planspiel einer Landnutzungsänderung (a) im Vergleich zur bisherigen Landnutzung (b). Weiße Flächen bedeuten keine Änderung der Landnutzung. Graue Linien zeigen den Verlauf wichtiger Straßen.

überwiegend recht kleinräumiger Natur, mit Ausnahme des neuen Kleingartengebietes im Südosten des Stadtgebietes, das beim Planspiel eine weitaus größere Fläche einnimmt. Das Planspiel umfasst auch einige weitere neue Grünflächen (Kleingärten und Parks) im Bereich des Gembdentals und im Norden des Stadtgebietes. Zum Vergleich des Planzustandes (Abbildung 76) und des Planspiels (Abbildung 77) mit dem gesamten Istzustand (Bestand) sei auf Abbildung 68 verwiesen.

Im Vergleich der Simulationsergebnisse für den Istzustand mit denen des Planzustandes und des Planspiels (Abbildung 78 und Tabelle 19) wird deutlich, dass Baumaßnahmen überwiegend zu einer Erhöhung und neue Grünflächen überwiegend zu einer Reduzierung der Anzahl der Sommertage bzw. der heißen Tage führen. Da aber neue Grünflächen nur in sehr geringem Maße geplant sind, überwiegt im Stadtgebiet bei weitem die Zunahme von Sommertagen bzw. heißen Tagen durch den Planzustand oder das Planspiel. Die Auswirkungen auf die klimatologischen Kenntage sind im Wesentlichen auf die nähere Umgebung der Flächen mit einer geplanten Landnutzungsänderung beschränkt. Hierbei ist zu beachten, dass Änderungen von weniger als 3 Kenntagen pro Jahr in Abbildung 78 als weiße Flächen eingezeichnet sind.

Die stärkste Zunahme an Sommertagen und heißen Tagen ergibt sich nach den Berechnungen für die Areale mit geplanten Industrie- bzw. Gewerbegebieten im Süden der Stadt.

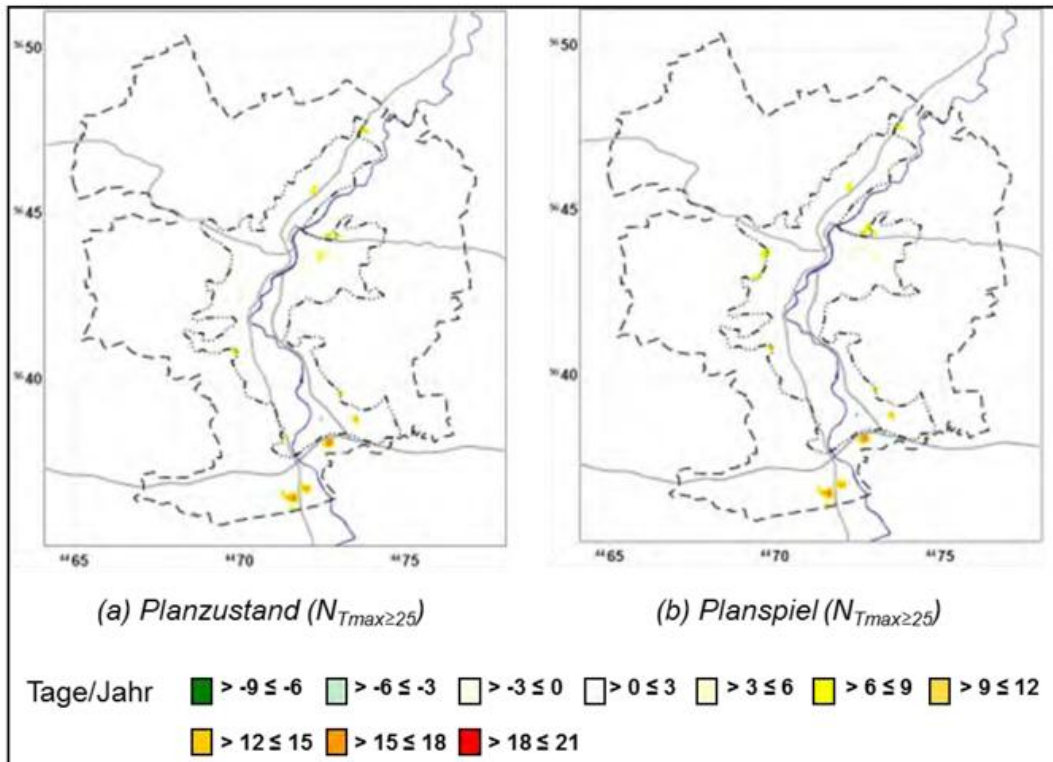


Abbildung 78: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage durch die Landnutzungsänderungen für den Planzustand (a) und das Planspiel (b) im Zeitraum 1971/2000 (EVAL).

Da die Änderungen der Anzahl der heißen Tage in den anderen Arealen mit Landnutzungsänderungen überall unter 3 Tagen pro Jahr liegen, wird hier auf eine kartografische Darstellung der Änderungen verzichtet.

Tabelle 19: Minimum und Maximum der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage und heißen Tage in Jena aufgrund von Landnutzungsänderungen des Planzustandes und des Planspiels im Zeitraum 1971/2000.

Klimaindex		Minimum	Maximum
Planzustand	Sommertage ($N_{T_{max} \geq 25}$)	-6,4	+18,6
Planspiel	Sommertage ($N_{T_{max} \geq 25}$)	-6,3	+18,6
Planzustand	Heiße Tage ($N_{T_{max} \geq 30}$)	-1,8	+4,9
Planspiel	Heiße Tage ($N_{T_{max} \geq 30}$)	-1,8	+4,9

13.4.5 Regionale Klimaprojektionen als Eingabe für die Quadermethode

Anstatt der Stationsmessungen können auch regionale Klimaprojektionen als Eingabe für die Quadermethode verwendet werden. Auch diese Ergebnisse müssen evaluiert werden. Dies geschieht hier, indem aus den historischen Läufen der regionalen Klimaprojektionen (C20) gleichfalls der Zeitraum 1971/2000 simuliert und mit dem Evaluierungslauf 1971/2000 verglichen wird (siehe Kapitel 13.3.3). Zur Berücksichtigung der Unsicherheit der regionalen Klimamodelle wird ein Ensemble regionaler Klimaprojektionen, bestehend

aus Simulationen mit den Modellen REMO, CLM, WETTREG und STAR (siehe Kapitel 13.2.1.4), verwendet. Im Folgenden werden diese Simulationen mit dem Namen des antreibenden regionalen Klimamodells benannt.

Der visuelle Vergleich der vier mit regionalen Klimaprojektionen angetriebenen Simulationen für die mittlere Anzahl Sommertage im Zeitraum 1971/2000 (Abbildung 79) mit EVAL (Abbildung 73) zeigt, dass die Klimaprojektionen mit WETTREG und STAR sehr gut mit EVAL übereinstimmen. Die Simulation mit CLM als Eingabe für die Quadermethode liefert hingegen – mit Ausnahme der höheren Lagen – im Vergleich zu EVAL eine zu geringe Anzahl der Sommertage ($N_{T_{\max} \geq 25}$). Das Ergebnis für die Klimaprojektion REMO zeigt wiederum im dicht bebauten Innenstadtbereich eine etwas zu hohe und in den höheren topografischen Lagen außerhalb der Stadt eine etwas zu niedrige Anzahl der Sommertage.

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

Zum besseren Vergleich von EVAL, REMO, CLM, WETTREG und STAR sind in Tabelle 20 die mittlere jährliche Anzahl der Sommertage ($N_{T_{\max} \geq 25}$) gemittelt über das Stadtgebiet von Jena sowie das Minimum und Maximum zusammengefasst.

Auch hier ist die gute Übereinstimmung zwischen den Mittelwerten von WETTREG, STAR und REMO mit EVAL sowie eine weniger gute Übereinstimmung zwischen CLM und EVAL erkennbar. Die räumliche Variabilität (Max. – Min.) von EVAL wird von REMO überschätzt, von CLM jedoch unterschätzt. Des Weiteren sind in Tabelle 20 die räumlichen Mittel des Konfidenzintervalls auf dem 90%-Signifikanzniveau (Differenz zwischen dem 95%- und 5%-Quantil) aufgelistet. Im Vergleich zu EVAL überschätzen CLM und REMO etwas und STAR unterschätzt etwas die jährlichen Schwankungen. Die Unterschätzung des 90%-Konfidenzintervalls durch WETTREG im Vergleich zu EVAL fällt hingegen deutlicher aus. Dies geht auch aus dem Vergleich der Box-Whisker-Plots (siehe S. 167) hervor (Abbildung 80a).

Für die entsprechenden Auswertungen der heißen Tage weisen die Simulationen mit den vier regionalen Klimaprojektionen etwas andere Charakteristika im Vergleich zu EVAL auf (Abbildung 80b, Abbildung 81, Tabelle 21). WETTREG und STAR unterschätzen die Ergebnisse von EVAL (Abbildung 74) nur leicht und für REMO ergibt sich eine deutlichere Unterschätzung der mittleren jährlichen Anzahl der heißen Tage. Die Ergebnisse für CLM überschätzen hingegen die Ergebnisse von EVAL deutlich.

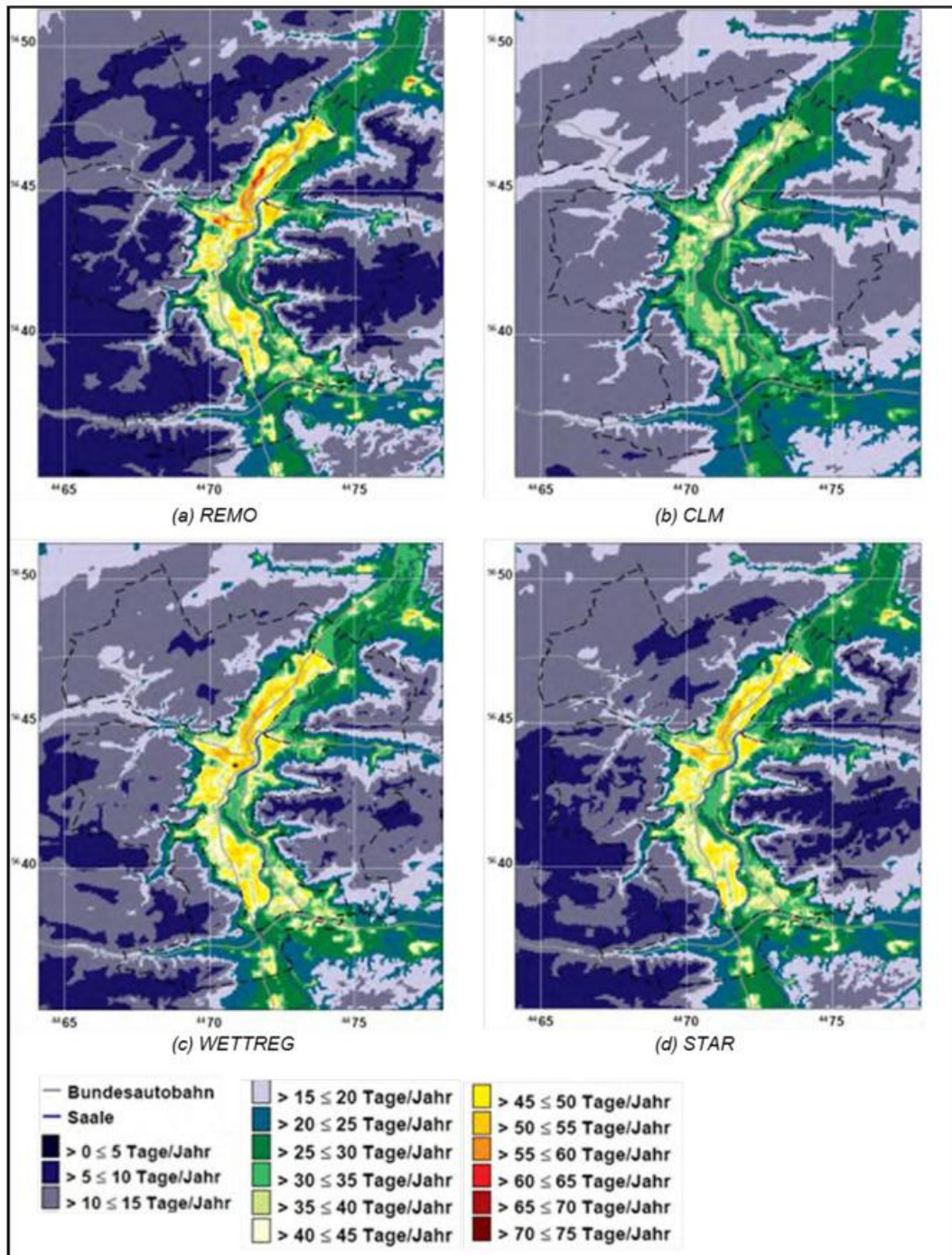


Abbildung 79: Mittlere jährliche Anzahl der Sommertage ($N_{T_{max} \geq 25}$) im inneren Modellgebiet aus REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d) für 1971/2000 (C20).

Diese Vergleiche zeigen, dass für die Beschreibung des Istzustandes 1971/2000 stets der Evaluationslauf (EVAL) heranzuziehen ist. Für die nachfolgende Darstellung zukünftiger Situationen mit Hilfe der vier Klimaprojektionen ist stets die Differenz zu ihren historischen Vergleichsläufen für 1971/2000 und nicht zum Evaluationslauf zu bilden. Damit werden die in Tabelle 20 und Tabelle 21 gezeigten Abweichungen zum Gebietsmittel (sog. Bias) weitgehend minimiert.

Tabelle 20: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage zusammen mit dem räumlichen Mittel des Konfidenzintervalls auf dem 90%-Signifikanzniveau für EVAL, REMO, CLM, WETTREG und STAR, jeweils bezogen auf das Innenstadtgebiet von Jena (1971/2000).

Antrieb	Mittel	Minimum	Maximum	Max. – Min.	90%-Konfidenzintervall
EVAL	35,9	9,1	59,5	50,4	7,9
REMO	34,9	7,2	69,7	62,5	8,3
CLM	30,7	11,6	49,0	37,4	8,5
WETTREG	37,0	8,9	59,2	50,3	4,8
STAR	35,5	8,2	60,2	52,0	7,0

Tabelle 21: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der mittleren jährlichen Anzahl der heißen Tage zusammen mit dem räumlichen Mittel des Konfidenzintervalls auf dem 90%-Signifikanzniveau für EVAL, REMO, CLM, WETTREG und STAR, jeweils bezogen auf das Innenstadtgebiet von Jena (1971/2000).

Antrieb	Mittel	Minimum	Maximum	Max. – Min.	90%-Konfidenzintervall
EVAL	6,0	0,6	13,7	13,1	3,0
REMO	4,0	0,2	11,1	10,9	2,3
CLM	8,4	2,1	15,3	13,2	3,6
WETTREG	5,6	0,4	13,7	13,3	1,8
STAR	5,4	0,4	12,4	12,0	2,3

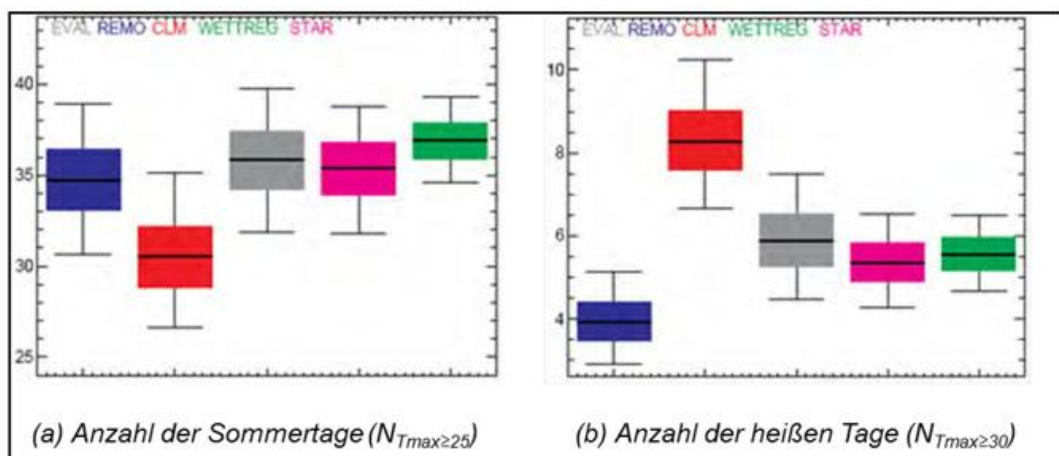


Abbildung 80: Box-Whisker-Plots für die mittlere jährliche Anzahl der Sommertage (a) und heißen Tage (b) gemittelt über das Innenstadtgebiet von Jena für EVAL (grau), REMO (blau), CLM (rot), WETTREG (grün) und STAR (magenta) für den Zeitraum 1971/2000.

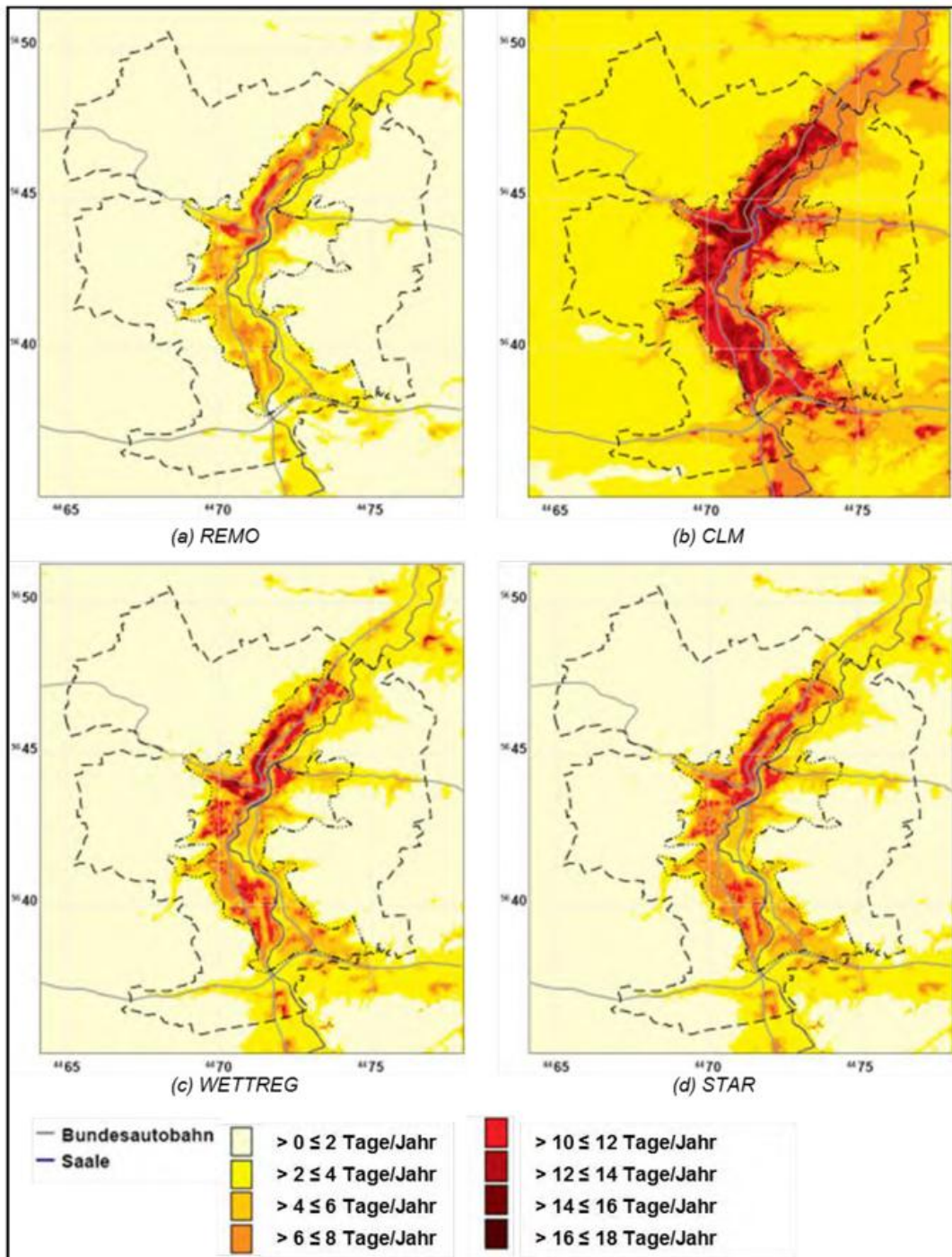


Abbildung 81: Mittlere jährliche Anzahl der heißen Tage ($N_{T_{max} \geq 30}$) im inneren Modellgebiet aus REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d) für 1971/2000 (C20).

13.5 Klimaänderungssignale in der Zukunft

13.5.1 Auswirkung der Klimaänderung bis zum Zeitraum 2021/2050

Zur Abschätzung der Änderung der klimatologischen Kenntage in Folge der globalen Erwärmung wird für das MUKLIMO_3-Modellgebiet ein Vergleich der zukünftigen Bedingungen (2021/2050) nach dem SRES A1B Szenario (NAKICENOVIC und SWART 2000) mit denen der historischen Periode (C20, 1971/2000) durchgeführt (siehe Kapitel 13.2.1.1). Zunächst werden Ergebnisse zu den Auswirkungen des Klimawandels

bei aktueller Landnutzung, im nachfolgenden Kapitel 13.5.2 dann in Kombination mit geplanten Landnutzungsänderungen präsentiert.

Abbildung 82 zeigt die Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ($\Delta N_{T_{max} \geq 25}$) für die vier Klimaprojektionen REMO, CLM, WETTREG und STAR als Differenz des Zeitraumes 2021/2050 (A1B) zu 1971/2000 (C20) (vgl. Abbildung 79). Es wird deutlich, dass die Ergebnisse mit REMO, CLM und WETTREG für $\Delta N_{T_{max} \geq 25}$ recht nahe beieinander liegen. Wobei von den drei Projektionen REMO eine etwas größere Zunahme an Sommertagen im Innenstadtbereich und WETTREG eine etwas geringere Zunahme an Sommertagen außerhalb der Innenstadt zeigt. Das Änderungssignal aus STAR ist jedoch deutlich größer als das der jeweils anderen drei Projektionen. Dies ist im Wesentlichen auf die generell höher projizierte Temperaturzunahme von STAR zurückzuführen (siehe Abbildung 66). Insgesamt ist die räumliche Variabilität des Änderungssignals aller Projektionen überwiegend von der Orografie geprägt, während die Variabilität des Änderungssignals durch die heterogene Landnutzung vergleichsweise gering ist.

Tabelle 22: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage ($\Delta N_{T_{max} \geq 25}$) zusammen mit dem räumlichen Mittel des Konfidenzintervalls auf dem 90%-Signifikanzniveau für REMO, CLM, WETTREG und STAR. Die Werte zeigen die Differenz zwischen den Zeiträumen 2021/2050 (A1B) und 1971/2000 (C20), gemittelt über das Innenstadtbereich von Jena.

Antrieb	Mittel	Minimum	Maximum	Max. – Min.	90%-Konfidenzintervall
REMO	10,7	4,6	13,5	8,9	14,5
CLM	8,5	4,8	12,1	7,3	13,7
WETTREG	8,4	2,7	11,1	8,4	9,2
STAR	24,1	10,8	28,0	17,2	9,9

Tabelle 22 enthält die räumlichen Mittel-, Minimum- und Maximumwerte der in Abbildung 82 gezeigten mittleren Änderungssignale für das Innenstadtbereich Jenas, also die Differenzen der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage zwischen den Zeiträumen 2021/2050 und 1971/2000. Es wird deutlich, dass auch die räumlichen Mittel von $\Delta N_{T_{max} \geq 25}$ für das Innenstadtbereich Jenas für REMO, CLM und WETTREG sehr ähnlich sind. Die drei Projektionen ergeben eine mittlere Zunahme von etwa 20 % gegenüber den Beobachtungen an der Station Jena/Sternwarte (47,6 Sommertage/Jahr). Auf der Basis der Klimaprojektion STAR ergibt sich mit einer Zunahme von etwa 50 % für das Innenstadtbereich Jenas allerdings ein deutlich höheres Änderungssignal $\Delta N_{T_{max} \geq 25}$ (+24,1 Sommertage/Jahr). Dies kann – wie erwähnt – überwiegend auf den stärkeren regionalen Temperaturanstieg von STAR im Vergleich zu den anderen regionalen Klimaprojektionen (siehe Abbildung 66) zurückgeführt werden.

Die mittleren Änderungssignale aller vier Projektionen von $\Delta N_{T_{max} \geq 25}$ für das Innenstadtbereich Jenas sind etwas geringer als die entsprechenden Ergebnisse für das Stadtgebiet Frankfurts (siehe FRÜH et al. 2011b), liegen aber grundsätzlich in der gleichen Größenordnung. Die räumliche Variabilität der mittleren Änderungssignale (Max. – Min.) im Innenstadtbereich Jenas ist durch die Orografie etwa doppelt, für STAR sogar fast dreimal so hoch wie für das Stadtgebiet Frankfurts.

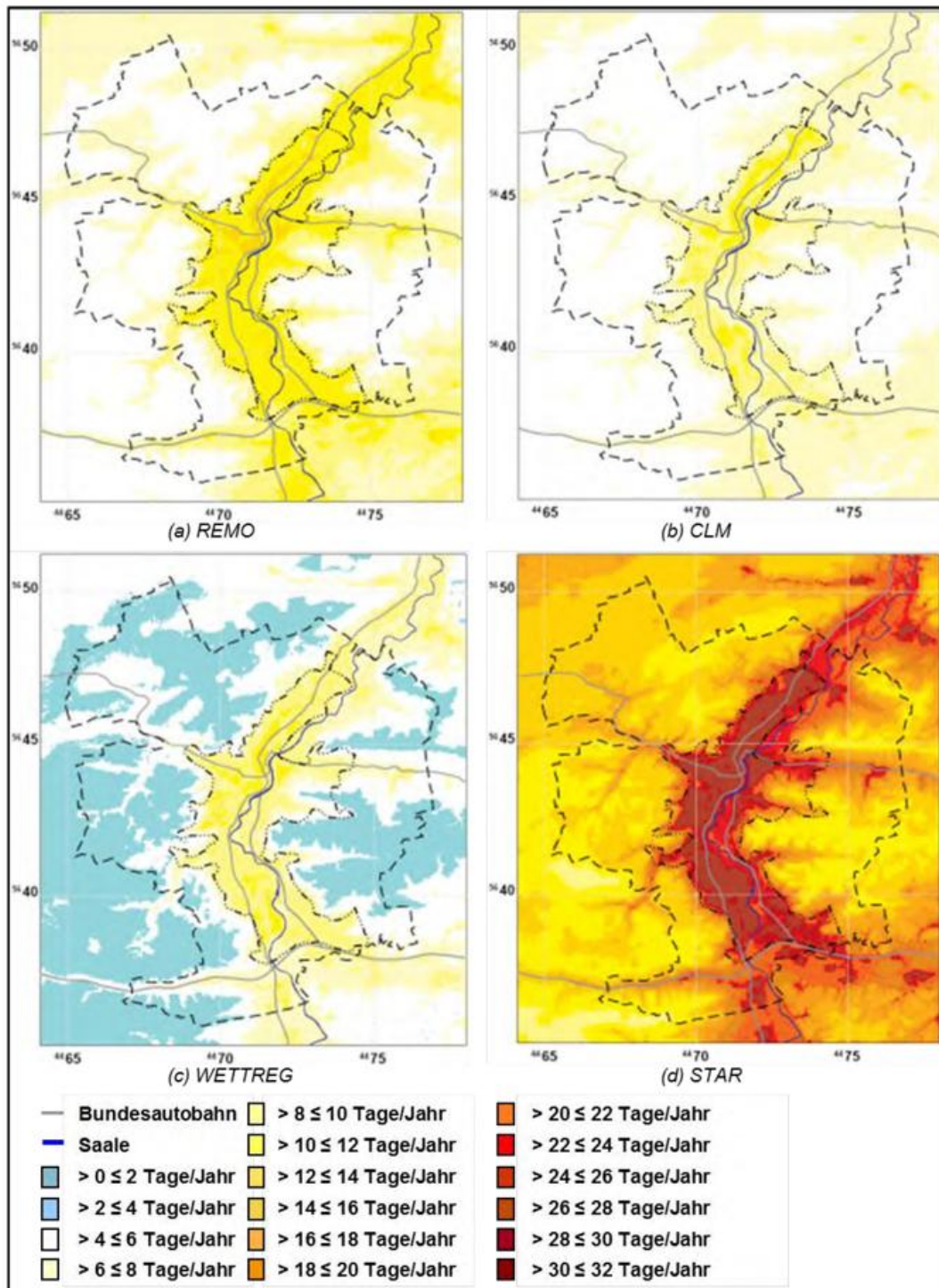


Abbildung 82: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ($\Delta N_{T_{\max} > 25}$) im inneren Modellgebiet als Differenz zwischen den Zeiträumen 2021/2050 (A1B) und 1971/2000 (C20) für REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d).

Tabelle 22 und Abbildung 83a zeigen auch die räumlichen Mittelwerte des Konfidenzintervalls für $\Delta N_{T_{\max} > 25}$ auf dem 90%-Signifikanzniveau für REMO, CLM, WETTREG und STAR. Diese liegen mit 9,2 bis 14,5 Sommertagen pro Jahr auf ähnlichem Niveau wie die Ergebnisse für das Stadtgebiet von Frankfurt (FRÜH et al. 2011b). Während für Frankfurt die Breite der 90%-Konfidenzintervalle etwa zwei- bis viermal größer war als die räumliche Variabilität der mittleren Änderungssignale (Max. –

Min.), ergibt sich für das Innenstadtgebiet Jena durch die vergleichsweise höhere räumliche Variabilität ein differenzierteres Ergebnis.

Grundsätzlich sind die Vertrauensintervalle (bzw. die Länge der Whiskers und damit die Unsicherheit) für die Änderungssignale deutlich größer als für den Evaluierungszeitraum 1971/2000 (Tabelle 20 und Abbildung 80). Dies ist auf die Summe der Variabilität der Vergangenheit und Zukunft zurückzuführen, aber auch auf die höhere Variabilität der zukünftigen Temperatur selbst (SCHÄR et al. 2004).

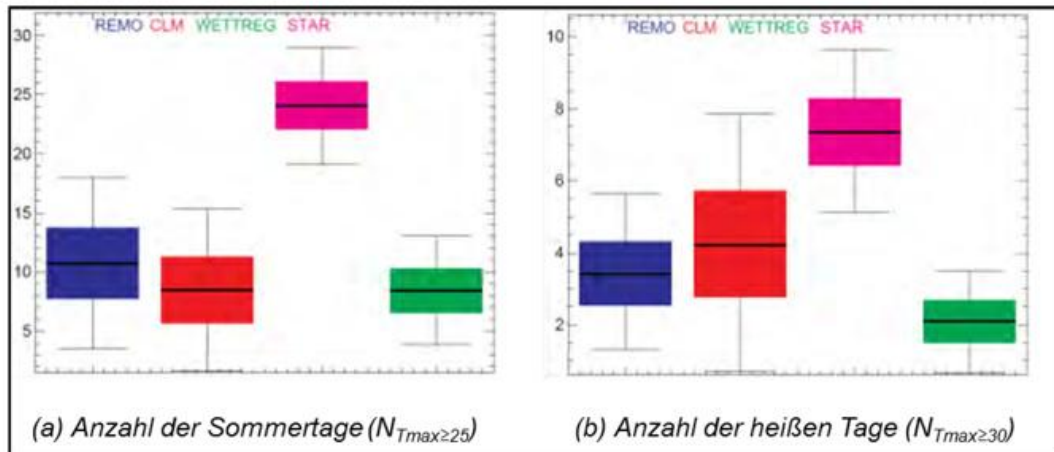


Abbildung 83: Box-Whisker-Plots für die Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage und der heißen Tage 2021/2050 (A1B) im Vergleich zu 1971/2000 (C20) für REMO (blau), CLM (rot), STAR (magenta) und WETTREG (grün) gemittelt über das Innenstadtgebiet von Jena.

Um den Einfluss der Landnutzung und insbesondere der unterschiedlichen Bebauungsstrukturen auf die Änderung der mittleren Anzahl der Sommertage zwischen den Zeiträumen 1971/2000 und 2021/2050 zu ermitteln, wurden die Konfidenzintervalle für $\Delta N_{T_{max} \geq 25}$ auch für die einzelnen MUKLIMO_3-Landnutzungsclassen bestimmt und als Box-Whisker-Plots in Abbildung 84 dargestellt. Für die verschiedenen Landnutzungsclassen zeigt sich, dass die Medianwerte (50%-Perzentile) von $\Delta N_{T_{max} \geq 25}$ sich nur um wenige Tage unterscheiden, und dass sich die Vertrauensintervalle auf dem 90%-Signifikanzniveau weitgehend überlappen. Der derzeitige Unterschied zwischen der Stadt und dem Umland wird demnach durch den erwarteten regionalen Klimawandel nicht intensiviert sondern bleibt weitgehend erhalten. Der geringe Unterschied im Änderungssignal zwischen den Landnutzungsclassen mit Bebauung und ländlichen Flächen belegt, dass die räumliche Variabilität von $\Delta N_{T_{max} \geq 25}$ (Abbildung 82, Tabelle 22) weitgehend durch die Unterschiede in der Geländehöhe bestimmt ist. Die durch den regionalen Klimawandel erwartete Zunahme von Sommertagen ist zwar in der Stadt nicht signifikant höher als die Zunahme im Umland, allerdings erhöht die Klimaänderung relativ gleichmäßig die Wärmebelastung sowohl in der Stadt als auch in deren Umland.

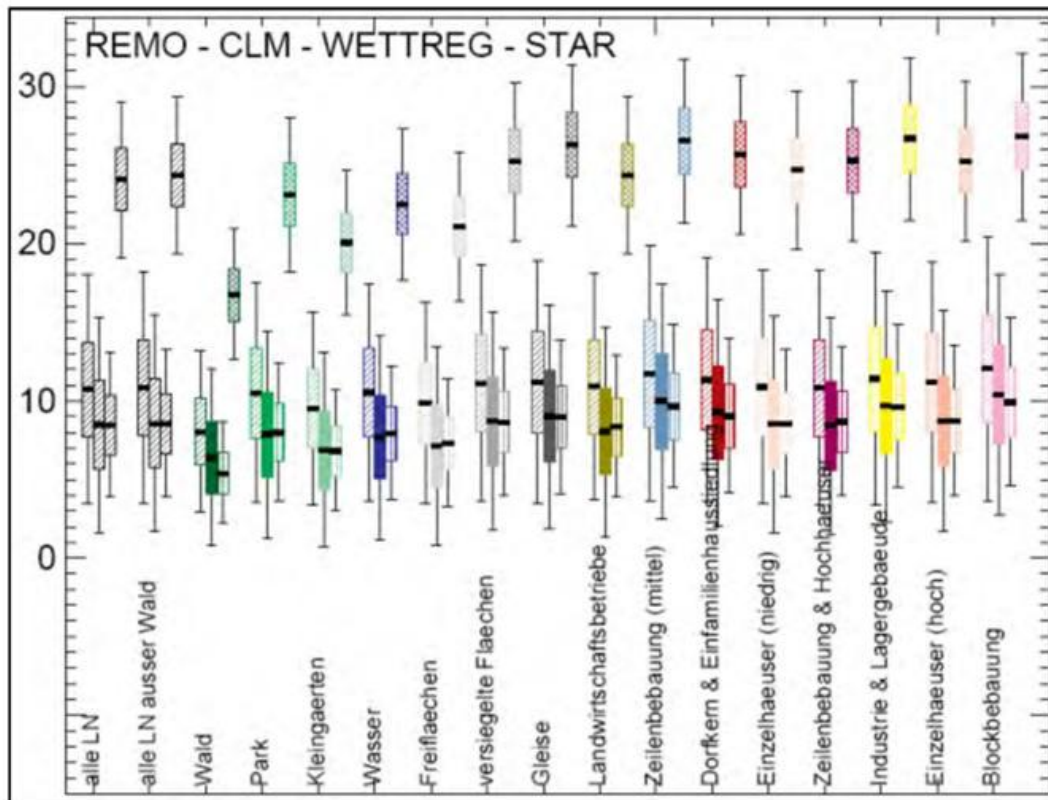


Abbildung 84: Box-Whisker-Plots für die Änderung der Anzahl der Sommertage 2021/2050 (A1B) im Vergleich zu 1971/2000 (C20) gemittelt über die einzelnen Landnutzungsklassen im Innenstadtdgebiet von Jena. Die Ergebnisse für REMO (schräg schraffiert), CLM (ausgefüllt), WETTREG (längs schraffiert) und STAR (kreuz schraffiert) sind für jede Landnutzung in dieser Reihenfolge dargestellt.

Abbildung 85, Tabelle 23 und Abbildung 83b zeigen die nach den Projektionen REMO, CLM, WETTREG und STAR erwartete Zunahme an heißen Tagen ($\Delta N_{T_{max} \geq 30}$) zwischen den Zeiträumen 1971/2000 und 2021/2050. Während STAR mit im Mittel 7,4 zusätzlichen heißen Tagen pro Jahr im Innenstadtdgebiet Jenas fast eine Verdoppelung der im Zeitraum 1971/2000 beobachteten 10,8 Tagen pro Jahr (Station Jena Sternwarte, Tabelle 18) erwarten lässt, beträgt die entsprechende Zunahme für die drei anderen Projektionen nur zwischen 20 % und 40 % (2,1 bis 4,3 zusätzliche heiße Tage, Tabelle 23). Außerhalb des Innenstadtdgebietes zeigt CLM die höchsten, REMO und WETTREG zeigen hingegen die niedrigsten mittleren Werte von $\Delta N_{T_{max} \geq 30}$ (Abbildung 85). Wie schon bei der Auswertung für die Sommertage zeigt STAR die größte räumliche Variabilität in $\Delta N_{T_{max} \geq 30}$ (Max. – Min., Tabelle 23). Sie ist mit 11,2 Tagen pro Jahr etwa zwei- bis dreimal höher als für die anderen drei Projektionen (4,0 bis 6,2 heiße Tage pro Jahr).

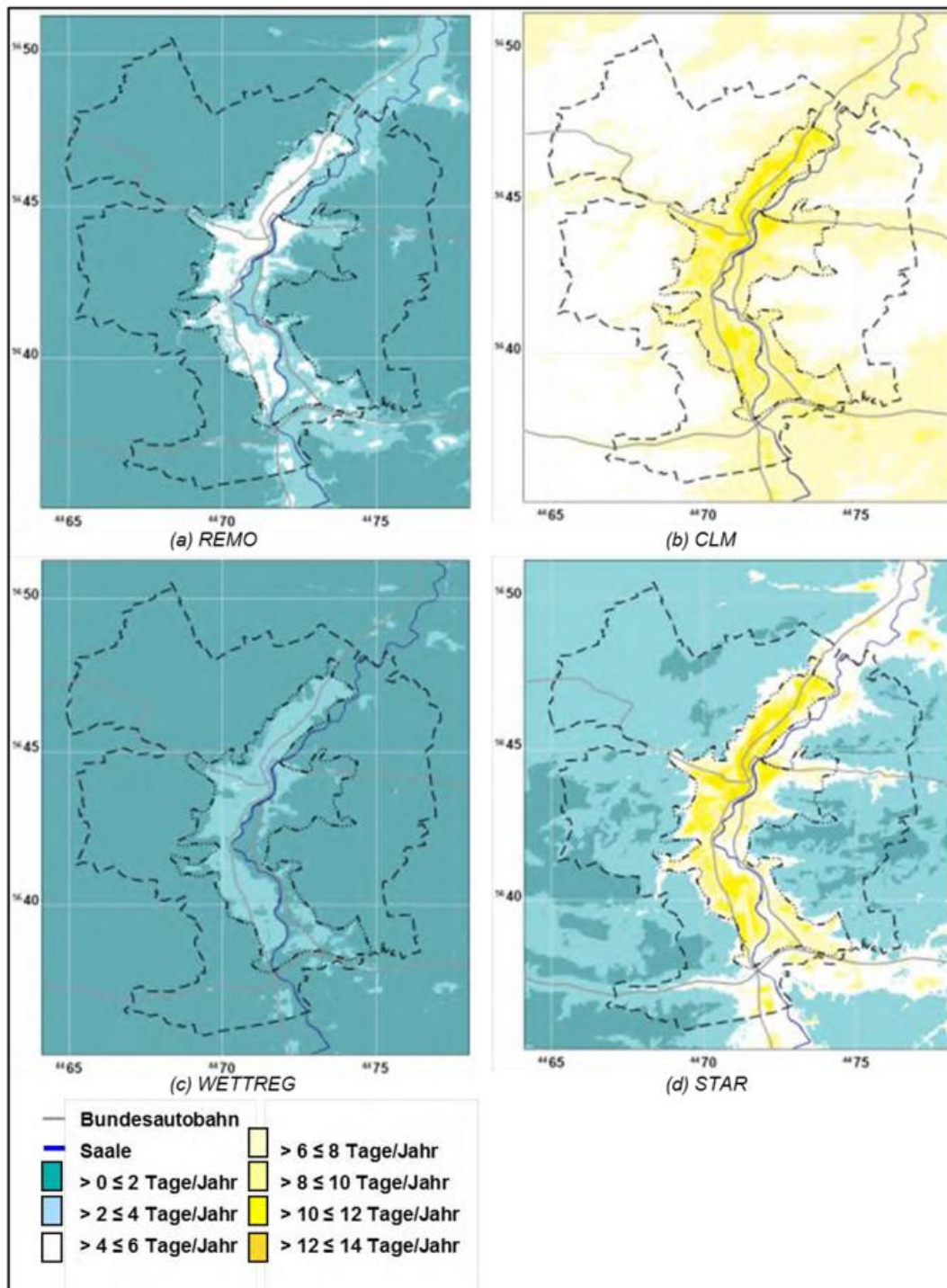


Abbildung 85: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der heißen Tage ($\Delta N_{T_{max} \geq 30}$) im inneren Modellgebiet als Differenz zwischen den Zeiträumen 2021/2050 (A1B) und 1971/2000 (C20) für REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d).

Für die CLM-Projektion ergibt sich mit 7,1 heißen Tagen pro Jahr das größte Konfidenzintervall auf dem 90%-Signifikanzniveau, und somit die größte Unsicherheit für $\Delta N_{T_{max} \geq 30}$ (Tabelle 23, Abbildung 83). Die Auswertung der Konfidenzintervalle für die einzelnen MUKLIMO_3-Landnutzungsklassen zeigt für STAR eine leichte Abhängigkeit des Änderungssignals von der Landnutzung (Abbildung 86). Insgesamt ergibt sich aber für alle vier Projektionen (aufgrund der starken Überlappung der 5%- und 95%-Whisker) auf dem 90%-Signifikanzniveau keine belastbare Abhängigkeit des Änderungssignals von der Bebauungsstruktur bzw. der Landnutzung. Der Unterschied in $\Delta N_{T_{max} \geq 30}$ zwischen bebauten und unbebauten Flächen wird demnach bis zur Mitte des Jahrhunderts bewahrt, jedoch nicht signifikant intensiviert.

Tabelle 23: Räumliches Mittel, Minimum und Maximum der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der heißen Tage ($\Delta N_{T_{max} \geq 30}$) zusammen mit dem räumlichen Mittel des Konfidenzintervalls auf dem 90%-Signifikanzniveau für REMO, CLM, WETTREG und STAR. Die Werte zeigen die Differenz zwischen den Zeiträumen 2021/2050 (A1B) und 1971/2000 (C20), gemittelt über das Innenstadtgebiet von Jena.

Antrieb	Mittel	Minimum	Maximum	Max. – Min.	90%-Konfidenzintervall
REMO	3,4	0,3	6,5	6,2	4,3
CLM	4,3	1,6	6,0	4,4	7,1
WETTREG	2,1	0,3	4,3	4,0	2,8
STAR	7,4	1,7	12,9	11,2	4,5

Der Bereich, der von den Vertrauensintervallen aller vier Projektionen umschlossen wird (jeweils niedrigster unterer Whisker und höchster oberer Whisker in Abbildung 83, zeigt die Unsicherheit der berechneten Änderungen in der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage und heißen Tage auf Grund der Verwendung unterschiedlicher regionaler Klimaprojektionen als Eingabe für die Quadermethode. Aus den Ergebnissen für die vier verwendeten Ensemble-Mitglieder kann geschlossen werden, dass die mittlere jährliche Anzahl der Sommertage in der Innenstadt von Jena bis 2021/2050 auf dem 90%-Signifikanzniveau um 2 bis 29 Tage zunehmen wird. Die mittlere jährliche Anzahl der heißen Tage wird um 1 bis 10 Tage ansteigen.

Werden die an der Station Jena/Sternwarte im Zeitraum 1971/2000 gemessene mittlere Anzahl der Sommertage (47,6 Tage pro Jahr) und die Anzahl der heißen Tage (10,8 Tage pro Jahr) zu Grunde gelegt, so ergibt sich hieraus für das Innenstadtgebiet von Jena, dass bis zur Mitte dieses Jahrhunderts bis zu etwa jeder zweite Tag des Sommerhalbjahres (April bis September) ein Sommertag und jeder neunte Tag ein heißer Tag sein kann.

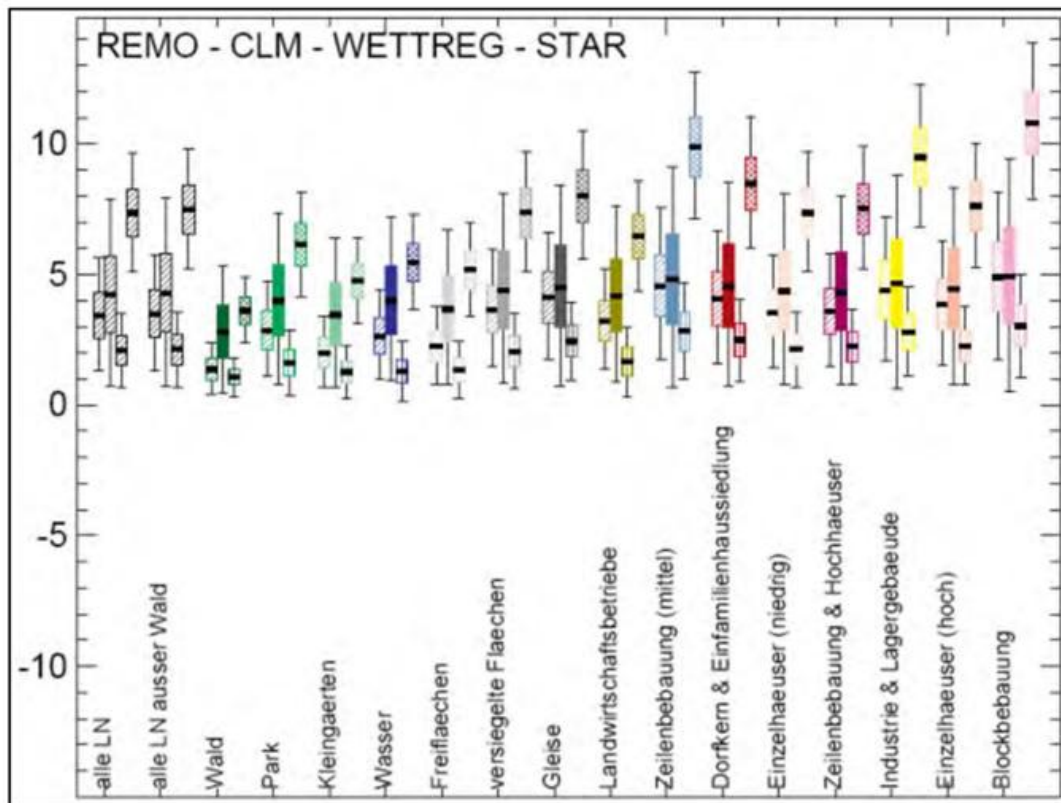


Abbildung 86: Box-Whisker-Plots für die Änderung der Anzahl der heißen Tage 2021/2050 (A1B) im Vergleich zu 1971/2000 (C20) gemittelt über die einzelnen Landnutzungsklassen im Innenstadtgebiet von Jena. Die Ergebnisse für REMO (schräg schraffiert), CLM (ausgefüllt), WETTREG (längs schraffiert) und STAR (kreuz schraffiert) sind für jede Landnutzung in dieser Reihenfolge dargestellt.

13.5.2 Auswirkung der geplanten Bebauung im Zeitraum 2021/2050

Abbildung 87 zeigt Karten der Änderung der Anzahl der Sommertage ($N_{T_{max} \geq 25}$) bis 2021/2050 mit geplanter Landnutzungsänderung im Vergleich zu 1971/2000 ohne Landnutzungsänderung für REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d). Die entsprechenden Karten für die Änderung der Anzahl der heißen Tage sind in Abbildung 88 dargestellt. Auf eine Darstellung der Ergebnisse für das Planspiel wird hier verzichtet, da diese auf der gesamtstädtischen Skala sehr ähnlich zu denen des Planzustandes sind (vgl. Kapitel 13.4.4).

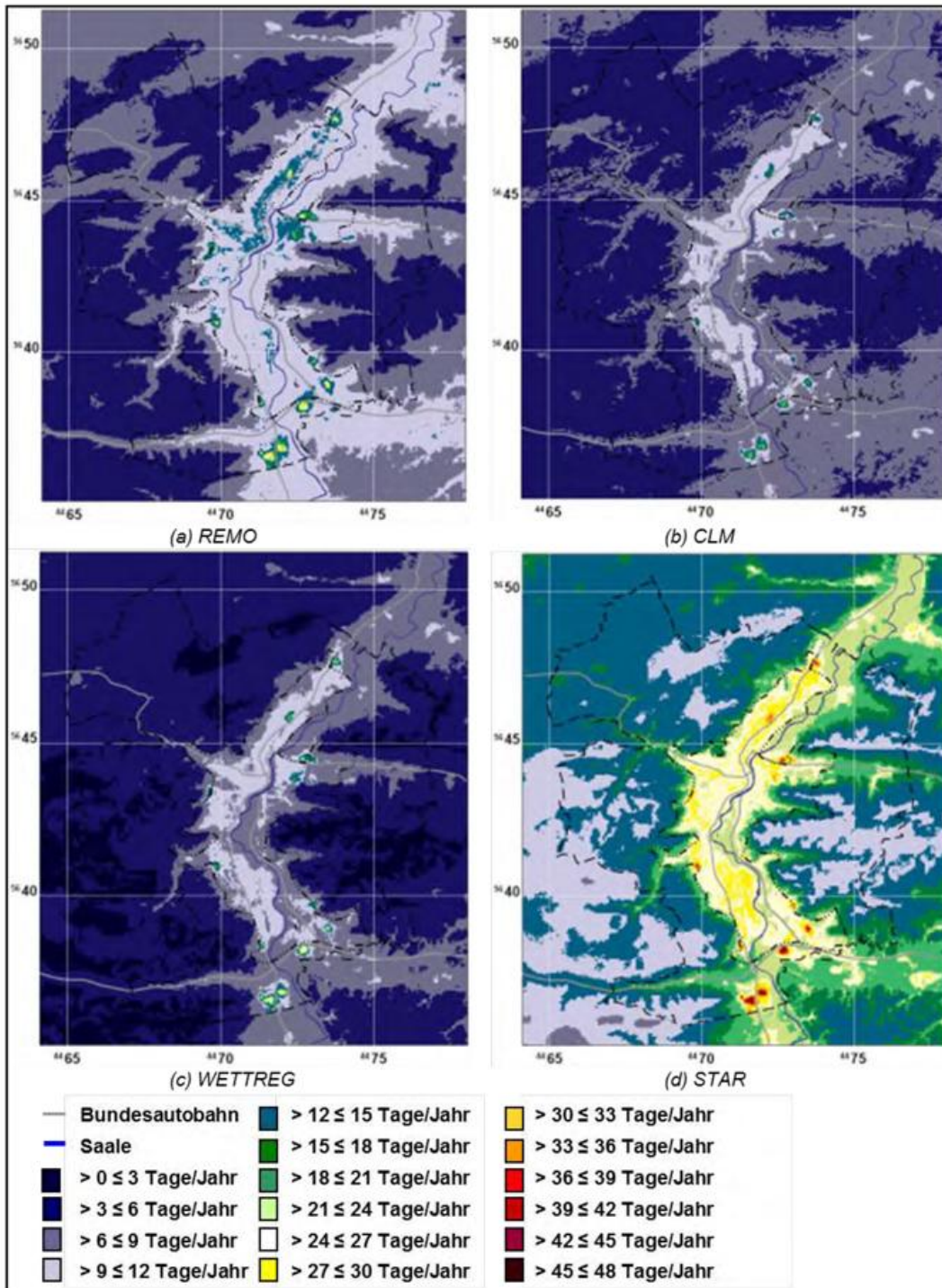


Abbildung 87: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage im inneren Modellgebiet auf Grund der geplanten Landnutzungsänderung und der Klimaänderung bis 2021/2050 (A1B) im Vergleich zu 1971/2000 (C20), für REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d).

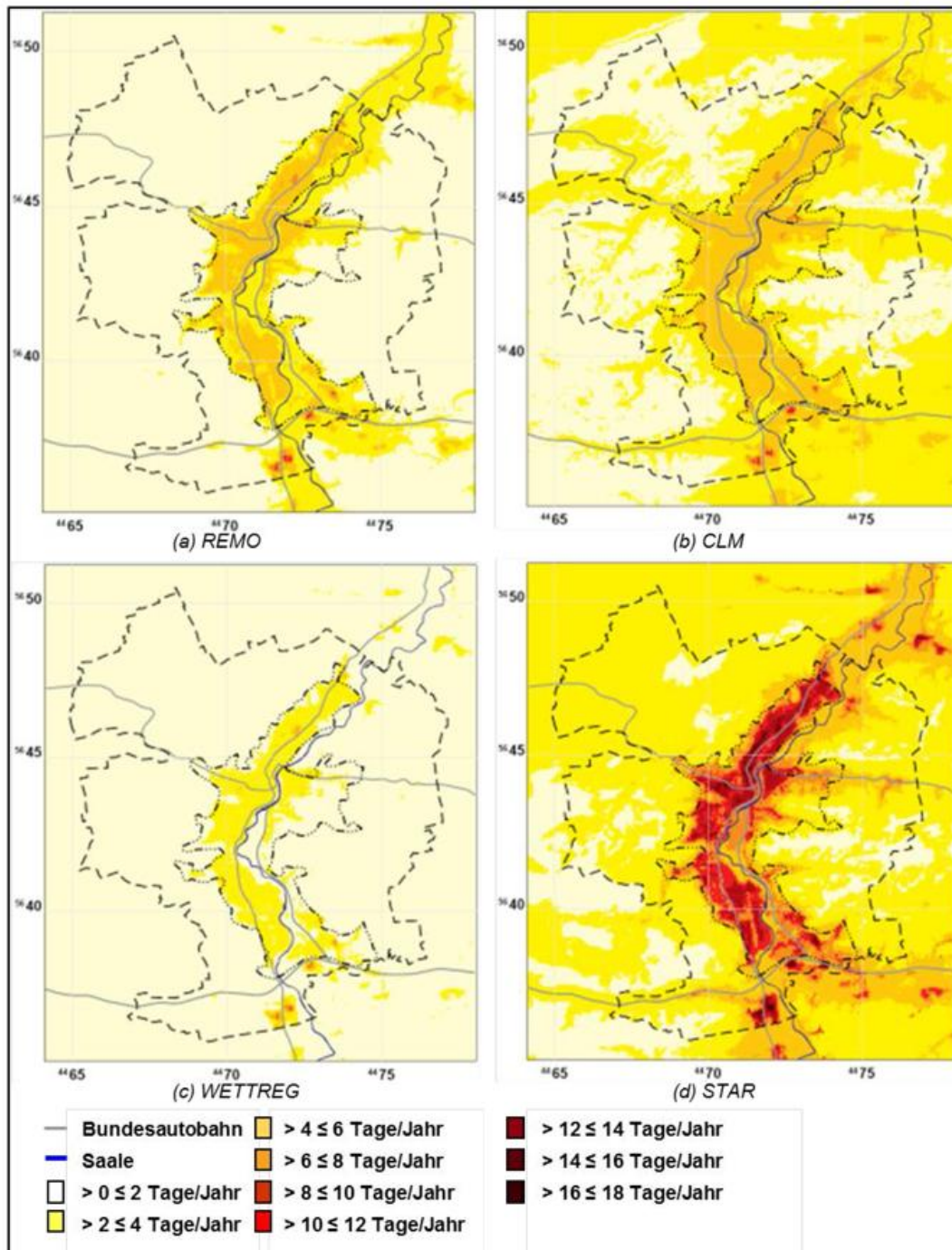


Abbildung 88: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der heißen Tage im inneren Modellgebiet auf Grund der geplanten Landnutzungsänderung und der Klimaänderung bis 2021/2050 (A1B) im Vergleich zu 1971/2000 (C20), für REMO (a), CLM (b), WETTREG (c) und STAR (d).

Es wird deutlich, dass in den Gebieten, in denen das Klimaänderungssignal durch Bebauungsverdichtung oder Versiegelung überlagert ist, die Änderungen der Anzahl der Sommertage und der Anzahl der heißen Tage am größten ist. Tabelle 24 zeigt die in Kombination von Klimawandel und geplanter Landnutzungsänderung maximal für das Innenstadtgebiet berechneten Werte von $\Delta N_{T_{max} \geq 25}$ und $\Delta N_{T_{max} \geq 30}$. Diese sind identisch mit den entsprechenden Maximalwerten für das Planspiel. Werden die Werte mit den nur durch den regionalen Klimawandel verursachten Maximalwerten von $\Delta N_{T_{max} \geq 25}$ und $\Delta N_{T_{max} \geq 30}$ (Tabelle 22 und Tabelle 23) verglichen, so zeigt sich, dass durch die zusätzliche Bebauungsverdichtung oder Versiegelung die maximale Änderung der Anzahl der

Sommertage um 70 % bis 160 % und die Anzahl der heißen Tage um 30 % bis 100 % zunehmen kann. Für die mittlere jährliche Anzahl der Sommertage sind also die Klimaänderungssignale ($\Delta N_{T_{\max} \geq 25}$) durch den regionalen Klimawandel bis Mitte dieses Jahrhunderts und durch Bebauungsverdichtung oder Versiegelung lokal etwa von gleicher Größenordnung. Bei der mittleren jährlichen Anzahl der heißen Tage ist das Klimaänderungssignal ($\Delta N_{T_{\max} \geq 30}$) durch den regionalen Klimawandel tendenziell etwas größer als das Änderungssignal durch die Landnutzungsänderungen.

Tabelle 24: Maximale Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ($\Delta N_{T_{\max} \geq 25}$) und der Anzahl der heißen Tage ($\Delta N_{T_{\max} \geq 30}$) für REMO, CLM, WETTREG und STAR. Die Werte zeigen die Differenz zwischen dem Zeitraum 2021/2050 (A1B) mit geplanter Landnutzungsänderung und 1971/2000 (C20) ohne Landnutzungsänderung im Innenstadtgebiet von Jena.

Antrieb	Max. $\Delta N_{T_{\max} \geq 25}$	Max. $\Delta N_{T_{\max} \geq 30}$
REMO	34,1	9,9
CLM	23,1	10,0
WETTREG	29,2	8,8
STAR	46,1	16,2

13.6 Vergleich der MUKLIMO_3-Simulationsergebnisse mit Ergebnissen aus Klimamessungen (Stationsmessungen und Profilmessfahrten) in Jena

Die MUKLIMO_3-Simulationsergebnisse spiegeln die Resultate der Messungen vor Ort (realisiert im Zeitraum vom 01. Mai bis 30. September 2011) zum Teil recht gut wider (vgl. DWD-Bericht 243, Kapitel 5).

Aus den Ergebnissen der Stations- und Profilmessungen (ebd. Kapitel 5.3.2 und 5.3.3) geht hervor, dass insbesondere die stark überbauten innerstädtischen Bereiche thermisch belastet sind. An der Innenstadtstation Jena/Sternwarte traten im Messzeitraum die meisten Sommertage und heißen Tage auf. Frosttage wurden im Gegensatz zum unbebauten, nahezu höhengleichen Außenbereich (Station Gembdental) in der Innenstadt nicht registriert. Ferner wurden die absolut höchsten Temperaturen in der Innenstadt (Station Sternwarte), die absolut tiefsten im annähernd höhengleichen, unbebauten Außenbereich gemessen (Station Gembdental). Dies passt sehr gut zu den Ergebnissen der MUKLIMO_3-Simulationen, bei denen die höchste Anzahl an Sommertagen und heißen Tagen bei hoher Bebauungsdichte und hohem Versiegelungsgrad auftritt – zum einen bei Blockbebauung und Zeilenbebauung insbesondere in der Innenstadt von Jena, zum anderen aber auch in Industrie- und Gewerbegebieten. Die geringste Anzahl an Sommertagen und heißen Tagen wurde hingegen für die Landnutzungsklasse Wald simuliert. Diese für sommerliche Verhältnisse typischen Unterschiede zwischen den Temperaturniveaus verschiedener Landnutzungen werden auch von den Ergebnissen der Profilmessfahrten belegt.

Anhand der temporären Messdaten ließ sich das Phänomen der städtischen Wärmeinsel nachweisen. Dieses trat erwartungsgemäß tagsüber schwächer in Erscheinung als nachts. Die Lufttemperaturen zwischen dem Umland (Station Gembdental) und der Innenstadt (Station Sternwarte) zeigten während einer Strahlungswetterlage eine Differenz von ca. 1

bis 2 K tagsüber und ca. 3 bis 4 K für die Nachtstunden. Die Analyse der temporären Stationsdaten ergab weiterhin, dass die Innenstadt (Station Sternwarte) bezogen auf den gesamten Zeitraum der Messkampagne im Schnitt um ca. 1,3 K wärmer war als das freie, weniger stark oder unbebaute – quasi höhengleiche – Umland (Station Gembdental).

Auch die Ergebnisse der Profilmessfahrten bestätigten stadtstrukturbedingte Temperaturunterschiede zwischen der Jenaer (Innen-) Stadt und ihrem quasi höhengleichen, locker bebauten und unbebauten Umland. Die differenzierte Wirkung verschiedenartig genutzter Flächen und der Einfluss der Orografie auf die Ausprägung des Temperaturmilieus werden anhand der Messwerte deutlich. Niederungen entlang der Saale (z. B. Auenflächen im Norden und Süden der Stadt Jena, das Gembdental), aber auch schattige Hanglagen (z. B. das Ammerbachtal und Mühlthal) zeigten sich insbesondere während der Nachtfahrten (früh und abends) als deutlich kühlere Flächen im Vergleich zur dicht bebauten, etwa gleich hoch gelegenen Innenstadt. Die Differenzen lagen hier bei ca. 2 bis 4 K. Tagsüber war dieser Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland mit nur ca. 1 bis 2 K erwartungsgemäß weniger stark ausgeprägt.

13.7 Schlussbemerkungen

Mit dem vorliegenden Beitrag (Anlage 2 zum DWD-Bericht 243) des Deutschen Wetterdienstes zum ExWoSt-Modellvorhaben JenKAS verfügt die Stadt Jena an der Saale nun erstmals über flächenhafte, lokale Daten zur Änderung der sommerlichen Temperaturverhältnisse bis zum Jahr 2050. Informationen zur nächtlichen Kaltluftflusssituation für den Ist- und Planzustand sind Anlage 1, Hinweise zu temporär und stationär erhobenen und ausgewerteten Klimadaten sowie die Zusammenschau der Ergebnisse aus den Einzelberichten sind dem Bericht „Klimauntersuchungen in Jena“ zu entnehmen. Die Daten können genutzt werden, um eine dem Klimawandel gerechte Stadtplanung zu entwickeln und somit negative Folgen für die Gesundheit und einen erhöhten Energiebedarf für die Gebäudekühlung nach Möglichkeit zu vermeiden. Mit dem vom Deutschen Wetterdienst entwickelten Verfahren konnten die klimatischen Auswirkungen geplanter und hypothetischer Bauvorhaben und Grünflächen vorab abgeschätzt werden. Allerdings ersetzen die in diesem Beitrag getroffenen Aussagen und dargestellten Resultate kein Spezialgutachten auf der Ebene des Bebauungsplans. Sie sind vielmehr als übergeordneter Beitrag bzw. als eine gesamtstädtische Klimaanalyse zu verstehen.

Bis zum Ende des Jahrhunderts zeigen die globalen und regionalen Klimaprojektionen eine Fortsetzung der Klimaerwärmung (Abbildung 66), die auch mit einer weiteren Zunahme der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen und heißen Tagen verbunden ist. Obwohl die Unsicherheit des zu erwartenden Klimawandels bis 2100 größer ist als bis Mitte des Jahrhunderts, sollte die Tendenz der fortschreitenden Erwärmung bei der Entwicklung und Festlegung von Anpassungsmaßnahmen möglichst berücksichtigt werden.

Berichte des Deutschen Wetterdienstes

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