

Stadtklimatische Untersuchungen der sommerlichen Temperaturverhältnisse und des Tagesgangs des Regionalwindes („Alpines Pumpen“) in München

von

Gudrun Mühlbacher, Meinolf Koßmann, Katrin Sedlmeier,
Kristina Winderlich



Berichte des Deutschen Wetterdienstes

252

**Stadtklimatische Untersuchungen der
sommerlichen Temperaturverhältnisse
und des Tagesgangs des Regionalwindes
(„Alpines Pumpen“) in München**

von

Gudrun Mühlbacher, Meinolf Koßmann, Katrin Sedlmeier,
Kristina Winderlich

Zitationsvorschlag:

Mühlbacher, G., et al.: Stadtklimatische Untersuchungen der sommerlichen Temperaturverhältnisse und des Tagesgangs des Regionalwindes („Alpines Pumpen“) in München - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 2020, 100 Seiten. (Berichte des Deutschen Wetterdienstes; 252)

„Im Rahmen einer Kooperation mit der Landeshauptstadt München, vertreten durch das Referat für Gesundheit und Umwelt, entstanden.“

Titelfoto: Stadt München mit Alpenpanorama im Hintergrund. Bildnachweis: Michael Nagy / Presseamt München

ISSN: 2194-5969 (Online)

ISBN: 978-3-88148-519-7 (Online)

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: Petra Fuchs und Dr. Heike Noppel

Herausgeber und Verlag:

Deutscher Wetterdienst
Selbstverlag
Bildungszentrum
Am DFS-Campus 4
63225 Langen
bildungszentrum@dwd.de
www.dwd.de

Korrespondenzadresse:

Deutscher Wetterdienst
Gudrun Mühlbacher
Abteilung Klima- u. Umweltberatung
Helene-Weber-Allee 21
80637 München
Gudrun.Muehlbacher@dwd.de

Autoren:

Gudrun Mühlbacher,
Dr. Meinolf Koßmann,
Dr. Katrin Sedlmeier,
Dr. Kristina Winderlich,
Deutscher Wetterdienst

Kapitel

Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung wurde im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung zwischen dem Deutschen Wetterdienst (DWD) und der Landeshauptstadt München, vertreten durch das Referat für Gesundheit und Umwelt (RGU), erstellt. Ziel der Kooperation war es, für München spezifische, wissenschaftlich fundierte Aussagen zum Stadtklima, insbesondere zum lokalen Windsystem, das auch als sogenanntes „Alpines Pumpen“ bekannt ist, sowie zu den Temperaturveränderungen durch den Klimawandel, zu erhalten. Basierend auf Messungen und Computersimulationen wurden zum einen die heutige und in Zukunft zu erwartende Wärmebelastung im Stadtgebiet analysiert. Zum anderen wurde das regionale Gebirgswindsystem „Alpines Pumpen“ und dessen Auswirkung auf die Temperaturverteilung im Stadtgebiet untersucht.

Das Stadtklima in München und dessen erwartete zukünftige Entwicklung mit Fokus auf die Wärmebelastung in der Stadt

Der Klimawandel findet in München bereits statt. Die langjährige Zeitreihe der DWD-Station München-Stadt zeigt seit Messbeginn 1955 bis heute eine deutliche Zunahme der mittleren Temperatur um etwa 0,31 °C/Dekade. Von den fünf wärmsten Jahren liegen vier in diesem Jahrhundert. Dieser Trend wird auch in der Anzahl verschiedener Kenntage, d.h. Tage an denen das Minimum/Maximum der Temperatur einen bestimmten Schwellenwert unter- bzw. überschreitet sichtbar. Die „warmen“ Kenntage wie Sommertage (mit einer Höchsttemperatur von mindestens 25 °C) und heiße Tage (mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 °C) haben demnach in dem oben genannten Zeitraum zugenommen, die „kalten“ Kenntage wie Frosttage (mit einem Minimum der Lufttemperatur unter 0 °C) und Eistage (mit einem Maximum der Lufttemperatur unter 0 °C) zeigen eine abnehmende Tendenz. Die Temperaturzeitreihen der Station München-Stadt belegen im Vergleich zum Umland eine deutliche Ausprägung des städtischen Wärmeinseleffekts, d.h. höhere Temperaturen in der Stadt als im Umland, vor allem nachts. Zudem wurde anhand von Profilmessfahrten eine große Temperaturvariabilität innerhalb der Stadt mit Temperaturunterschieden zwischen kühleren Parkanlagen und dicht bebautem Siedlungsgebiet gemessen.

Um eine detailliertere räumliche Betrachtung und die zukünftigen Änderungen der sommerlichen Temperaturverhältnisse zu untersuchen wurde das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 und die im DWD entwickelte Quadermethode benutzt, um die mittlere jährliche Anzahl von Sommertagen in München mit einer räumlichen Auflösung von 100 m zu berechnen. Die Kennzahlen wurden für einen Referenzzeitraum (1971-2000) sowie für die Zukunft bis 2100 mit dem Auswerteschwerpunkt auf der Mitte des Jahrhunderts (2041-2070) berechnet. Für die zukünftige Entwicklung wurde ein Ensemble von regionalen Klimaszenarien als Eingangsdaten verwendet, welches auf dem Emissionsszenario A1B beruht.

Die berechnete Anzahl von Sommertagen im Referenzzeitraum ist stark abhängig von der Landnutzungsclassen und der Bebauungsdichte. Die niedrigste Anzahl von Sommertagen findet man in Waldgebieten im Umland und über Wasser (im Mittel < 20 Tage pro Jahr), die höchste in dicht bebauten Gebieten in der Innenstadt (im Mittel bis zu 48 Tage pro Jahr). Die Modellsimulationen für den Zukunftszeitraum zeigen alle eine Zunahme der Anzahl von Sommertagen, dabei gilt: je entfernter der Zeitraum in der Zukunft, desto stärker ist die Zunahme. Im günstigen Fall (15. Perzentil) liegt diese Zunahme zwischen 1971-2000 und 2041-2070 bei 35-40 % was einer Zunahme von 10-18 Tagen entspricht. Im ungünstigen Fall (85. Perzentil) ist in Teilen des

Stadtgebiets mit einer Verdopplung der Sommertage zwischen den beiden Zeiträumen zu rechnen (Zunahme um 65-100% was einer absoluten Zunahme von 30-32 Tagen entspricht).

Alpines Pumpen und dessen Auswirkungen auf die Temperaturverteilung in der Stadt München

Frühere Studien legen nahe, dass die Durchlüftung der Stadt München und damit die städtische Temperaturverteilung durch ein thermisches Windsystem, auch als Alpines Pumpen bekannt, beeinflusst wird. Dieses thermische Windsystem sorgt tagsüber für die Zufuhr von etwas kühlerer Umgebungsluft in die Stadt von Norden her und insbesondere nachts für eine kalte oder kühle Luftströmung vom Gebirge ins Alpenvorland, wodurch eine Abschwächung der nächtlichen Wärmebelastung in München zu erwarten ist. Mittels Messungen und Modellrechnungen wurde das Auftreten dieses thermischen Windsystems sowie dessen Einfluss auf die Durchlüftung der Stadt München vertieft untersucht.

Die mittlere Anzahl von Tagen mit günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen liegt je nach Kriterium zwischen 20 und 60 Tagen pro Jahr. Die Windfelder an diesen Tagen zeigen sowohl in den Messungen als auch in den Modellrechnungen den zu erwartenden täglichen Zyklus des Alpines Pumpens. Durch die zusätzlichen temporären Windmessungen, die im Rahmen des Kooperationsprojektes zwischen 2013 und 2015 durchgeführt wurden, konnte gezeigt werden, dass das Alpine Pumpen bis in die Grünzüge südlich von München deutlich ausgeprägt ist. Des Weiteren ist ein deutlicher Unterschied der Windverhältnisse an Tagen mit günstigen und ungünstigen Bedingungen für Alpines Pumpen erkennbar. In einer Fallstudie mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 wurde ferner ein Einfluss des regionalen Zirkulationsmusters auf die Temperaturverhältnisse in der Landeshauptstadt München gefunden. Vor allem nachts und vormittags wird das Stadtgebiet durch die herangeführte kühlere Luft aus dem Umland durchlüftet. Darüber hinaus zeigen die Modellergebnisse eine räumliche Verlagerung der maximalen Wärmeinsel in München im Tagesverlauf.

Stadtklimatische Ergebnisse für die Landeshauptstadt München

Die Untersuchung zeigt, dass es bereits Veränderungen durch den Klimawandel gibt und weitere Veränderungen zu erwarten sind. Die vorliegenden Ergebnisse liefern eine wichtige Grundlage für die Arbeiten zur Anpassung an den Klimawandel der Landeshauptstadt München, wie der Fortschreibung des „Maßnahmenkonzepts Anpassung an den Klimawandel in der Landeshauptstadt München“.

Der vorliegende Bericht ermöglicht grundsätzliche Aussagen zum Stadtklima und zum Einfluss des Alpines Pumpens auf das Stadtgebiet und ergänzt die bestehenden stadtklimatischen Grundlagen auf gesamtstädtischer Ebene der Landeshauptstadt München wie die Klimafunktionskarte. Die Ergebnisse lassen jedoch keine Aussagen auf Gebäudeebene zu.

Durch die Kombination aus Messungen und Computersimulationen wird bestätigt, dass das Alpine Pumpen im Stadtgebiet München ein häufig auftretendes Phänomen im Untersuchungsgebiet ist. Die Auswertungen liefern Hinweise, dass es einen wichtigen Beitrag zur Durchlüftung von verschiedenen Bereichen des Stadtgebiets leistet. Die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen somit die Bedeutung funktionsfähiger Luftaustauschbahnen vor allem im Hinblick auf die durch den Klimawandel steigende Wärmebelastung in der Stadt.

Summary

The present study was prepared within the framework of a cooperation agreement between the German Weather Service (DWD) and the City of Munich, represented by the Department of Health and Environment (RGU). The aim of the cooperation was to obtain specific information on the urban climate in Munich and the expected temperature changes due to climate change. Further focus was laid on the influence of a local wind system, also known as “Alpine pumping”, on the urban climate. Based on measurements and computer simulations, the current and future heat stress in the urban area was assessed. Furthermore, the regional wind system Alpine Pumping and its effect on the temperature distribution in the city area were investigated.

The urban climate in Munich and its expected future development with a focus on the heat load in the city

Climate change is already taking place in Munich. The long-term time series of the DWD Station München-Stadt shows a significant increase of the mean temperature since the beginning of the measurements in 1955 by about 0,31°C/decade. Four of the five warmest years were recorded in this century. This also has an effect on the number of different indices derived from the temperature time series, i.e. days on which the minimum/maximum temperature falls below or exceeds a certain threshold value. The "warm" indices such as summer days (with a maximum temperature of at least 25 °C) and hot days (with a maximum temperature of at least 30 °C) have increased between 1955 and 2018, the "cold" indices such as frost days (with a minimum air temperature below 0 °C) and ice days (with a maximum air temperature below 0 °C) show a decreasing tendency. The heat island effect becomes apparent when comparing the temperature time series of the station München-Stadt to Stations in the vicinity of the city. Temperatures in the city are higher compared to the surrounding areas, especially at night. In addition, a large temperature variability within the city was measured using profile measurements with temperature differences between cooler parks and densely built-up residential areas.

In order to obtain a more detailed spatial distribution of temperatures within the city and to calculate the future changes of the temperature conditions in summer, the urban climate model MUKKLIMO_3 and the cuboid method developed in the DWD were used to calculate the mean annual number of summer days in Munich with a spatial resolution of 100 m. The index values were calculated for a reference period (1971-2000) as well as for the future until 2100 with the evaluation focus on the middle of the century (2041-2070). For the future development, an ensemble of regional climate scenarios was used as input data based on the A1B emission scenario.

The calculated number of summer days in the reference period is strongly dependent on the land use class and building density. The lowest number of summer days is found in forest areas in the surrounding countryside and above water (on average < 20 days per year), the highest in densely built-up areas in the inner city (on average up to 48 days per year). The model simulations for the future period all show an increase in the number of summer days; the more distant the period in the future, the stronger the increase. In the favourable case (15th percentile), this increase between 1971-2000 and 2041-2070 is 35-40 %, which corresponds to an increase between 10-18 days. In the worst case (85th percentile), in parts of the urban area a doubling of the summer days between the two periods can be expected (increase of 65-100% which corresponds to an absolute increase of 30-32 days).

Alpine pumping and its effects on the temperature distribution in the city of Munich

Earlier studies suggest that the ventilation of the city of Munich and thus the urban temperature distribution is influenced by a thermal wind system, also known as Alpine pumping. This thermal wind system provides a supply of cooler air into the city from the north and, especially at night, for a cold or cool air flow at night from the mountains into the Alpine foothills. This is expected to reduce the nightly heat load in the city of Munich. By means of measurements and model calculations, the occurrence of this thermal wind system and its influence on the ventilation of the city of Munich were investigated in depth.

The average number of days with favourable conditions for Alpine pumping is between 20 and 60 days per year, depending on the criterion. The wind fields on these days show the expected daily cycle of the Alpine pumping both in the measurements and in the model calculations. Through additional temporary wind measurements carried out within the framework of the cooperation project between 2013 and 2015 an influence of Alpine pumping in the green strips south of Munich was measured. Furthermore, a clear difference in wind conditions can be seen on days with favourable conditions and unfavourable conditions for Alpine pumping. In a case study with the urban climate model MUKKLIMO_3, an influence of the regional circulation pattern on the temperature conditions in the city of Munich was also found. Especially at night and in the morning hours, the city area is ventilated by the cooler air from the surroundings. Furthermore, the model results show a shift of the maximum heat island in Munich during the course of the day.

Inference of the results for the city of Munich

The study shows that climate change has already increased the heat load in the city of Munich and that further changes are to be expected. The available results provide an important basis for the work on adaptation to climate change in Munich, such as the continuation of the "Adaptation to climate change concept in the state capital of Munich".

The present report provides information on the urban climate and the influence of Alpine pumping on the urban area and supplements the existing urban climate information at the city level such as the climate function map. However, the results do not allow any statements to be made at the level of individual buildings.

The combination of measurements and computer simulations confirms that Alpine Pumping is a frequent phenomenon in the study area and the evaluations provide indications that it makes an important contribution to the natural ventilation of various areas of the city. The available results thus illustrate the importance of functional air exchange lanes, especially in view of the increasing heat load in the city caused by climate change.

Inhalt

Zusammenfassung	3
Summary	5
1 Einleitung	9
2 Hintergrund	11
2.1 Stadtklima und seine Bedeutung für städtische Ballungsräume	11
2.2 München und das Alpenvorland – Beschreibung des Untersuchungsgebietes	12
2.3 Alpines Pumpen	14
2.4 Ergebnisse bisheriger Untersuchungen in München	15
3 Methodik	18
3.1 Vorgehen im Kooperationsprojekt	18
3.2 Das Messprogramm	19
3.3 Das Regionalklimamodell CCLM	19
3.4 Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3	21
3.4.1 Geländehöhedaten und Landnutzungsdaten	22
3.4.2 MUKLIMO_3-Modellgebiet und Auswerteggebiet	23
3.4.3 Vorgabe des Regionalwinds	24
4 Ergebnisse der langjährigen Klimamessungen	25
4.1 Lufttemperatur	25
4.2 Niederschlag	33
4.3 Zusammenfassung	34
5 Ergebnisse der temporären Messungen zu stadtklimatischen Besonderheiten	36
5.1 Temperatur-Profilmessfahrten	36
5.1.1 Routen 1 und 2: Ost-West (München-Riem - Schloss Nymphenburg):	40
5.1.2 Route 3: Nord-Süd (Theresienwiese - Bahnhof Solln):	41
5.1.3 Route 4: West-Ost (äußerster südlicher Stadtrand):	42
5.1.4 Zusammenfassung	45
5.2 Temporäre Windmessungen	46
5.2.1 Identifikation der Tage mit Alpinem Pumpen aus Stationsdaten	46
5.2.2 Ergebnisse der Windmessungen zu Alpinem Pumpen	48
5.2.3 Temperaturverhalten an Tagen mit Alpinem Pumpen	54
5.2.4 Zusammenfassung	55

6	Ergebnisse der Modellierungen	57
6.1	MUKLIMO_3-Stadtklimaprojektion	57
6.1.1	Quadermethode	57
6.1.2	Jährliche Anzahl an Sommertagen 1971-2000	58
6.1.3	Änderung der mittleren, jährlichen Anzahl an Sommertagen bis 2041-2070	60
6.1.4	Zusammenfassung	64
6.2	CCLM-Ergebnisse zur regionalen Klimatologie des Alpinen Pumpens	65
6.2.1	Identifikation der Tage mit Alpinem Pumpens	65
6.2.2	Ergebnisse – Klimatologie-Analyse der Tage Alpinen Pumpens	68
6.2.3	Zusammenfassung	73
6.3	MUKLIMO_3-Fallstudie zum Alpinen Pumpens in München	74
6.3.1	Tageszeitlich variierender Regionalwind	74
6.3.2	Ergebnisse der idealisierten Fallstudie	75
6.3.3	Zusammenfassung	77
7	Zusammenfassung der Ergebnisse aus Messungen und Modellierungen	79
8	Schlussbemerkungen	82
	Danksagung	83
	Abbildungsverzeichnis	84
	Tabellenverzeichnis	88
	Literatur	89
	Anhang	93
1.	Tabellen	93
2.	Trendberechnung	94

1 Einleitung

Nach heutigem Kenntnisstand wird sich die seit Ende des 19. Jahrhunderts beobachtete Klimaänderung in Mitteleuropa bis zum Ende dieses Jahrhunderts fortsetzen. Wegen des hohen und stetig steigenden Bevölkerungsanteils, der in Städten lebt und aufgrund des städtischen Wärmeinseleffekts, sind Städte – und somit auch die Landeshauptstadt München – von den zukünftig zu erwartenden Gesundheitsrisiken durch Wärmebelastung besonders betroffen (z.B. KUTTLER, 2009). Im Stadtgebiet von München leben derzeit 1,55 Millionen Menschen (Stand Juli 2019), im Ballungsraum München bereits mehr als 2,7 Millionen Menschen. München ist eine der am schnellsten wachsenden Städte Deutschlands. In der Landeshauptstadt leben derzeit knapp 5.000 Einwohner je Quadratkilometer, München hat damit die höchste Bevölkerungsdichte aller deutschen Großstädte. Die großflächig stark verdichtete Bebauung und der partiell hohe Versiegelungsgrad innerhalb der Stadt führen zu einem ausgeprägten städtischen Wärmeinseleffekt, welcher im Zuge der erwarteten Klimaänderungen gegenüber dem weniger bebauten Umland zu besonders starker Hitzebelastung führen wird.

Um sich frühzeitig auf die bereits eingetretenen und die zu erwartenden Veränderungen durch den Klimawandel einzustellen und um den prognostizierten Stadtentwicklungen Rechnung zu tragen, hat die Landeshauptstadt München mit dem Deutschen Wetterdienst im April 2012 eine Kooperationsvereinbarung getroffen. **Das Ziel dieser Vereinbarung ist, wissenschaftlich fundierte Grundlagen für die Arbeiten zur Anpassung an den Klimawandel und eine klimaresiliente Stadtplanung in München zu schaffen.** Dazu wurden zwei Arbeitsschwerpunkte formuliert:

I. Bereitstellung von Daten und Informationen zum Stadtklima und zu dessen erwarteter zukünftiger Entwicklung mit Fokus auf die Wärmebelastung in der Stadt

Hierzu wurden neben den langjährigen Messreihen des DWD zusätzliche Temperatur-Profilmessfahrten im Stadtgebiet sowie hochaufgelöste Computersimulationen mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 für die Vergangenheit und die Zukunft ausgewertet. Diese erlauben in Ergänzung zu den langen und zeitlich hoch aufgelösten Messreihen an Klimastationen räumlich detaillierte Aussagen über die momentane und zukünftige Wärmebelastung in der Stadt.

II. Verbesserung des Verständnisses über das thermische Windsystem des Alpinen Pumpens und dessen Auswirkungen auf die Temperaturverteilung in der Stadt München

In Zusammenhang mit der Wärmebelastung in der Stadt ist ein regionales Gebirgswindsystem, das auch als Alpines Pumpen bekannt ist, von zusätzlichem Interesse. Frühere Studien legen nahe, dass dieses Windsystem einen Einfluss auf die Durchlüftung und damit auf die Temperaturverteilung innerhalb der Stadt hat, da es kühlere Umgebungsluft in das Stadtgebiet bringt.

Im Kooperationsprojekt wurde durch temporäre Windmessungen südlich von München das Auftreten des Alpinen Pumpens detailliert untersucht. Darüber hinaus wurde das regionale Gebirgswindsystem mit dem regionalen Klimamodell COSMO-CLM für einen 20-jährigen Klimazeitraum simuliert und die daraus analysierten Charakteristika des Alpinen Pumpens als Antriebsdaten für das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 genutzt. Dadurch konnte der Einfluss des regionalen Windsystems auf die lokale Temperaturverteilung innerhalb des Stadtgebiets simuliert werden. Im Rahmen des Kooperationsprojektes hat

der Deutsche Wetterdienst seine bereits entwickelten Modellierungsverfahren durch neue Bausteine erweitert, um so den Einfluss des Alpines Pumpens auf das Stadtklima von München erfassen zu können.

Dieser Bericht fasst die wesentlichen Ergebnisse der Kooperation zusammen. Kapitel 2 liefert einige Hintergrundinformationen zum Untersuchungsgebiet sowie zum Phänomen „Alpines Pumpen“ und gibt einen Überblick über bisherige Untersuchungen in München. In Kapitel 3 wird die Methodik und das Vorgehen im Kooperationsprojekt erläutert. Eine Zusammenfassung des momentanen Klimazustands in München anhand von langjährigen Messreihen findet sich in Kapitel 4. Darauf folgen die Auswertungen von temporären Messungen die im Rahmen des Kooperationsprojektes durchgeführt wurden in Kapitel 5 sowie die Modellergebnisse der Stadtklimamodellierung und der regionalen Klimamodellierungen in Kapitel 6. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der Messungen und Modellierungen zusammengefasst.

2 Hintergrund

2.1 Stadtklima und seine Bedeutung für städtische Ballungsräume

Das Klima einer Stadt unterscheidet sich wesentlich vom Klima im Umland bzw. in ländlichen Regionen. Vergleichende Untersuchungen meteorologischer Parameter zwischen urbanen und ländlichen Gebieten gibt es bereits seit längerer Zeit (z.B. HOWARD 1833; KRATZER 1937; OKE 1983). Auch in deutschen Städten wird dies seit mehreren Jahrzehnten untersucht, z.B. Stuttgart, München, Frankfurt, Freiburg, Essen. Im Zuge der erwarteten und bereits beobachteten Veränderungen durch den Klimawandel ist das Stadtklima und seine Besonderheiten ein verstärkter Forschungsschwerpunkt geworden (z.B. BRÜNDL 1987; KUTTLER 2009; FRÜH 2011a; FRÜH 2011b). Laut Definition der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) ist Stadtklima das „durch Bebauung und Emission gegenüber dem Umland veränderte Lokalklima“. Dies betrifft neben den meteorologischen Parametern Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Strahlung und Wind, auch Immissionsgrößen wie Luftqualität und Lärm.

Ein Hauptmerkmal ist dabei die Ausbildung einer **städtischen Wärmeinsel** (schematisch dargestellt in Abb. 2.1). Die Lufttemperatur in Städten ist stark von der Bebauungsdichte, dem Versiegelungsgrad, der Gebäudestruktur (Geometrie, thermische Eigenschaften der Bausubstanz, Strahlungseigenschaften von Oberflächen) und der anthropogenen Wärmefreisetzung (Hausbrand, Verkehr, Industrie) geprägt. Aufgrund der dichten Bebauung, des Energieumsatzes durch Verkehr, Wirtschaft und Haushalte ist die Temperatur in der Stadt gegenüber dem Umland deutlich erhöht. In deutschen Städten ist die Lufttemperatur im Jahresmittel um etwa 0,5 bis 2 °C (Grad Celsius) höher als in ländlichen Regionen. Bei Auftreten bestimmter Wetterlagen ist dieser Effekt noch deutlicher ausgeprägt. So kann in Extremfällen die Temperaturdifferenz über 10 K betragen. Dies tritt vor allem während sonnenscheinreicher, windschwacher Wärmeperioden auf. Die Auswirkungen des städtischen Wärmeinseleffekts sind vielfältig. So ist in den Sommermonaten eine erhöhte Gefahr von Hitzestress für die Stadtbewohner zu verzeichnen. Davon sind besonders ältere Menschen, Menschen mit Vorerkrankungen oder Kleinkinder betroffen.

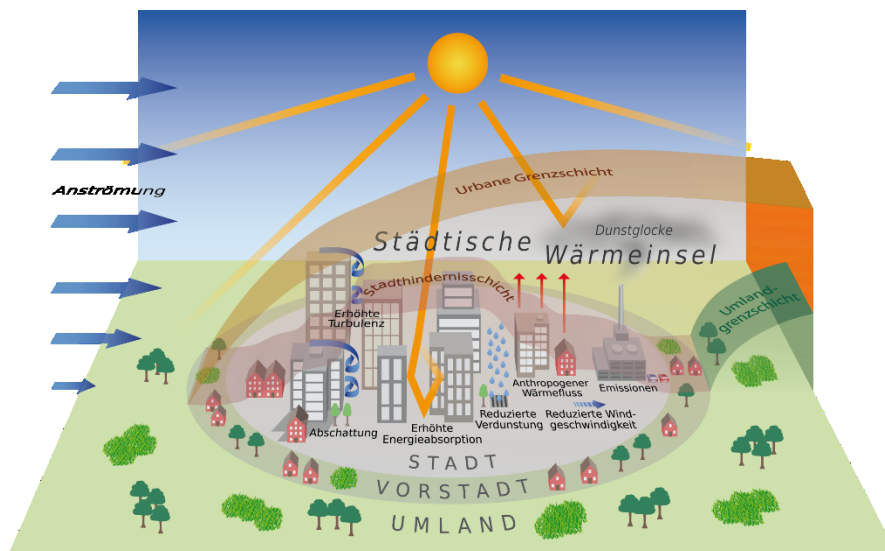


Abb. 2.1: Schematische Darstellung der städtischen Wärmeinsel.

In Kombination mit der globalen Erwärmung infolge des Klimawandels muss somit in den kommenden Jahrzehnten mit besonders starken Wärmebelastungen in den städtischen Ballungsräumen gerechnet werden. Bereits vorliegende Klimauntersuchungen lassen demnach Klimaänderungen erwarten, die sich in den städtischen Ballungsräumen zukünftig deutlich stärker auswirken als im Umland.

2.2 München und das Alpenvorland – Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Die bayerische Landeshauptstadt München liegt im Alpenvorland, etwa 50 km von den Alpen entfernt, und ist der größte Verdichtungsraum Bayerns. Die Landeshauptstadt des Freistaats Bayern mit 1,55 Millionen Einwohnern (Stand: Juli 2019) erstreckt sich auf einer Fläche von 310 km². Sie ist in 25 Stadtbezirke gegliedert und liegt durchschnittlich auf einer Höhe von 519 m ü. NN. München ist mit derzeit knapp 5.000 Einwohnern je Quadratkilometer die am dichtesten besiedelte Stadt und eine der am schnellsten wachsenden Städte Deutschlands.

Naturräumliche Gliederung

Die Münchner Schotterebene entstand in den letzten beiden Eiszeiten und besteht aus Niederterrassenschotter der großen Schmelzwasserströme der Alpengletscher. Im Süden der Stadt ist der Schotter bis zu 20 m mächtig, während es im Norden nur etwa 2 m sind. Die Schotterebene im Umland von München weist einen Höhenunterschied von Nord nach Süd auf: so sind es 270 m Höhendifferenz vom Süden bei Holzkirchen (691 m ü. NN) nach Moosburg (421 m ü. NN) im Norden. Im Münchner Stadtgebiet beträgt der Höhenunterschied 100 m (Forstenrieder Park 58 m ü. NN im Süden, Regattastrecke 480 m ü. NN im Norden).

Naturräumlich ist die Stadt durch die Flusstäler von Isar und Würm gegliedert. Das Isartal erstreckt sich von Südwest nach Nordost und entwickelt sich von einem schmalen Tal mit steilen Hängen zu einer breiten Aue mit niedrigen Terrassenhängen. Der Fluss wurde vor etwa 150 Jahren reguliert, abschnittsweise jedoch wieder renaturiert, wie beispielsweise ein 8 km langer Abschnitt im südlichen Teil des Münchner Stadtgebiets. Vorbild war hier der Bereich um den Flaucher. Im Innenstadtbereich hat die Isar durch die dichte Bebauung weniger Raum; im Englischen Garten weitet sich die Aue wieder. In der Oberen Isaraue bei Freimann fließt der Fluss durch begleitende Auwälder. Die Würmaue befindet sich im Westen des Stadtgebiets. Die Würm ist ein Abfluss des Starnberger Sees und hat somit wenig Fracht und nur einen schmalen Überflutungsbereich.

Teile des Münchner Nordens sind von einer Mooslandschaft geprägt. Auf dem dünnen Schotterkörper entstanden durch den ständigen Grundwassereinfluss Niedermoore, die heute zum größten Teil entwässert sind. Es bestehen noch Reste von echten Niedermooeren im Westen und Norden und viele Übergangsbereiche, die ackerbaulich genutzt werden.

Siedlungsstruktur und Grünflächen in München

Die Siedlungsstruktur Münchens lässt sich in unterschiedliche Strukturtypen einteilen, die für das Münchner Stadtgebiet in einer Strukturtypenkartierung erfasst wurden. Diese Kartierung bildete die Grundlage für die (stadt-) klimatischen Modellierungen. Ein Luftbild der Stadt München ist in Abb. 2.2 dargestellt. Die Altstadt ist das historische mittelalterliche Stadtzentrum, das kaum in seiner ursprünglichen Form erhalten ist. Kennzeichnend sind eine dichte Bebauung und ein hoher Versiegelungsgrad, als größere Grünflächen sind der Hof- und Finanzgarten zu nennen. Zudem gibt es diverse kleine Grünflächen.



Abb. 2.2: Luftbild München (© Landeshauptstadt München - Kommunalreferat GeodatenService 2017).

An die Altstadt grenzen Gebiete mit Block- und Blockrandbebauung an. Dazwischen befinden sich einzelne Grünanlagen, wie der Alte Botanische Garten. Daran schließen sich Geschossbauten an, die großteils als Wohngebiete genutzt werden und weniger Versiegelung als in der Innenstadt aufweisen. Gebiete mit Einzelhausbebauung in den Stadtrandlagen zeichnen sich durch einen hohen Grünflächenanteil aus, der sich aus privaten Gärten, Friedhöfen, Kleingartenanlagen und Parks zusammensetzt.

Gewerbe- und Industriegebiete befinden sich vor allem im Norden der Stadt und entlang von Bahnanlagen. Sie sind durch einen hohen Versiegelungsgrad gekennzeichnet.

In München gibt es verschiedene Grünanlagen und Parks. Der Englische Garten ist mit 375 ha der größte Park – er gehört auch zu den größten Stadtparks der Welt. Der englische Landschaftspark wurde Ende des 18. Jahrhunderts in der feuchten Auenlandschaft der Isar gestaltet.

Alpenvorland

Das Alpenvorland erstreckt sich zwischen dem nördlichen Alpenrand und der Donau. Es wurde von den Gletschern mehrerer Eiszeiten geformt und fällt von 800 m ü. NN am Alpenfuß auf 300 m ü. NN an der Donau ab. Während der Eiszeiten war das Areal teilweise von Gletschern bedeckt, so dass der südliche Teil heute eine

ausgeprägte Grundmoränenlandschaft ist und sich im nördlichen Teil Schotterterrassen befinden, die in eine bis zur südlichen fränkischen Alb reichende tertiäre Hügellandschaft übergehen.

Von Gletschern geschaffene Zungenbecken beherbergen heute größere Seen, wie den Tegernsee, den Schliersee und den Chiemsee am Alpenrand sowie den Ammersee und den Starnberger See südwestlich von München. In verlandeten Seen entstanden Moore, wie das Murnauer Moos und viele kleinere Moore. Viele Flüsse, die in den Alpen entspringen, durchziehen das Alpenvorland, wie der Lech, die Isar und der Inn.

Die Landnutzung im Alpenvorland ist abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit und den Böden. In den Alpen befinden sich in den Hochlagen Wälder und in den Tälern hauptsächlich Grünland und wenige Siedlungen. Die Grundmoränenlandschaft ist ein Mosaik aus Wald und Grünland mit einzelnen Ackerflächen.

In der Schotterebene dominiert München als großer Siedlungs- und Wirtschaftsraum mit dem Flughafen im Nordosten bei Freising. Das starke Wachstum in der Region zeigt sich auch in einer entsprechenden Siedlungsentwicklung sowohl im Stadtgebiet als auch im Umland.

2.3 Alpines Pumpen

Das Alpine Pumpen ist ein **thermisches Windsystem** (WINKLER 2006; ZARDI und WHITEMAN 2013), das sich vor allem bei großräumig windschwachen Strahlungswetterlagen im Gebiet des Alpenvorlands und der Alpen bildet (siehe Abb. 2.3). Voraussetzung für die Entwicklung dieser Zirkulation in ausgeprägter Variation sind verschiedene Kriterien, die in dieser Studie in Kapitel 5.2.1 und 6.2.1 näher untersucht werden.

In einer früheren Studie wurde als wichtigster Faktor die **solare Einstrahlung** identifiziert, die zur Ausbildung des Alpines Pumpens mindestens eine Tagessumme von 20 MJ/m² haben sollte (LUGAUER und WINKLER 2005). Für die dabei ausgewerteten Jahre 1996-2000 tritt diese Strahlungssumme zwischen April und August an etwa 42 % der Tage auf. Für die Entstehung des thermischen Windsystems ist ein durch Temperaturunterschiede entstehender Druckgradient zwischen Gebirge und Vorland ausschlaggebend, der sich tags durch die hohe solare Einstrahlung und nachts durch starke thermische Ausstrahlung bildet.

Die thermischen Unterschiede entstehen insbesondere durch die im Gebirge in größerer Höhe erfolgende Energieumsetzung an der Erdoberfläche (HAFNER et al., 1987), aber auch durch das in Tälern gegenüber flachem Gelände verringerte Luftvolumen, das tagsüber bei gleicher Energiezufuhr eine stärkere Erwärmung und nachts bei gleichem Energieverlust eine stärkere Abkühlung der Luft im Tal bewirkt (STEINACKER 1984). Wenn sich tagsüber die Luft im Alpenraum stärker erwärmt, steigt sie konvektiv auf und es bildet sich ein Wärmetief. Als Ausgleich für die gehobene Luft strömt Luft aus dem Alpenvorland zum Gebirge.

Die Zirkulation dreht sich nachts um: im Gegensatz zur Ebene kühlt sich die Luft nachts im Gebirge schneller ab. Dort bildet sich ein Kältehoch und der Luftdruck ist höher als auf gleicher Höhe im Vorland. Die Folge ist eine horizontale Ausgleichsströmung vom Gebirge ins Alpenvorland. In der Höhe erfolgt tags und nachts jeweils eine horizontale Rückströmung in die entgegengesetzte Richtung, wodurch aber keine geschlossene Zirkulation entsteht, da oberhalb des Gipfelniveaus das Alpine Pumpen durch die großräumige und oft kräftige Strömung des Gradientwindes überlagert wird.

In Abhängigkeit von der jeweiligen Wetterlage und der Orographie gibt es verschiedene Abwandlungen des Alpines Pumpens. Durch die Wechselwirkung von thermischen und anderen Antriebskräften im Alpenraum

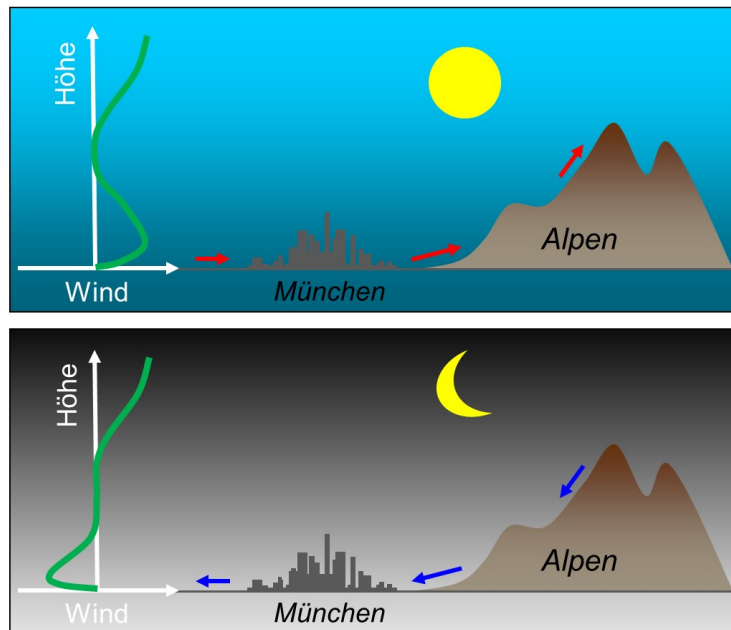


Abb. 2.3: Skizzierte Darstellung des Alpenen Pumpens. (Quelle: DWD).

kommt es zu unterschiedlichen Ausprägungen. Verstärkt werden kann die Zirkulation durch lokale Hang- und Talwindssysteme. In Talöffnungen des nördlichen Randes der Alpen, wie dem Isar- oder Loisachtal, ist die Windgeschwindigkeit somit besonders hoch und kann bei Talverengungen durch den Bernoulli-Effekt örtlich noch verstärkt werden.

Das Alpine Pumpen reicht bei entsprechender Ausprägung über 100 km ins Alpenvorland und hat tagsüber eine Mächtigkeit von bis zu 1000 m, nachts allerdings ist die Schicht deutlich flacher, da kalte Luft der Geländeneigung folgt und sich lokale Kaltluftseen in Senken oder an Strömungsbarrieren bilden. Die für das Alpine Pumpen tagsüber ausschlaggebende hohe Einstrahlung führt in den Alpen zur Bildung von Konvektionsbewölkung. Da im Vorland aber ein kompensierendes Absinken der Luft stattfindet, wird dort die Entstehung von größeren Wolkenkomplexen üblicherweise verhindert. Aufgrund der beschriebenen räumlichen Ausdehnung des Alpenen Pumpens ist ein Effekt auf die Durchlüftung und die Temperaturverteilung in der Landeshauptstadt München durch das Heranführen kühlerer Luft in der Nacht zu erwarten, insbesondere bei sommerlichen austauscharmen Witterungsperioden.

2.4 Ergebnisse bisheriger Untersuchungen in München

In München werden stadtklimatische Fragestellungen seit den 1980er Jahren untersucht. Im Projekt STADTKLIMA BAYERN (MAYER et al. 1987; BRÜNDL 1987) wurden die einzelnen Komponenten des Stadtklimas mit Daten eines temporären Messnetzes, Profilfahrten und Vertikalsondierungen im Detail untersucht. Zudem gab es in der Folge verschiedene weitere Untersuchungen. Im Bereich Stadtklima und Klimaanpassung wurden in den letzten Jahren folgende stadtklimatische Grundlagen erarbeitet:

Im Jahr 2014 wurde für das Münchner Stadtgebiet eine **Stadtklimaanalyse (Klimafunktionskarte, RGU 2014)** als flächenhafte und planungsorientierte Aufbereitung der überwiegend punktförmig vorliegenden

Stadtklimadaten erstellt und vom Stadtrat beschlossen. Messwerte des Deutschen Wetterdienstes wurden als Eingangsgrößen für eine flächenhafte Modellierung genutzt. Modelliert wurden die aktuellen thermischen Bedingungen, das lokale Kaltluftströmungsfeld und die bioklimatischen Bedingungen. Die Analysen beziehen sich auf austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlagen. Mit der Modellierung war das Büro GEO-NET, Hannover, beauftragt. Es wurde das Modell FITNAH verwendet¹.

Die Klimafunktionskarte ist ein Fachplan für die Belange des Stadtklimas und eine wichtige Grundlage für die gesamtstädtische räumliche Entwicklung. Exemplarisch werden hier die Ergebnisse der stadtklimatischen Bewertungskarte gezeigt (siehe Abb. 2.4). Die stadtklimatische Bewertungskarte enthält Angaben zur bioklimatischen Bedeutung der Grün- und Freiflächen, zur bioklimatischen Belastung in den Siedlungsräumen und zum Luftaustausch. Zudem wurden vertiefende Studien zur Wirkung von Vegetation im Gebäudeumfeld und zur Durchlüftung modelliert.

Im Jahr 2016 wurde das **Maßnahmenkonzept Anpassung an den Klimawandel in der Landeshauptstadt München** (RGU 2016) fertiggestellt und vom Stadtrat beschlossen. Das Referat für Gesundheit und Umwelt war für die Entwicklung des Maßnahmenkonzepts verantwortlich. Da Veränderungen des Klimas viele Lebens- und Arbeitsbereiche betreffen, waren 60 Expertinnen und Experten der Münchner Stadtverwaltung in einer referatsübergreifenden Projektgruppe und fünf fachlichen Arbeitsgruppen an der Erarbeitung beteiligt.

Das Münchner Anpassungskonzept baut auf einer soliden Datengrundlage zum Stadtklima sowie zu den bereits beobachtbaren und zu erwartenden Veränderungen durch den Klimawandel auf, die großteils im Rahmen der Kooperation mit dem DWD zur Verfügung gestellt wurden: langjährige Beobachtungen sowie Ergebnisse der Sondermessungen, Messfahrten und erste Ergebnisse der Modellierung des zukünftigen Stadtklimas. Zwischenergebnisse aus der Kooperation wurden somit 2016 bereits veröffentlicht. Eine Fortführung des Prozesses wurde vom Stadtrat beschlossen.

Einige Klimaanpassungsmaßnahmen beziehen sich explizit auf stadtklimatische Daten und Modellierungen. Im Rahmen der Maßnahme „Integration der Klimafunktionskarte in die Stadtplanung“ werden stadtklimatische Fragestellungen stärker in der Planung berücksichtigt. So werden in stadtklimatisch sensiblen Gebieten mikroklimatische Modellierungen als Basis für weitergehende Planungen erstellt. Zudem sollen beispielhafte Simulationen für stadtklimatische Fragestellungen berechnet und die Datengrundlage für Extremereignisse in Kooperation mit dem DWD verbessert werden.

Als weitere Klimaanpassungsmaßnahme erarbeitet das Projekt "Grüne Stadt der Zukunft - klimaresiliente Quartiere in einer wachsenden Stadt" Handlungsempfehlungen, wie die Integration der Klimafunktionskarte in die Planung verbessert werden kann (RGU 2019). Das Projekt hat das Ziel, integrierte Lösungsansätze zum Umgang mit den Herausforderungen Klimawandel und Nachverdichtung in München zu entwickeln. Es wird erprobt, wie sich diese in einer wachsenden Stadt in der Planung umsetzen lassen. Dafür will das Projekt a) die wissenschaftliche Datengrundlage zu den stadtklimatischen Wirkungen „grüner Infrastruktur“ ausbauen, b) soziale Aspekte bei der klimaresilienten Innenentwicklung erheben und c) Anforderungen der Klimaanpassung in verschiedene Planungsebenen und -prozesse verankern. Im Projekt arbeiten das Referat für Gesundheit und Umwelt und das Referat für Stadtplanung und Bauordnung in Kooperation mit der Technischen Universität

¹ Die Erstellung dieser Karte ist Teil der Maßnahme 2.6 Erhalt und Entwicklung klimawirksamer Freiflächen und Siedlungsstrukturen des IHKM, Klimaschutzprogramm 2010.

München, der Ludwig-Maximilians-Universität München und dem Institut für ökologische Wirtschaftsforschung Berlin zusammen. Es wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der "Leitinitiative Zukunftsstadt" gefördert.

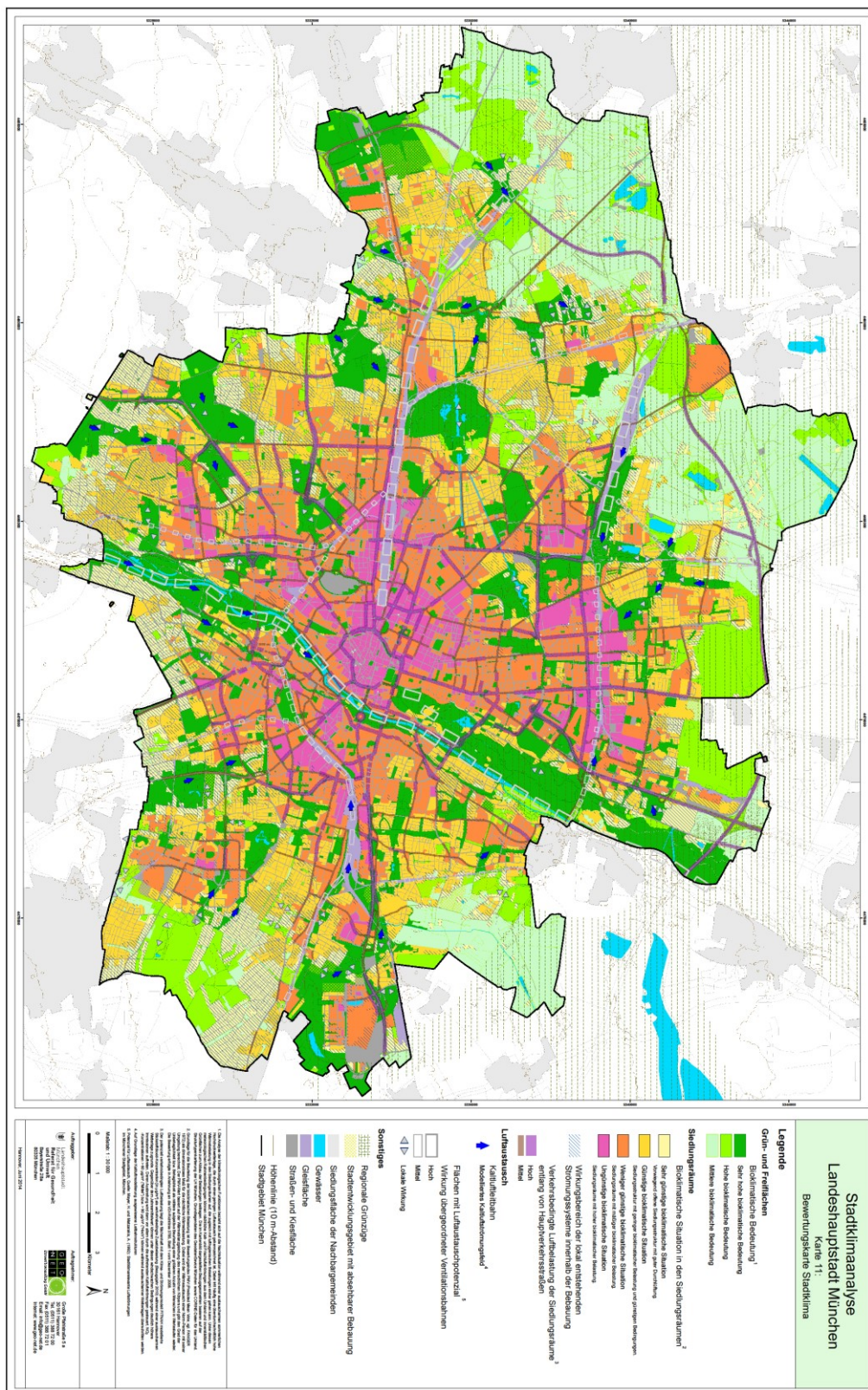


Abb. 2.4: Stadtklimaanalyse / Klimafunktionskarte (stadtklimatische Bewertungskarte) (RGU 2014).

3 Methodik

3.1 Vorgehen im Kooperationsprojekt

Im Rahmen des Kooperationsprojektes sollten das aktuelle und zukünftige Stadtklima untersucht werden, sowie ein besseres Verständnis über das regionale Gebirgswindsystem Alpines Pumpen und dessen Einfluss auf das Stadtgebiet erlangt werden.

In München gibt es seit 1955 Messungen an der Station München-Stadt. Deren Standort gilt als repräsentativ für das Stadtklima aus klimatologischer Sicht und erlaubt langjährige Veränderungen zu untersuchen. Aufgrund von vielen Faktoren wie z.B. der Bebauung und dem Versiegelungsgrad, unterscheiden sich die meteorologischen Parameter wie z.B. die Temperatur jedoch innerhalb des Stadtgebiets. Um räumlich differenzierte Informationen über das Stadtklima zu erlangen, wurden daher, neben den langjährigen Messreihen an der Station München Stadt, im Rahmen der Kooperation zusätzlich Einzelfalluntersuchungen in Form von Lufttemperatur-Profilmessfahrten gemacht (siehe Kapitel 3.2).

Diese werden ergänzt durch die Modellierung der sommerlichen Temperaturverhältnisse in München. Die Modellergebnisse basieren auf insgesamt 16 Simulationen mit dem lokalen Stadtklimamodell MUKLIMO_3 (3-dimensionales Mikroskaliges Urbanes KLImaMOdell, siehe Kapitel 6) des DWD und geben das Stadtklima für sommerliche Bedingungen mit einer hohen Auflösung von 100 m wieder. Mit einem dynamisch-statistischen Downscaling Verfahren für regionale Klimaprojektionen (Quadermethode, FRÜH et al. 2011a) können so die vergangenen und durch den Klimawandel zukünftig zu erwartenden sommerlichen Temperaturverhältnisse in München mit hohem Detailgrad aufgezeigt werden. Eine Validierung der Modellergebnisse erfolgt durch den Vergleich mit Beobachtungsdaten des DWD im Stadtgebiet für einen Zeitraum in der Vergangenheit und erlaubt somit eine Aussage über die Güte der Simulationsergebnisse.

Zur Untersuchung des Alpines Pumpens und dessen Auswirkung auf das Stadtklima wurden für die Dauer von drei Jahren temporäre Windmessungen südlich von München durchgeführt, die das bestehende Messnetz verdichten (siehe Kapitel 3.2). Zusätzlich wurde erstmals bei der Datenerhebung in München das lokale Stadtklimamodell MUKLIMO_3 mit dem regionalen Klimamodell COSMO-CLM gekoppelt. Das COSMO-CLM Regionalklimamodell (siehe Kapitel 3.3) simuliert dazu die für München stadtklimatisch wichtigen regionalen thermisch induzierten Gebirgswindsysteme in einer räumlichen Auflösung von wenigen Kilometern (Abb. 3.2). Diese dienen in einem nächsten Schritt als Eingangsdaten für das räumlich höher auflösende Stadtklimamodell MUKLIMO_3. Mit diesem wird dann für eine entsprechende sommerliche Hochdruckwetterlage mit hohen Temperaturen eine Fallstudie durchgeführt um den Einfluss des Alpines Pumpens auf die Wind- und Temperaturverhältnisse in München zu simulieren.

Durch einen qualitativen Vergleich der Ergebnisse von Messungen und Simulationen kann die Vertrauenswürdigkeit der Modelldaten geprüft werden. Im Unterschied zu Messungen, stellen die Modellaussagen immer nur eine räumliche Mittelung über eine Modellgitterzelle dar. Gleichzeitig sind die Ergebnisse der Messungen aber auch durch lokale Einflüsse (wie z.B. eine Tallage, Gebäude oder höherer Bewuchs) bestimmt und die einzelnen Stationen stehen oft in großer Entfernung zueinander und sind je nach Geländegliederung und betrachtetem Parameter nicht unbedingt für ein größeres Gebiet repräsentativ. Hier liefern die Modelle wichtige flächendeckende, großräumigere Informationen und erlauben zusätzlich eine Analyse der vertikalen Struktur

der Atmosphäre. Somit sind die Ergebnisse aus Messungen und Modellsimulationen immer ergänzend zu sehen.

Das Messprogramm als auch die Grundlagen des regionalen Klimamodells COSMO-CLM sowie des Stadtklimamodells MUKLIMO_3 werden in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben.

Alle Uhrzeiten in diesem Bericht sind in Mitteleuropäischer Zeit (MEZ) angegeben. Für die in den Sommermonaten geltende Mitteleuropäische Sommerzeit (MESZ) muss eine Stunde addiert werden (d.h. 12 Uhr MEZ ist 13 MESZ).

3.2 Das Messprogramm

Im Zuge der Kooperation zwischen dem Deutschen Wetterdienst und der Landeshauptstadt München wurden für die Dauer von drei Jahren (2013-2015) temporäre Messstationen südlich von München aufgebaut, um die Beobachtungen des regulären Messnetzes zu ergänzen. Diese erlauben zum einen eine bessere Analyse der Windverhältnisse in den südlich an die Stadt angrenzenden Grünzügen und zum anderen bieten sie die Möglichkeit zur qualitativen Validierung der Modellergebnisse im Untersuchungsgebiet. Ein quantitativer Vergleich ist aufgrund der verschiedenen Zeiträume (Messungen 2013-2015, Modellierungen 1989-2008) nicht möglich. Ergänzend wurden auch Windmessungen von 16 Stationen des regulären Messnetzes des DWD verwendet. Zur Identifizierung von Tagen mit günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen wurden zudem Niederschlag und Sonnenscheindauer von jeweils vier regulären Stationen verwendet und für die Temperaturanalyse Beobachtungen von drei Stationen des regulären Messnetzes herangezogen. Die Lufttemperatur an den Stationen wird, falls nicht anders angegeben in Tabelle A.1 im Anhang, in 2 m Höhe über Grund, vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, gemessen. Die Windmessungen erfolgen, sofern nicht anders angegeben, in 10 m Höhe. Eine Übersicht der hier verwendeten regulären DWD-Stationen sowie der fünf temporären Windmessungen ist in Abb. 3.1 dargestellt. Genauere Informationen über alle in diesem Bericht verwendeten Stationen sind in Tabelle A.1 im Anhang zusammengefasst.

Im Juli 2015 wurden zusätzlich Profilmessfahrten durchgeführt, bei denen zu verschiedenen Abend- und Nachtzeiten auf vier etwa gleich langen Routen über das Stadtgebiet verteilt die Lufttemperatur gemessen wurde. Eine ausführliche Beschreibung des Routenverlaufs sowie die Auswertungen der gemessenen Temperaturen finden sich in Kapitel 5.1.

3.3 Das Regionalklimamodell CCLM

Zur Untersuchung von Identifikationskriterien und der Klimatologie des Alpines Pumpens im deutschen Alpenvorland wurde das mesoskalige, nicht-hydrostatische regionale Klimamodell COSMO-CLM (CCLM, ROCKEL et al. 2008) eingesetzt. CCLM wurde von einem offenen, internationalen Netzwerk von Wissenschaftlern der „Climate Limited-area Modelling-Community“ (CLM-community, www.clm-community.eu) aus dem ursprünglichen Wettervorhersagemodell COSMO (STEPPELER et al. 2003) des Deutschen Wetterdienstes entwickelt. Für die Modellsimulationen wurde die bewährte Referenzversion 4.8_clm19 des CCLM genutzt und zwei ineinander geschachtelte Modellgebiete konfiguriert – das Modellgebiet EUROPA mit einer räumlichen Auflösung von $0,11^\circ$ (≈ 12 km) und mit 40 vertikalen Modellschichten sowie das darin eingebettete

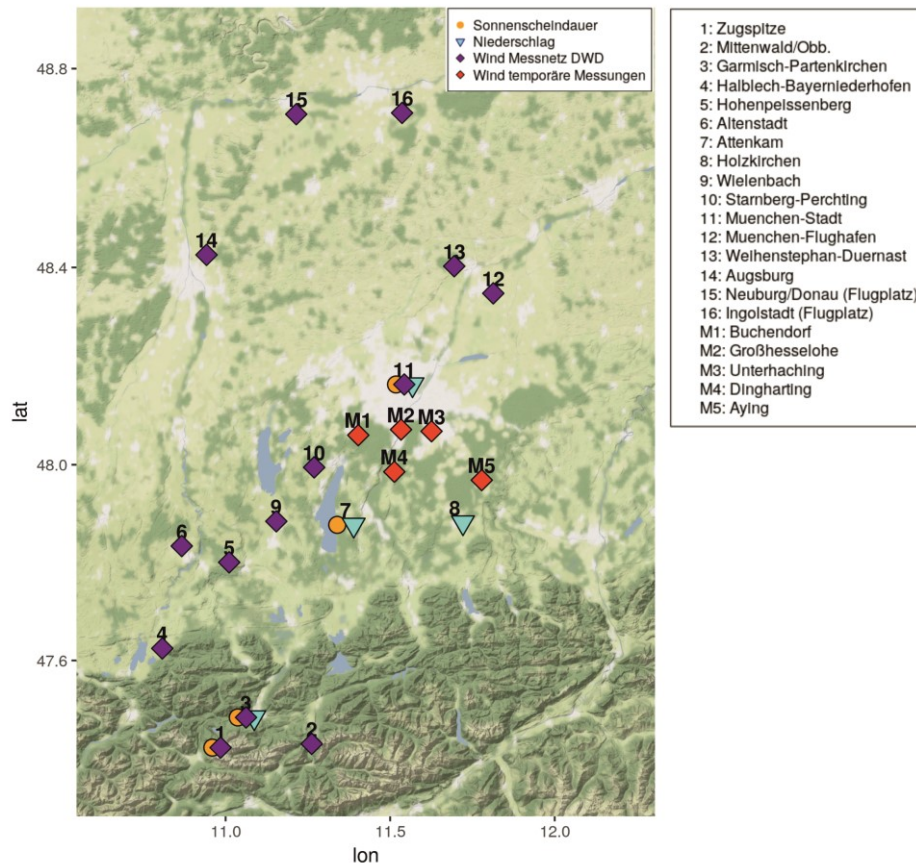


Abb. 3.1: Übersicht der Messstandorte. Zur Identifikation von Tagen mit Alpinem Pumpen wurde die Sonnenscheindauer (orangefarbige Punkte) sowie der Niederschlag (hellblaue Dreiecke) an jeweils vier Stationen verwendet. Lila Rauten markieren die Windmessungen des regulären Messnetzwerks des DWD, rote Rauten die zusätzlichen temporären Windmessungen im Rahmen des Stadtklimaprojekts. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Symbole leicht verschoben, Messungen der verschiedenen Variablen beziehen sich immer auf den gleichen Messstandort.

Modellgebiet MÜNCHEN mit einer räumlichen Auflösung von $0,025^\circ$ ($\approx 2,8$ km), 50 vertikalen Modellschichten und 110×112 horizontalen Gitterpunkten (Abb. 3.2). Das Modellgebiet MÜNCHEN erstreckt sich im Norden über die Donau hinaus bis zu den Rändern der Schwäbischen Alb und des Bayerischen Walds und reicht im Süden etwas über den Alpenhauptkamm. Die niedrigste Modellschicht ist in beiden Modellgebieten 20 m dick. Der Simulationszeitraum ist 1989-2008. Die Anfangs- und Randbedingungen verwenden an den seitlichen Begrenzungen des Modellgebiets EUROPA den ERA-Interim Reanalyse-Datensatz (DEE et al. 2011), der vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage zur Verfügung gestellt wird (www.ecmwf.int).

Das eingebettete Modellgebiet MÜNCHEN wird an seinen Grenzen durch die Ergebnisse der Simulation für das Gebiet EUROPA angetrieben. Für beide Modelldomänen werden das zwei Zeitschritte umfassende Runge-Kutta Verfahren und das Landoberflächenmodell TERRA (DOMS et al. 2011) mit neun Bodenschichten zwischen 0,5, 2,5, 7, 16, 34, 70, 142, 286, 574 und 1150 cm Tiefe verwendet. Als Landnutzungsdaten wurde die Klassifikation GLC2000 (FRITZ et al. 2003) verwendet. Die Analyse und die Präsentation von Modellergebnissen in diesem Bericht sind auf den zentralen Teil des Modellgebiets MÜNCHEN begrenzt (Abb. 3.2).

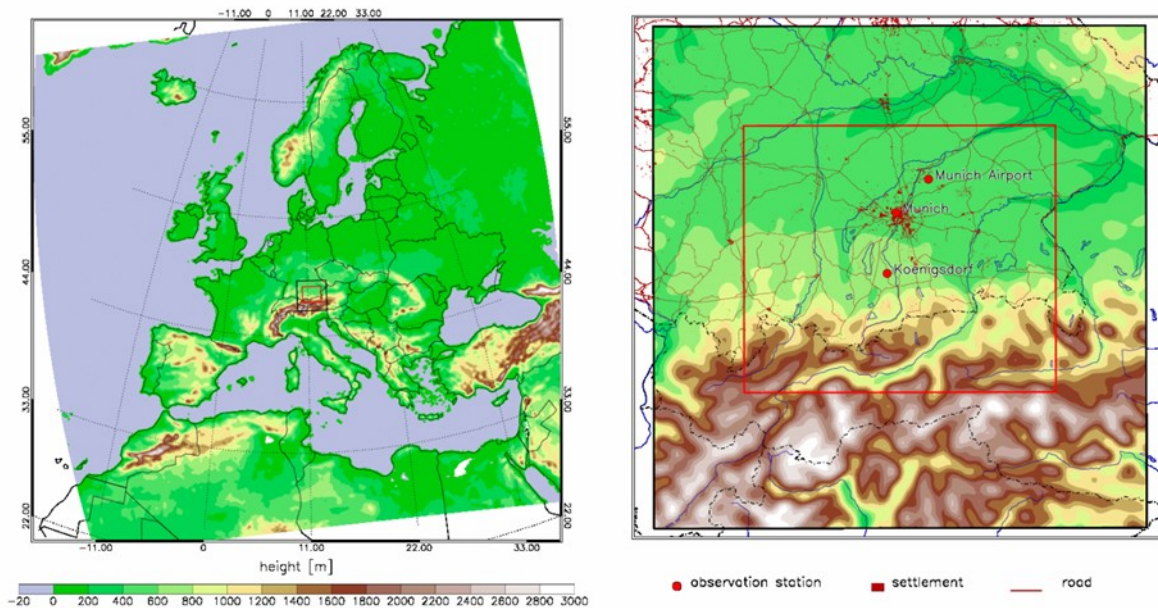


Abb. 3.2: CCLM-Modellgebiet EUROPA (links) und das darin eingebettete Modellgebiet MÜNCHEN (schwarzer Rahmen, rechts). Das Modellgebiet MÜNCHEN (rechts) zeigt das CCLM-Auswertebereich (roter Rahmen).

3.4 Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3

Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 (3-dimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell) des Deutschen Wetterdienstes wird in dieser Studie zur Berechnung von Stadtklimaprojektionen mit der Quadermethode (Kapitel 6.1) und zur Untersuchung des Einflusses des Alpinen Pumpens auf das Stadtklima (Kapitel 6.3) eingesetzt.

MUKLIMO_3 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 Lufttemperatur und -feuchtigkeit, der solaren und thermischen Strahlung, der Temperatur und des Feuchtegehalts im Erdboden sowie vieler weiterer relevanter Parameter. Die Berechnung der Lufttemperatur in bebauten Gebieten berücksichtigt die Reflexion und Absorption von Strahlung (SIEVERS und FRÜH 2012) sowie die Speicherung von Wärme in den Gebäuden. Die Beschreibung des Wärme- und Feuchtehaushalts des Bodens erfolgt nach der Methode von SIEVERS et al. (1983). Das Vegetationsmodell mit drei Schichten basiert auf einem erweiterten Ansatz nach SIEBERT et al. (1992). Eine vollständige Modellbeschreibung von MUKLIMO_3 findet man in SIEVERS (2012, 2016).

Die räumliche Auflösung des Modells liegt typischerweise 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 Untersuchungsmittelpunkt stehenden Teil des Modellgebiets die höchste Auflösung gewählt wird. Die vom 3-dimensionalen Modell benötigten Anfangs- und Randwerte (die die Umgebungsbedingungen repräsentieren) werden durch eine zusätzlich ablaufende 1-dimensionale 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 Niederschlagsbildung enthält, kann das Modell nur für niederschlagsfreie Situationen

eingesetzt werden. Neben den meteorologischen Eingangsgrößen benötigt das Modell für jede Gitterzelle die Geländehöhe und Informationen zur Art der Landnutzung.

3.4.1 Geländehöhedaten und Landnutzungsdaten

Für die vorliegende Studie wurden von der Landeshauptstadt München digitale Geländemodelle mit 50 m und 200 m Auflösung (DGM50- und DGM200-Rasterdaten) sowie als Stadtstrukturtypen bezeichnete Landnutzungsdaten (Vektordaten, Stand 2011) zur Verfügung gestellt. Da die Stadtstrukturtypisierung nur für das Münchener Stadtgebiet vorliegt, wurde außerhalb der Stadt der CORINE Land Cover-Datensatz (CLC, <https://land.copernicus.eu/>) für das Jahr 2006 als Landnutzung für die MUKLIMO_3-Simulationen verwendet.

In Absprache mit der LH München wurden die Stadtstrukturtypen und CLC-Klassen in klimarelevante MUKLIMO_3-Klassen umklassifiziert. MUKLIMO_3-Klassen können hierbei auch Anteile von 2 verschiedenen Bebauungstypen kombinieren (Klasse 15: Zeilenbebauung mit Hochhäusern). In Analogie zum Ansatz von GROSS (1989) erfolgt die Beschreibung der Klassen mit Bebauung anhand folgender Parameter: mittlerer Gebäudegrundflächenanteil γ_b , mittlere Gebäudehöhe h_b , mittlerer Wandflächenindex w_b und mittlerer Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden v . Die in Tabelle 3.1 angegebenen Werte dieser Parameter repräsentieren eine in Rücksprache mit der LH München erfolgte Expertenschätzung in Anlehnung an BMBAU (1980).

Tabelle 3.1: Parameter zur Beschreibung der Bebauung für die MUKLIMO_3-Landnutzungsklassen: mittlerer Gebäudegrundflächenanteil γ_b , mittlere Gebäudehöhe h_b in m, mittlerer Wandflächenindex w_b und mittlerer Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden v .

Klasse	Beschreibung	γ_b	h_b	w_b	v
1	dichte Bebauung	0,30	15	2,70	0,80
2	lockere Bebauung	0,12	8	2,80	0,25
5	Industrie, Gewerbe (dicht)	0,55	20	0,90	0,55
6	Industrie, Gewerbe (locker)	0,30	12	1,50	0,80
11	Ein- und Mehrfamilienhäuser (mittel)	0,20	9	2,88	0,30
12	Dorfkern und Einfamilienhäuser	0,50	9	2,23	0,80
13	Reihenhaussiedlung	0,35	9	1,73	0,30
14	Zeilenbebauung	0,30	16	3,68	0,80
15	Zeilenbebauung mit Hochhäusern Typ 1/Typ 2	0,12/0,02	23/54	4,49/10,53	0,55
16	Blockbebauung	0,32	19	3,08	0,20
21	Ein- und Mehrfamilienhäuser (locker)	0,12	9	2,24	0,30

3.4.2 MUKLIMO_3-Modellgebiet und Auswerteggebiet

Das gesamte MUKLIMO_3-Modellgebiet wurde so gewählt, dass um München ausreichend Umland für die Ausbildung von thermischen Zirkulationen zwischen Stadt und Umland (Flurwinde) vorhanden ist (Abb. 3.3). Die Alpen liegen jedoch außerhalb des Modellgebiets. Orographisch bedingte thermische Windsysteme können sich im Modellgebiet somit nur auf der lokalen Skala ausbilden. Um das auf regionaler Skala auftretende Alpine Pumpen (siehe Abschnitt 2.3) zu berücksichtigen, muss daher eine entsprechende Windvorgabe als Randwert für MUKLIMO_3 erfolgen (siehe Abschnitt 3.4.3).

Das gesamte MUKLIMO_3-Modellgebiet besteht in horizontaler Richtung aus 480 x 400 Gitterpunkten und hat bei einer konstanten horizontalen Gitterweite von 100 m eine Ausdehnung von 48 km in West-Ost-Richtung und 40 km in Süd-Nord-Richtung. Die Gauß-Krüger-Koordinaten der Südwest-Ecke des Modellgebiets sind 4443000 / 5315000 (RW / HW). Die Geländehöhe im Modellgebiet variiert von 451 m ü. NN im Nordosten bis zu 719 m ü. NN im Südwesten.

Das MUKLIMO_3-Auswerteggebiet ist ein Teilgebiet des Modellgebiets. Seine Südwest-Ecke hat die Gauß-Krüger-Koordinaten 4452000 / 5324000. Mit einer Ausdehnung von 28 km x 22 km weist dieses Gebiet Geländehöhen zwischen 470 m und 600 m über NN auf und umfasst das administrative Stadtgebiet der LH München. Vertikal hat das Modellgitter eine Ausdehnung von insgesamt 500 m. Die vertikale Gitterweite ist in den untersten 25 Schichten 10 m und nimmt darüber allmählich bis auf 50 m zu. Die atmosphärischen Bodenfelder der MUKLIMO_3-Ergebnisse werden in 5 m über Grund ausgegeben. Die Antriebsdaten des 3-dimensionalen Modells werden bis zu einer Höhe von 1550 m über Grund mit einem vorgeschalteten 1-dimensionalen Modell berechnet.

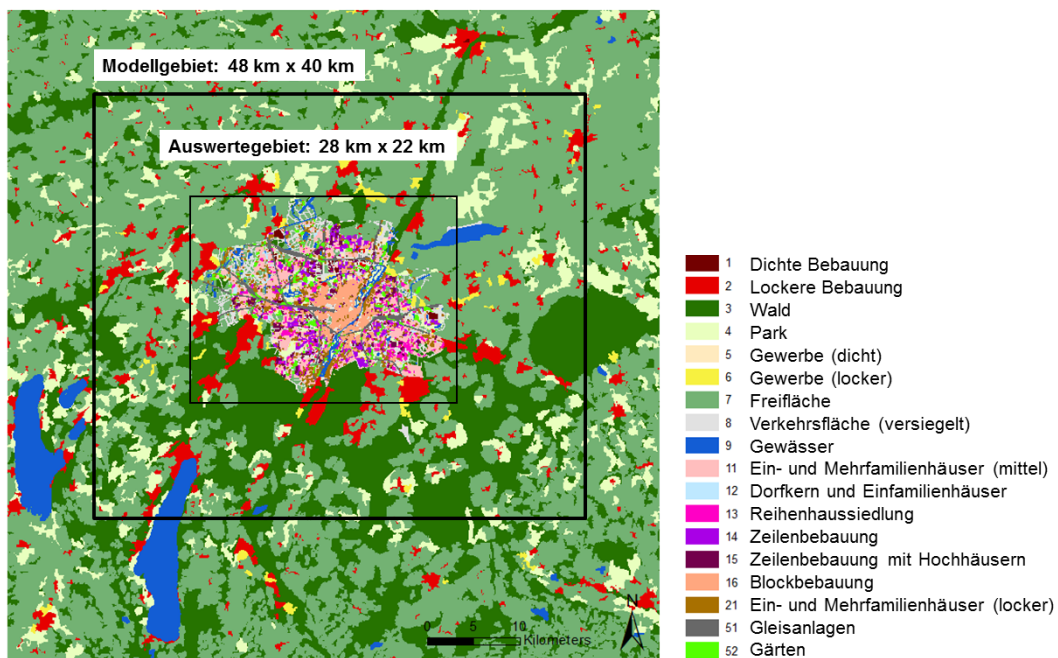


Abb. 3.3: MUKLIMO_3-Landnutzungsdaten mit 100 m Auflösung für München und Umgebung. Der äußere Rahmen zeigt das gesamte Modellgebiet von 48 km x 40 km, der innere Rahmen zeigt das MUKLIMO_3-Auswerteggebiet von 28 km x 22 km.

3.4.3 Vorgabe des Regionalwinds

MUKLIMO_3 simuliert das Stadtklima mit seitlich offenen Randbedingungen (SIEVERS 2012, 2016). Die durch das vorgeschaltete 1-dimensionale Modell berechneten regionalen Tagesgänge der Lufttemperatur, Luftfeuchte und des Windes werden am oberen Rand des 3-dimensionalen Modellgitters als Randwerte an die 3-dimensionalen MUKLIMO_3-Stadtklimasimulation übergeben. Bei den MUKLIMO_3-Simulationen zur Berechnung von Stadtklimaprojektionen (Quadermethode, siehe Kapitel 6.1.1) wird das Standard Setup des Modells, mit konstanter Windrichtung und -geschwindigkeit am oberen Rand des 3-dimensionalen Modellgebiets, verwendet (FRÜH et al. 2011).

Für die Fallstudie zum Einfluss des Alpinen Pumpens auf die Temperaturverhältnisse in München wurde der MUKLIMO_3-Programmcode dahingehend erweitert, dass ein Tagesgang des Windes in einer geeigneten Höhe vorgegeben werden kann. Für die in Kapitel 6.3 präsentierten Simulationsergebnisse wurde in der 1-dimensionalen Vorschaltsimulation ein für das Alpine Pumpen typischer Tagesgang von Windrichtung und -geschwindigkeit in einer Höhe von 100 m über Grund vorgegeben.

4 Ergebnisse der langjährigen Klimamessungen

Als Grundlage für die Auswertungen in den folgenden Kapiteln wurde in einem ersten Schritt der Zustand des Klimas anhand der langjährigen Zeitreihen an der Station München-Stadt untersucht. Klima ist definiert als die statistische Mittelung und die Varianz verschiedener Parameter, wie bspw. Temperatur und Niederschlagshöhe, in einem hinreichend langen Zeitintervall. An der Station München-Stadt sind seit 1955 Daten vorhanden und die 64 Jahre bis 2018 liefern eine solide Datengrundlage für eine statistische Auswertung des Klimazustands und eine Analyse der Klimaänderungen in der Stadt München. Oft werden für Klimabetrachtungen auch 30-jährige Zeiträume, sogenannte Referenzzeiträume, verwendet. In Übereinstimmung mit den Modellergebnissen in Kapitel 6 werden, neben der langjährigen Reihe, der Referenzzeitraum 1971-2000 sowie Abweichungen in Bezug auf diesen Zeitraum, betrachtet.

Für die Auswertungen in diesem Kapitel wurden Temperatur und Niederschlagsmessungen der Station München-Stadt verwendet. Zusätzlich zu den gemittelten Parametern werden auch verschiedene Klimaindizes (Kenntage) gezeigt. Die für die Trendberechnung verwendeten Methoden sind im Anhang (Kapitel 2) aufgelistet, für eine detailliertere Erklärung zur Trendberechnung wird auf gängige Fachliteratur verwiesen (z.B. WILKS, 2011). Die Station München-Stadt ist repräsentativ für das Klima in der Stadt auf klimatologischen Zeitskalen. Dennoch gibt sie natürlich nur die meteorologischen Parameter an einem Ort im Stadtgebiet wieder. Kleinräumige Unterschiede, z.B. Temperaturunterschiede durch unterschiedliche Bebauungsstrukturen, können dadurch aber nicht erfasst werden. Die räumliche Temperaturvariabilität wurde deswegen durch Profilmessfahrten sowie Modellierungen im Rahmen des Kooperationsprojektes untersucht, und wird in den nachfolgenden Kapiteln 5 und 6 beschrieben. Da der Fokus dieser Studie auf den sommerlichen Temperaturverhältnissen in München lag, wurden die Modellergebnisse, die in Kapitel 6 beschrieben werden, lediglich hinsichtlich der Sommertage untersucht, da diese ein statistisch belastbares Maß für die Wärmebelastung im Stadtgebiet darstellen. Eine Validierung der Modellergebnisse zu der Anzahl von Sommertagen im Referenzzeitraum mit den Messreihen verschiedener Stationen aus dem Münchner Stadtgebiet erfolgt in Kapitel 6.1.

Wie in Kapitel 2 erläutert, ist eine Besonderheit des Stadtklimas eine positive Temperaturdifferenz zum Umland, was auch als städtische Wärmeinsel bezeichnet wird. Um die Ausprägung dieser städtischen Wärmeinsel im Stadtgebiet München zu untersuchen, wurden gemittelte Temperaturdaten sowie Temperaturkenntage der Station München-Stadt mit denen von Umlandstationen verglichen. Verwendet wurden dafür die Messungen der Flughafenstationen der ehemaligen Flugwarte München-Riem, für die Daten von 1948 bis Mitte 1992 vorliegen, sowie der Station München-Flughafen, an der seit Mitte 1992 gemessen wird. Auswertungen erfolgen immer nur für vollständig vorhandene Jahre. Genauere Informationen zu den verschiedenen in diesem Kapitel verwendeten Stationen sind in Tabelle A.1 im Anhang zu finden.

4.1 Lufttemperatur

Die durchschnittliche **Jahresmitteltemperatur** an der Station München-Stadt liegt bei 9,5 °C. Das gilt sowohl für den Referenzzeitraum (1971-2000) als auch für den gesamten Zeitraum von 1955-2018. Dabei ergeben sich jedoch deutliche jährliche Schwankungen. Die tiefste mittlere Jahrestemperatur wurde 1956 mit 7,3 °C aufgezeichnet, die wärmste mit 11,4 °C im Jahre 2018. In Abb. 4.1 ist der Verlauf der Jahresmittel der Temperatur dargestellt (schwarze Linie mit dazugehörigen Werten auf der linken Skala), der Mittelwert der Referenzperiode ist in grau markiert. Die roten und blauen Balken geben jeweils die Abweichungen vom Mittelwert

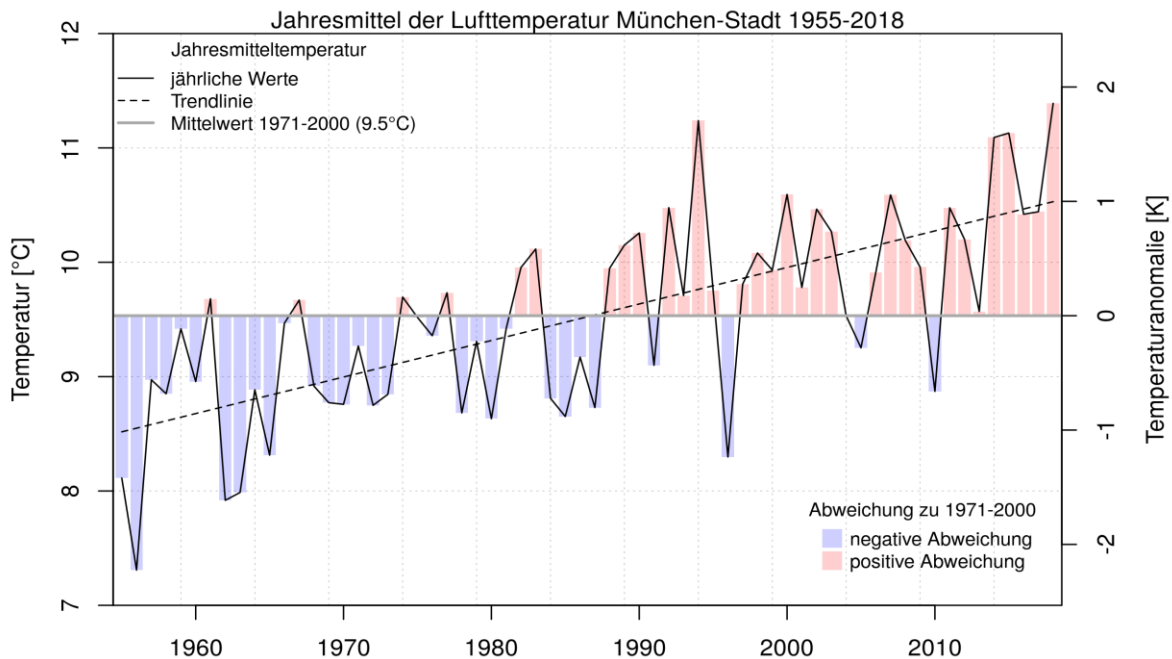


Abb. 4.1: Jahresmittel der Lufttemperatur an der Station München-Stadt für den Zeitraum 1955-2018. Zusätzlich zu den jährlichen Werten ist gestrichelt der langjährige Trend eingezeichnet. Die graue Linie markiert den 30-jährigen Mittelwert über den Referenzzeitraum 1971-2000. Die Temperaturwerte sind an der linken Skala angegeben. Die eingefärbten Balken kennzeichnen negative Abweichungen von diesem Mittelwert in blau und positive Abweichungen in rot. Die Stärke der Abweichungen (die auch als Anomalien bezeichnet werden) lässt sich an der rechten Skala der Graphik ablesen.

des Referenzzeitraumes an, wobei die Stärke der Abweichungen (was auch als Anomalie bezeichnet wird) auf der Skala an der rechten Seite der Graphik angegeben ist. Es fällt auf, dass seit 1988 hauptsächlich höhere Temperaturen im Vergleich zum Mittelwert des Referenzzeitraums (d.h. eine Häufung von roten Balken, die positive Anomalien kennzeichnen) gemessen wurden, wohingegen zum Anfang der Messreihe hauptsächlich negative Anomalien vorzufinden sind (blaue Balken). Daraus resultiert ein positiver Temperaturtrend (gestrichelte Linie) mit einer deutlichen (und statistisch signifikanten) Zunahme der Temperatur von etwa $0,31\text{ °C/Dekade}$.

Betrachtet man den gemittelten **Jahresgang der Lufttemperatur** über den gesamten Zeitraum 1955 - 2018 (Abb. 4.2), lässt sich eine Jahresfluktuation von $18,9\text{ °C}$ zwischen dem für gewöhnlich kältesten Monat Januar mit $0,1\text{ °C}$ Durchschnittstemperatur und dem normalerweise wärmsten Monat Juli mit $19,0\text{ °C}$ erkennen. Neben den mittleren Monatsmitteln zeigt das Diagramm auch den Mittelwert der höchsten bzw. tiefsten Temperatur für jeden Monat über alle 64 Jahre. Zwischen Mai und September sind im Mittel die monatlichen Minima über 0 °C wobei im Mai in einigen Jahren durchaus Temperaturen unter dem Gefrierpunkt auftreten können. Die höchsten Temperaturwerte werden im Juli und August erreicht, dort ist das Monatsmaximum im Mittel über $30,0\text{ °C}$ ($32,0\text{ °C}$ im Juli und $31,4\text{ °C}$ im August), sodass die Wärmebelastung in diesen Monaten am stärksten ist. Auch im Juni und September erreichen die mittleren Monatsmaxima noch hohe Werte ($30,1\text{ °C}$ im Juni und $27,3\text{ °C}$ im September). In einzelnen Jahren können die Spitzen der Temperatur deutlich höher ausfallen, so wurde im Jahr 1956 eine Tiefsttemperatur $-25,4\text{ °C}$ an der Station München-Stadt gemessen und im Jahr 1983 eine Höchsttemperatur von $37,5\text{ °C}$.

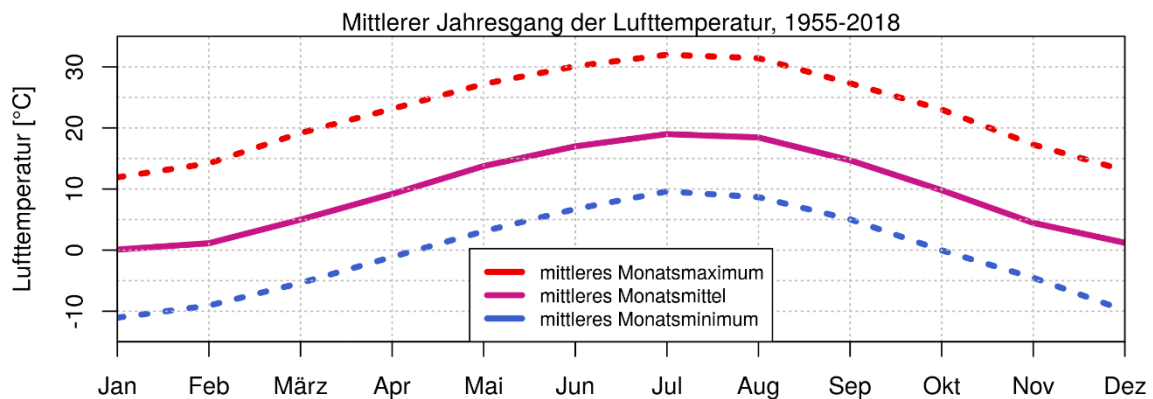


Abb. 4.2: Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur an der Station München-Stadt im Zeitraum 1971-2000.

Um das Auftreten von verschiedenen Temperaturbereichen zu beschreiben, werden oft Kennzahlen verwendet, die die Häufigkeit von Über- bzw. Unterschreitungen von festen Schwellenwerten beschreiben. Die in Abb. 4.1 deutlich erkennbare Zunahme der Temperatur spiegelt sich auch in den Zeitreihen von diesen Kennzahlen wieder.

Kenntage der Lufttemperatur

Ein **Sommertag** ist ein Tag, an dem das Tagesmaximum der Lufttemperatur mindestens 25 °C beträgt. Sommertage konnten in der Vergangenheit zwischen April und Oktober beobachtet werden. Über den gesamten Zeitraum treten im Mittel etwa 43 Sommertage pro Jahr auf, für den Referenzzeitraum 1971-2000 sind es ca. 39. Die niedrigste Anzahl von Sommertagen gab es im Jahr 1984 mit 18 Tagen, die höchste Anzahl wurde mit 88 Tagen im Jahr 2003 verzeichnet (siehe Abb. 4.3). Generell lässt sich seit Messbeginn eine deutliche (und statistisch signifikante) Zunahme der Sommertage beobachten (die gestrichelte Linie in Abb. 4.3 zeigt den Trend). Dies wird auch anschaulich, wenn man die fünf Jahre mit der höchsten Anzahl von Sommertagen betrachtet (TOP 5). Von diesen liegen alle im 21. Jahrhundert, außer 2003 sogar alle in den letzten acht Jahren.

Steigt die Tagestemperatur auf mindestens 30 °C, spricht man von **heißen Tagen**. Heiße Tage treten hauptsächlich in den Sommermonaten Juni, Juli und August auf, wobei es vereinzelt auch schon im April/Mai und September heiße Tage gegeben hat. Heiße Tage kommen für gewöhnlich in München, mit vereinzelt Ausnahmen wie z.B. in 1997 und 1978, jährlich vor (siehe Abb. 4.4). So gab es im Mittel über die gesamte Auswerteperiode (1955-2018) etwa acht heiße Tage pro Jahr, im Referenzzeitraum (1971-2000) beträgt das Mittel etwa sechs Tage pro Jahr. Die Jahre 2003 und 2015 hatten mit 31 bzw. 33 die bisher meisten heißen Tage, bis auf 1994 liegen die fünf Jahre mit der größten Anzahl an heißen Tagen alle in diesem Jahrhundert. Dies spiegelt sich auch im Trend wider (gestrichelte Linie in Abb. 4.4), der für den Zeitraum 1955-2018 eine deutliche (und statistisch signifikante) Zunahme an heißen Tagen aufweist.

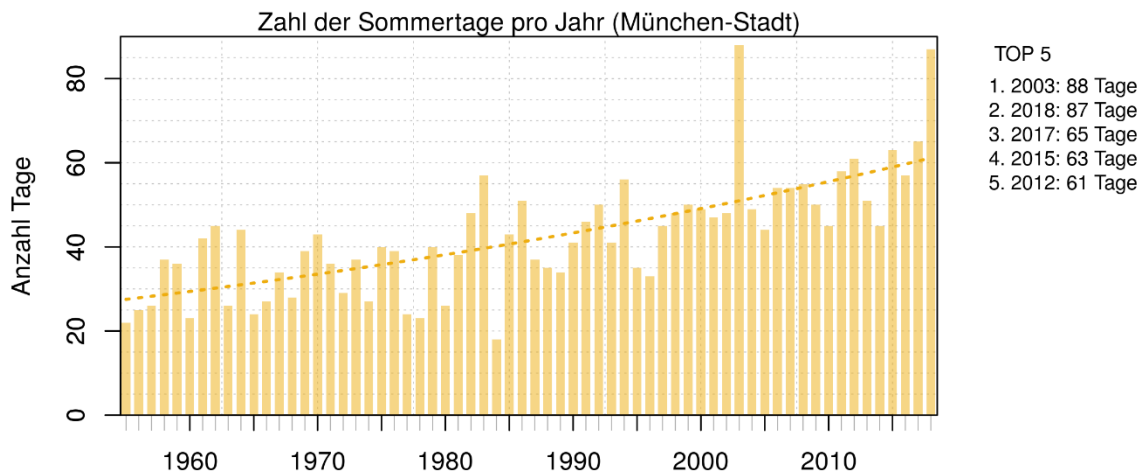


Abb. 4.3: Zahl der Sommertage pro Jahr zwischen 1955-2018 an der Station München-Stadt. Jeder Balken steht für ein Jahr der Messperiode. Zusätzlich zu den jährlichen Werten ist gestrichelt der langjährige Trend eingezeichnet. Rechts sind die fünf Jahre (TOP 5) mit der höchsten Anzahl von Sommertagen seit 1955 aufgeführt.

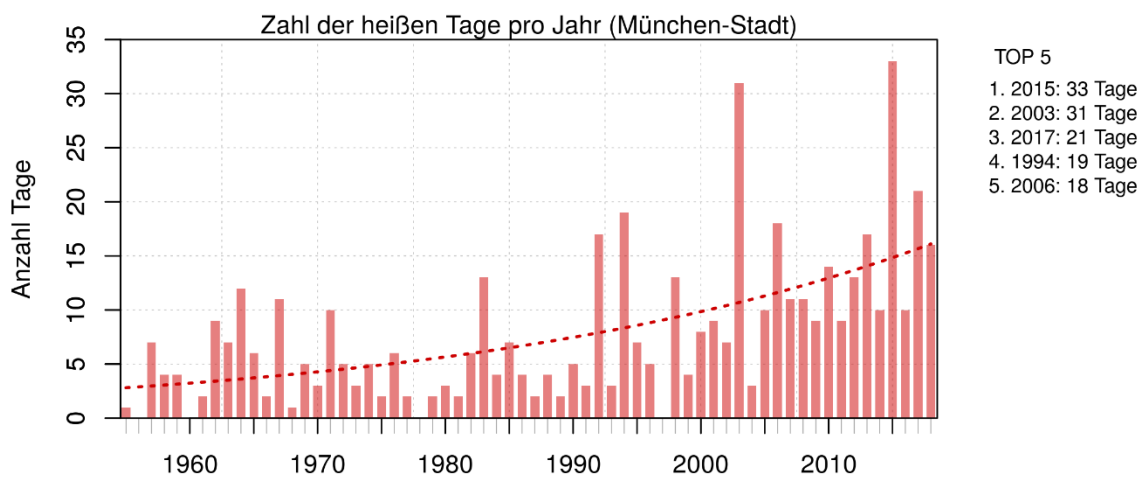


Abb. 4.4: Zahl der heißen Tage pro Jahr zwischen 1955-2018 an der Station München-Stadt. Jeder Balken steht für ein Jahr der Messperiode. Zusätzlich zu den jährlichen Werten ist gestrichelt der langjährige Trend eingezeichnet. Rechts sind die fünf Jahre (TOP 5) mit der höchsten Anzahl von heißen Tagen seit 1955 aufgeführt.

Kühlt die Lufttemperatur zwischen 19:00 und 07:00 Uhr MEZ nicht unter 20 °C ab, spricht man von einer **Tropennacht**. Die Minimumtemperatur liegt vor Juli 1994 nur als Tageswert vor, Temperaturminima der oben angegebenen Zeitspanne zur Berechnung von Tropennächten sind erst seit 1994 verfügbar. Betrachtet man den verfügbaren Zeitraum von 1994 bis 2018, ergeben sich im Mittel in etwa 2,5 Tropennächte pro Jahr. Die meisten Tropennächte traten 2003 und 2015 mit jeweils neun auf, gefolgt von den Jahren 2017, 2006 und 1994 mit fünf Tropennächten (siehe Abb. 4.5). Es gibt aber auch sechs Jahre seit 1994 in denen gar keine Tropennächte registriert wurden. Aufgrund der kurzen Zeitreihe kann für die Anzahl der Tropennächte keine eindeutige Aussage zu den klimawandelbedingten Änderungen gemacht werden und es wurde auch kein Trend berechnet.

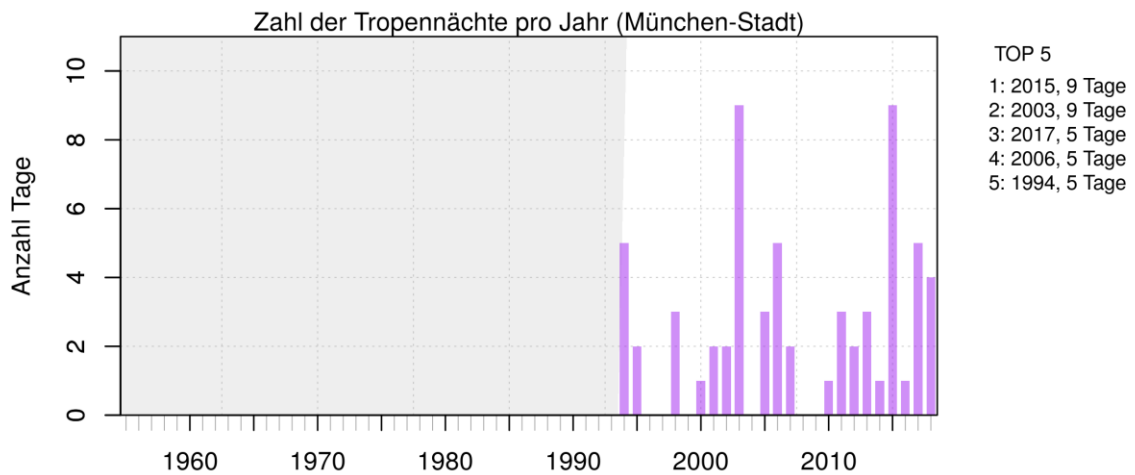


Abb. 4.5: Zahl der Tropennächte pro Jahr zwischen 1994-2018 an der Station München-Stadt. Jeder Balken steht für ein Jahr der Messperiode. Für die Jahre im grau schraffierten Bereich sind keine stündlichen Minimumtemperaturen zur Berechnung der Tropennächte verfügbar. Rechts sind die fünf Jahre (TOP 5) mit der höchsten Anzahl von Tropennächten seit 1994 aufgeführt. Ein Trend wurde aufgrund der kurzen Zeitreihe nicht berechnet.

Ein Tag mit einer negativen Tiefsttemperatur wird **Frosttag** genannt. Frosttage kommen hauptsächlich von November bis April vor, können aber auch vereinzelt im Oktober und selten im Mai (bspw. in 1985) gemessen werden. Im Mittel gab es im Referenzzeitraum etwa 78 Frosttage pro Jahr, betrachtet man die gesamte Messreihe in München-Stadt sind es im Mittel etwa 81 Tage pro Jahr. Die höchste Anzahl an Frosttagen wurde zu Messbeginn beobachtet (116 Tage im Jahr 1955), im Jahr 2014 gab es mit 32 Tagen die niedrigste Anzahl (siehe Abb. 4.6). Die Jahre mit der höchsten Anzahl an Frosttagen liegen alle vor 1996, seitdem gab es in München auch keinen Winter mehr mit mehr als 100 Frosttagen. In Übereinstimmung mit dem positiven Temperaturtrend ergibt sich für Frosttage ein (statistisch signifikanter) abnehmender Trend während des Untersuchungszeitraums (gestrichelte Linie in Abb. 4.6).

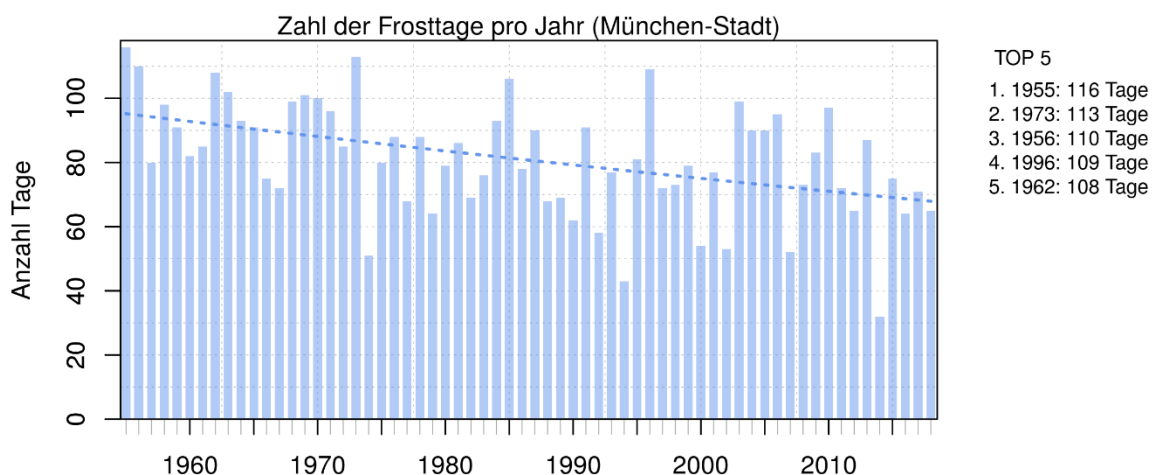


Abb. 4.6: Zahl der Frosttage pro Jahr zwischen 1955-2018 an der Station München-Stadt. Jeder Balken steht für ein Jahr der Messperiode. Zusätzlich zu den jährlichen Werten ist gestrichelt der langjährige Trend eingezeichnet. Rechts sind die fünf Jahre (TOP 5) mit der höchsten Anzahl von Frosttagen seit 1955 aufgeführt.

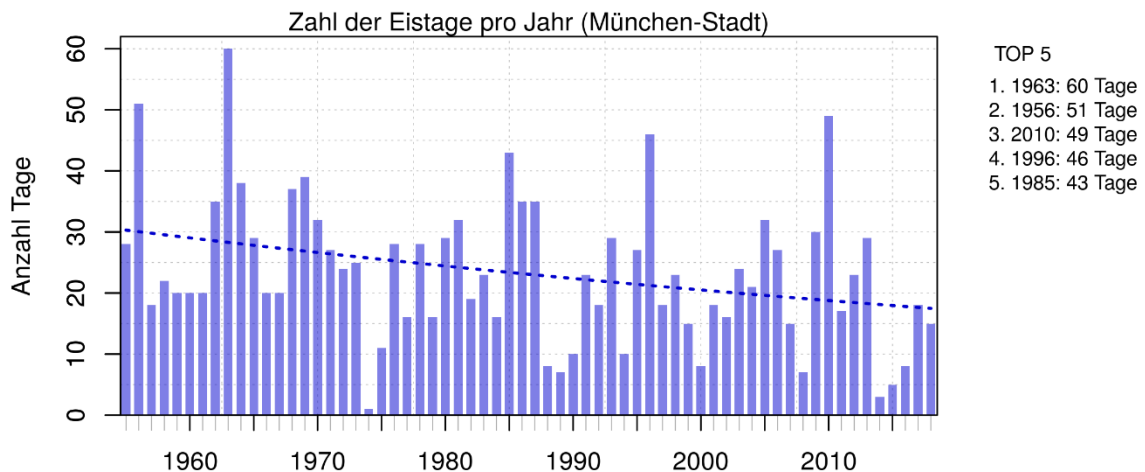


Abb. 4.7: Zahl der Eistage pro Jahr zwischen 1955-2018 an der Station München-Stadt. Jeder Balken steht für ein Jahr der Messperiode. Zusätzlich zu den jährlichen Werten ist gestrichelt der langjährige Trend eingezeichnet. Rechts sind die fünf Jahre (TOP 5) mit der höchsten Anzahl von Eistagen seit 1955 aufgeführt.

Steigt die Lufttemperatur im Laufe eines Tages nicht über 0 C, spricht man von einem **Eistag**. Durchschnittlich wurden im Referenzzeitraum ca. 22 Eistage, über die gesamte Messperiode etwa 23 Eistage pro Jahr gemessen. Mit Blick auf die einzelnen Monate treten Eistage vorwiegend von Dezember bis Februar auf. Vereinzelt können Tage mit einer negativen Höchsttemperatur auch im November, März und ganz selten, im April vorkommen. Im Jahr 1974 gab es nur einen einzelnen Eistag, während 1963 mit 60 Tagen die höchste Anzahl bestimmt wurde (siehe Abb. 4.7). Die Jahre mit den meisten Eistagen liegen ebenfalls, bis auf eine Ausnahme in 2010, vor 1996. Über den gesamten Messzeitraum ergibt sich ein (statistisch signifikanter) negativer Trend der Eistage (gestrichelte Linie in Abb. 4.7).

Die Zunahme der Mitteltemperatur und die damit verbundene Zu- bzw. Abnahme der Kenntage wird von natürlichen Schwankungen des Klimasystems überlagert, d.h. auch bei einer generellen Zunahme der Temperatur kann es immer Jahre mit einer hohen Anzahl an Eistagen (wie z.B. 2010) oder einer vergleichsweise niedrigen Anzahl an heißen Tagen (2004) geben. Aus klimatologischer Sicht, d.h. bei Betrachtung längerer Zeiträume, bei denen diese Schwankungen sich im Mittel aufheben, ist jedoch eindeutig eine Zunahme der Temperatur und damit verbunden eine Zunahme der „warmen“ Kenntage wie Sommertage und heiße Tage sowie eine Abnahme der „kalten“ Kenntage wie Frosttage und Eistage zu erkennen.

Temperaturdifferenzen zum Umland

Um den städtischen Wärmeineffekt zu untersuchen, wurden die Temperaturzeitreihen und abgeleiteten Kennzahlen der Station München-Stadt mit denen der Stationen München Riem und München-Flughafen verglichen.

In Abb. 4.8 sind die mittleren Tagesgänge der Temperatur sowie die mittlere Temperaturdifferenz zwischen München-Stadt und München-Flughafen für den Zeitraum 1998-2018 gezeigt, für den stündliche Temperaturwerte an beiden Stationen vorliegen. In beiden Abbildungen zeigt die vertikale Achse die verschiedenen Uhrzeiten und die horizontale Achse das Mittel der jeweiligen Uhrzeit über den gesamten Zeitraum für alle Tage zwischen Mai und August. Die Werte wurden geglättet, indem der Mittelwert immer über ein Zeitfenster

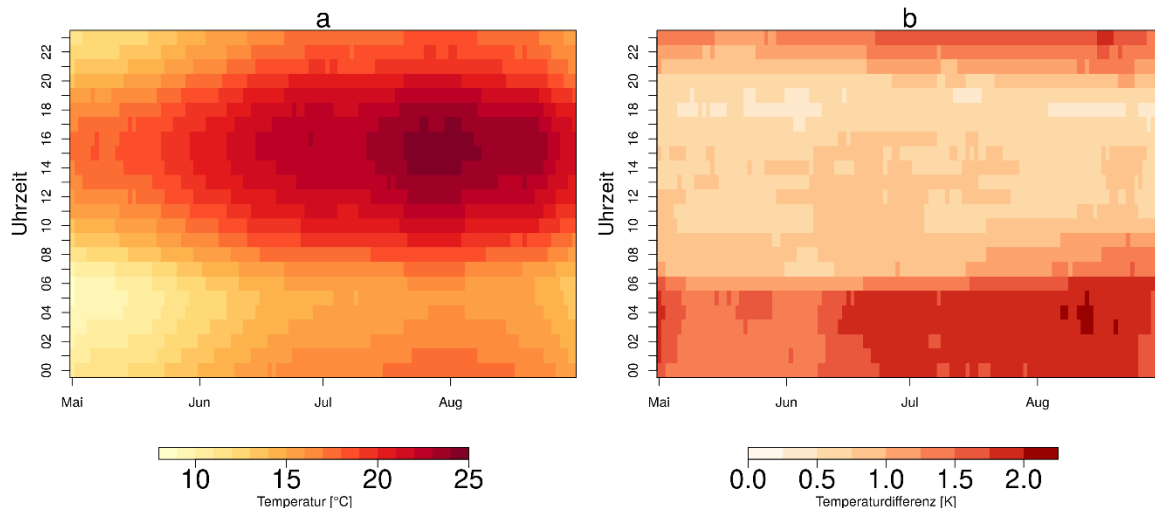


Abb. 4.8: a) Mittlerer Tagesgang der Temperatur in München-Stadt von Mai-August für den Zeitraum 1998-2018. b) Mittlerer Tagesgang der Temperaturdifferenz zwischen München-Stadt und München-Flughafen. In beiden Graphiken werden gleitende Mittel über die mittleren Stundenwerte von 15 aufeinanderfolgenden Tagen gezeigt.

von 15 Tagen berechnet wurde. Jede Spalte des Diagramms gibt somit einen mittleren Tagesgang an, d.h. die erste Spalte von unten nach oben zeigt die gemittelten Temperaturen bzw. Temperaturdifferenzen von 00:00 bis 23:00 MEZ für ein Fenster von 15 Tagen um den 1. Mai (d.h. 24. April – 8. Mai) im Zeitraum 1998-2018, die zweite Spalte für ein Fenster von 15 Tagen um den 2. Mai (d.h. 25. April – 9. Mai) usw. Diese gemittelten Werte geben den generellen Verlauf an, an einzelnen Tagen und in einzelnen Jahren können die Werte stark von diesen Mittelwerten abweichen. Temperaturunterschiede werden immer auch von weiteren Effekten wie dem lokalen Wettergeschehen am Ort der Station beeinflusst. Um auch den Einfluss der Stationshöhe auf die Temperatur zu berücksichtigen, wurden für die Abb. 4.8 die Temperaturwerte der Umlandstation mit den in KUNZ (2007) aufgeführten Korrekturfaktoren höhenkorrigiert.

Aus den mittleren Tagesgängen der Temperatur (Abb. 4.8 a) lässt sich erkennen, dass die höchsten Temperaturen etwa zwischen 13:00-18:00 MEZ auftreten. Vor allem im Juli und August sind die Temperaturen auch noch in den Abendstunden im Mittel über 20 °C. Aus der Darstellung der Temperaturdifferenzen (Abb. 4.8 b) zwischen der Station München-Stadt und München-Flughafen wird deutlich, dass **vor allem in der Nacht die Temperaturen in der Stadt höher sind** (dunkelrote Farben), wohingegen tagsüber die Differenzen meist viel kleiner sind (helle Farben). Tagsüber heizen sich Stadt und Umlandstation gleichermaßen auf und zeigen nur sehr geringe Temperaturunterschiede. Ab etwa 21:00 MEZ jedoch steigt die Temperaturdifferenz, d.h. die Temperaturen in München-Stadt sind höher, da durch den Wärmeinseleffekt keine Abkühlung im gleichen Maße wie im Umland stattfindet (die mittleren Differenzen zwischen 00:00 und 06:00 MEZ betragen etwa 1,7 K). Vor allem im August sind hohe Temperaturdifferenzen in den Nachtstunden zu erwarten (im Mittel etwa 1,9 K zwischen 00:00 und 06:00 MEZ). Es ist zu beachten, dass die Abbildung gemittelte Stundenwerte über 15 Tage und über einen 21 Jahre langen Zeitraum beschreibt, in extremen Fällen erreicht die Differenz zwischen Stadt und Land bis zu 9 K (nicht gezeigt). Vor allem während des Tages kann es auch zu negativen Differenzen, d.h. höheren Temperaturen im Umland als in der Stadt kommen.

Diese **Temperaturdifferenzen wirken sich auch auf die Kenntage aus**. In Abb. 4.9 sind die Unterschiede in der mittleren Anzahl von Kenntagen pro Jahr zwischen München-Stadt und den beiden Umlandstationen gezeigt. Die Auswertung erfolgte jeweils für die an den Umlandstationen verfügbaren Zeiträume. Da durch

den Vergleich der Effekt der städtischen Wärmeinsel ermittelt werden soll, wurden die Daten der Umlandstation, wie schon für Abb. 4.8, mit einer Höhenkorrektur versehen, um einen Einfluss der Stationshöhe auszuschließen. Daher können leichte Abweichungen zu Auswertungen entstehen, bei denen die Anzahl von Kenntagen direkt aus den gemessenen Stationsdaten ermittelt wird.

Im Mittel wird an der Station **München-Stadt eine höhere Anzahl an „warmen“ Kenntagen** im Vergleich zum Umland registriert. So beträgt die Differenz bei den Sommertagen etwa 4 Tage (München-Riem) bzw. 11 Tage (München-Flughafen) und bei den heißen Tagen 0,7 (München-Riem) bzw. 5,4 (München Flughafen). Bei den „kalten“ **Kenntagen verhält es sich genau umgekehrt**. Im Umland werden mehr Frost- und Eistage registriert. Die Anzahl der Frosttage ist um 26,5 Tage (München-Riem) bzw. ca. 39 Tage (München-Flughafen) höher, die der Eistage um knapp 7 (München-Riem) bzw. 9 Tage (München-Flughafen). Die Unterschiede zur Station München-Flughafen sind dabei im Allgemeinen deutlich höher als zur Station München-Riem. Dies ist bedingt durch die Lage der Stationen. Die höheren Temperaturen im Stadtgebiet zeigen sich generell auch im Vergleich zu anderen Stationen im Umland von München (nicht gezeigt). Zusammenfassend zeigen die Vergleiche der Temperaturen und Temperaturkennzahlen zwischen München-Stadt und Umland eine deutliche Ausprägung des städtischen Wärmeinseleffekts, der sich sowohl in höheren Temperaturen als auch in einer höheren Anzahl von „warmen“ Kenntagen und einer niedrigeren Anzahl von „kalten“ Kenntagen äußert. Die städtische Wärmeinsel ist vor allem in den Nachtstunden stark ausgeprägt.

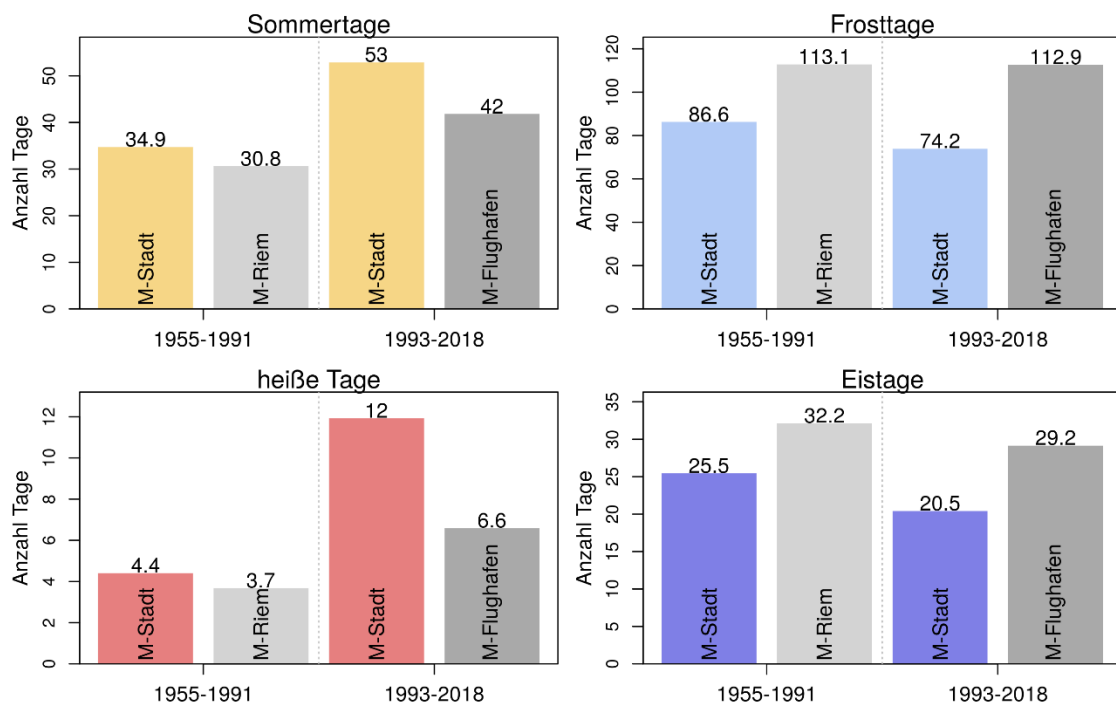


Abb. 4.9: Vergleich der Temperaturkenntage zwischen der Station München-Stadt (bunte Balken) mit der Station München-Riem (1955-1991, hellgraue Balken) und der Station München-Flughafen (1993-2018, dunkelgraue Balken). Die Balken geben die mittlere Anzahl von Kenntagen pro Jahr für den darunter genannten Zeitraum an.

4.2 Niederschlag

Abb. 4.10 zeigt die **Jahressummen des Niederschlags** für die gesamte Messreihe der Station München-Stadt. Dabei entspricht eine gemessene Niederschlagshöhe von 1 mm einer Wassermenge von 1 Liter pro Quadratmeter. Aufgrund der hohen Variabilität von Niederschlagsereignissen liegen erhebliche Abweichungen zwischen den Jahren vor. Die niedrigste jährliche Niederschlagssumme von 657 mm wurde 2003 gemessen, das Maximum im Jahr 1966 betrug 1298 mm. Positive und negative Abweichungen zu dem Mittelwert des Referenzzeitraums 1971-2000 (954 mm) sind nahezu gleich verteilt über die gesamte Messperiode. Die jährliche Niederschlagsmenge zeigt eine leicht abnehmende Tendenz, diese ist jedoch nicht statistisch signifikant, sodass in Abb. 4.10 auch keine Trendlinie eingezeichnet ist.

Wie man am mittleren **Jahresgang des Niederschlags** über den gesamten Messzeitraum erkennen kann (Abb. 4.11), fällt in den Sommermonaten der meiste Regen mit durchschnittlich etwa 123 mm pro Monat. Zwischen Oktober und März liegt die mittlere monatliche Niederschlagssumme im Vergleich nur zwischen 49 mm und 61 mm. So können, wie in Abb. 4.11 anhand der gestrichelten Linien dargestellt, Monatssummen von über 200 mm (Juni 1979 mit 277,2 mm) und solche von unter 10 mm (Januar 1997 mit 1,6 mm) auftreten. Dabei können lokale Starkniederschlagsereignisse, bzw. das Fernbleiben dieser, an einzelnen Tagen die automatische Messung an der Station und die resultierenden Werte stark beeinflussen. So wurde beispielsweise im August 1978 an einem einzigen Tag eine Niederschlagshöhe von 101,6 mm gemessen, während 1986 am regenreichsten Tag im August nur 14,1 mm gemessen wurden. Der Einfluss des Standortes der Klimastation nordwestlich des Stadtzentrums von München ist nicht zu vergessen. Aufgrund topographischer Gegebenheiten beginnen

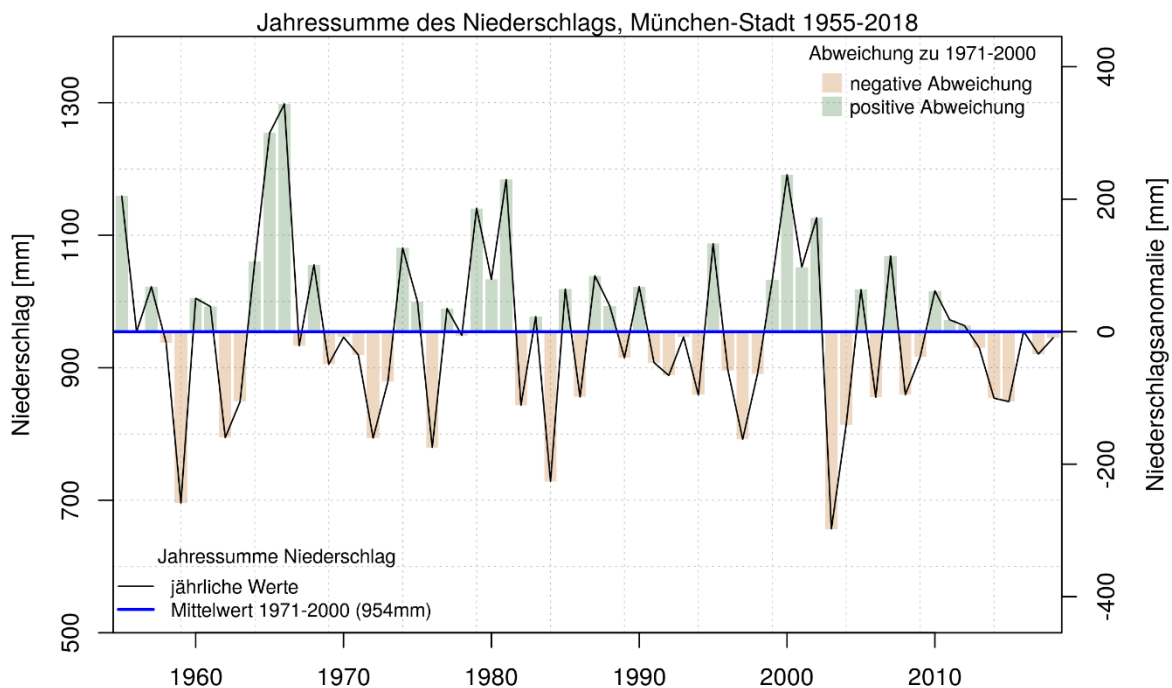


Abb. 4.10: Jahressumme des Niederschlags an der Station München-Stadt für den Zeitraum 1955-2018. Die schwarze Linie zeigt die Niederschlagssumme für jedes Jahr, die blaue Linie markiert den 30-jährigen Mittelwert über den Referenzzeitraum 1971-2000. Die Niederschlagswerte sind an der linken Skala angegeben. Die eingefärbten Balken kennzeichnen Abweichungen des Niederschlags von dem Mittel des Referenzzeitraumes, negative Abweichungen in braun und positive Abweichungen in grün. Die Stärke der Abweichungen (die auch als Anomalie bezeichnet werden) lässt sich an der rechten Skala der Graphik ablesen.

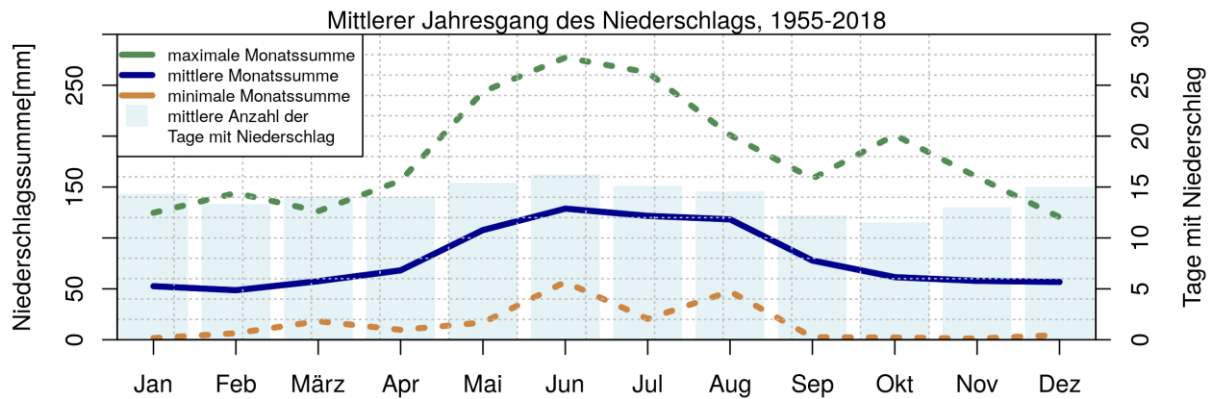


Abb. 4.11: Jahresgang des Niederschlags an der Station München-Stadt. Die Werte beziehen sich auf den Zeitraum 1955-2018. Die Balken im Hintergrund zeigen die mittlere Anzahl von Tagen mit Niederschlag > 0,1 mm pro Monat, die dazugehörige Skala ist rechts in der Graphik eingezeichnet.

Wolken sich bereits im Münchner Süden abzuregnen, was zu dementsprechend geringerem Niederschlag an der Messstation führt.

In München sind im Schnitt zwischen 12 und 16 Tage mit messbarem Niederschlag von über 0,1 mm zu erwarten, wobei das Maximum im Juni und das Minimum im Oktober und November anzutreffen ist (siehe Balken in Abb. 4.11). Betrachtet man das gesamte Jahr, sind im langjährigen Mittel zwischen 1955 und 2018 in etwa 169 Tage mit Niederschlag (von über 0,1 mm) zu erwarten, im Referenzzeitraum 1971-2000 ca. 168 Tage.

Eine detaillierte Betrachtung von Starkniederschlagsereignissen im Stadtgebiet München bedarf einer genaueren räumlichen Betrachtung unter Hinzunahme von weiteren Datenquellen. Dies stellt ein interessantes Thema für eine zukünftige Kooperation zwischen dem Deutschen Wetterdienst und der Stadt München dar, wurde jedoch in der vorliegenden Arbeit aufgrund des starken Fokus auf die Wärmebelastung nicht weiter betrachtet.

4.3 Zusammenfassung

Anhand von langjährigen Messreihen an der Station München-Stadt wurde die **langjährige Entwicklung** von Temperatur und Niederschlag und abgeleiteten Kennzahlen untersucht. Um den **städtischen Wärmeineffekt** zu untersuchen, wurden zusätzlich Temperaturen und Temperaturkennzahlen an der Station München-Stadt mit denen der Stationen München-Riem und München-Flughafen im Umland verglichen. Die Analyse der langjährigen Zeitreihen ergab folgende Ergebnisse:

- Die langjährigen Temperaturbeobachtungen an der Station München-Stadt von 1955 bis 2018 zeigen einen eindeutigen Einfluss des Klimawandels auf das Stadtklima. In dem Messzeitraum ist eine **deutliche und statistisch signifikante Zunahme der Jahresmitteltemperatur** sowie den „warmen“ Kennzahlen wie Sommertagen und heißen Tagen sowie eine Abnahme der „kalten“ Kennzahlen wie Eis- und Frosttage zu beobachten. Damit übereinstimmend kann man eine **Häufung von wärmeren Jahren bzw. Jahren mit**

einer hohen Anzahl von heißen Tagen oder Sommertagen in diesem Jahrhundert im Vergleich zu früheren Zeiträumen beobachten.

- Im Vergleich zum Umland sind im Mittel die **Temperaturen im Stadtgebiet immer höher**, vor allem in den Nachtstunden ist dieser Temperaturunterschied besonders hoch und kann an einzelnen Tagen bis zu 9 K für die hier verglichenen Stationen betragen. Dies spiegelt sich auch in der Anzahl der Kenntage wider, es gibt im Mittel mehr „warme“ Kenntage an der Station München-Stadt – „kalte“ Kenntage werden häufiger im Umland registriert.
- Der Niederschlag an der Station München-Stadt zeigt eine hohe Variabilität mit Werten zwischen etwa 650 mm bis 1300 mm. Statistisch signifikante Zu- oder Abnahmen lassen sich jedoch nicht feststellen. Eine räumlich differenzierte Betrachtung von Starkniederschlägen stellt ein mögliches Thema für eine zukünftige Kooperation zwischen RGU und DWD dar.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Klimawandel in München anhand der langjährigen Messreihen bereits deutlich nachweisbar ist und dass die Stadt aufgrund der durch den Wärmeinseleffekt höheren Temperaturen generell schon eine höhere Wärmebelastung erfährt, was sich vor allem in den Nachtstunden bemerkbar macht.

5 Ergebnisse der temporären Messungen zu stadtklimatischen Besonderheiten

5.1 Temperatur-Profilmessfahrten

Um Daten zum Wärmeinseleffekt in München zu erheben, wurden Fallstudien in Form von Profilmessfahrten mit einem Messfahrzeug durchgeführt, welches bei langsamem Fahrtempo (ca. 20 km/h) im Sekundentakt Lufttemperatur und Luftfeuchte misst und zusammen mit einem GPS-Signal registriert. Wie in Abb. 5.1 zu sehen, sind die Messsensoren an einem Ausleger vor dem Fahrzeug in 2 m über Grund befestigt. Damit können Temperatur- und Feuchteprofile längs der ausgewählten Fahrstrecken erstellt werden. Da innerhalb der Bebauung bzw. innerhalb eines Stadtgebietes die Verhältnisse auf einem engen Raum stark variieren, können Profilmessungen entlang ausgewählter Fahrstrecken stationäre Messungen ergänzen.

In München wurden vier festgelegte Routen Anfang Juli 2015 an zwei aufeinanderfolgenden Tagen jeweils vier Mal befahren (siehe Abb. 5.2). Die Routen wurden so ausgewählt, dass der Temperaturunterschied zwischen Innenstadt und Stadtrand (städtischer Wärmeinseleffekt) und zwischen dichter Bebauung und Grünflächen besonders gut erkennbar ist. Damit wird ein möglichst großer Teil der Stadt abgedeckt und eine Abbildung von möglichst unterschiedlichen, überwärmten und kühlen Gebiete, erreicht.

Um den Wärmeinseleffekt erfassen zu können, fanden die Fahrten am frühen Abend und während der Nacht statt, da die Temperaturdifferenz in den Abend- und Nachtstunden generell am größten ist (siehe Kapitel 2 und 4.1). Da sich während der Profilmessfahrt die Lufttemperatur im Laufe der Nacht ändert, wurden die einzelnen Routen nicht zu lang gewählt (Abb. 5.2). Die Routen wurden in Ost-West-Routen und eine Nord-Süd-Route eingeteilt, um Unterschiede innerhalb der Stadt, sowie vom Stadtrand zur Innenstadt abbilden zu können. Wetterlagen, bei denen sich eine besonders starke städtische Wärmeinsel bildet, sind in der Regel durch eine geringe Bewölkung und geringe Windgeschwindigkeiten gekennzeichnet. Begünstigt wird die Ausbildung der städtischen Wärmeinsel zudem durch eine länger anhaltende starke Einstrahlung und entsprechende Temperaturen (Schönwetterperiode).



Abb. 5.1: Profilmessfahrzeug mit Sensoren zur Messung von Temperatur und Feuchte.

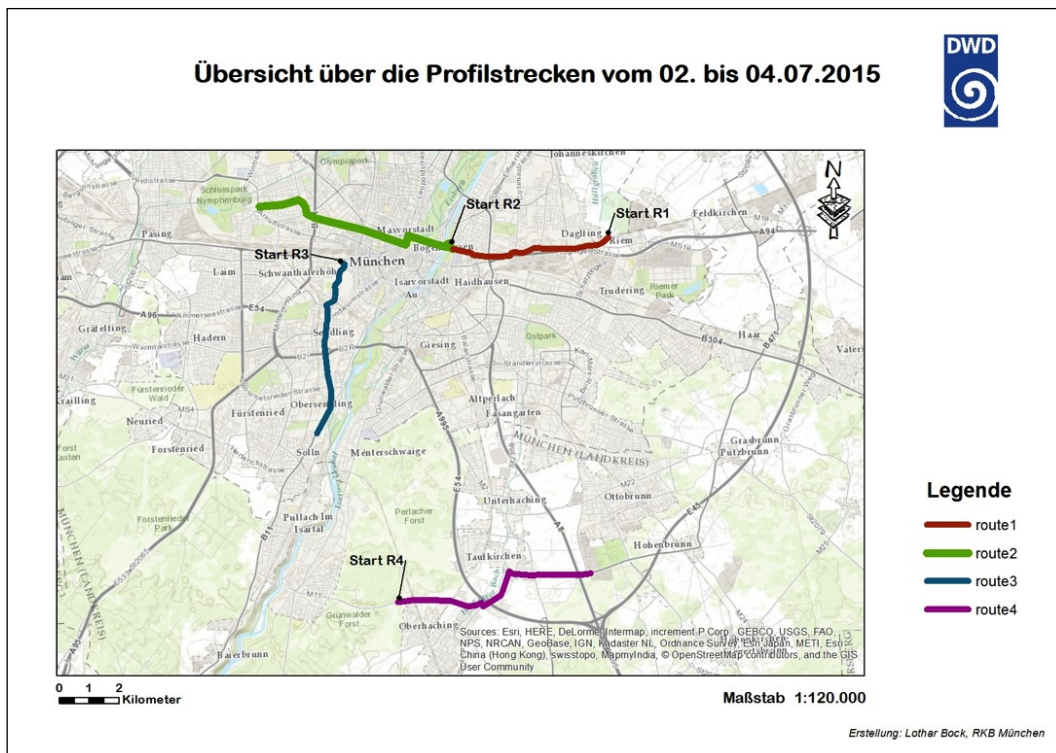


Abb. 5.2: Verlauf der vier Messrouten.

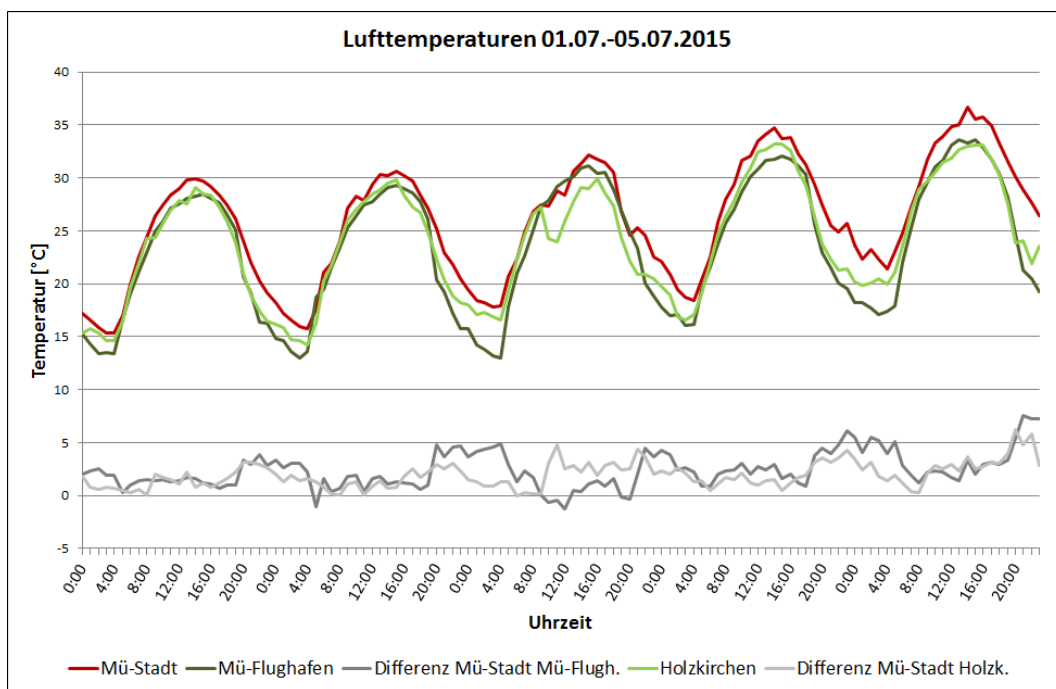


Abb. 5.3: Tagesgänge der Lufttemperatur (°C) vom 01.07.-05.07.15 an den Stationen DWD München-Stadt, München Flughafen und Holzkirchen (Daten bereitgestellt durch DWD 2016). Die horizontale Achse zeigt die Uhrzeit (MEZ) an, die vertikale Achse in Lufttemperatur in °C.



Abb. 5.4: Nächtliche Temperaturverteilung im Stadtgebiet zum Zeitpunkt der nächtlichen Profilmessfahrt am 02./03.07.2015, dargestellt als Differenz der Lufttemperatur zur DWD-Station München-Stadt. Die Zeitangaben der Graphik sind in MESZ angegeben (MEZ+1).

In Abb. 5.3 ist der Temperaturverlauf vom 01.07. bis 05.07.2015 für die Messstation München-Stadt und Stationen in Umland dargestellt. Erkennbar ist, dass bereits vor den Tagen der Profilmessfahrten Witterungsbedingungen bestanden, die die Ausbildung der städtischen Wärmeinsel begünstigten. Der städtische Wärmeinseleffekt mit einem deutlichen nächtlichen Temperaturgefälle zwischen Stadt (Station München-Stadt) und Umland (Holzkirchen, Flughafen) wird in dieser Abbildung deutlich sichtbar.

Die Temperaturunterschiede innerhalb des Stadtgebiets am Beispiel von einer der vier Profilmessfahrten sind in Abb. 5.4 dargestellt. Um die Ergebnisse für die verschiedenen Messzeitpunkte vergleichbar zu machen, wurde eine Zeitkorrektur bei den Temperaturmessungen vorgenommen. Wie im Temperaturverlauf an der Station München-Stadt zu erkennen ist, verändert sich die Lufttemperatur im Laufe des Abends/der Nacht und

damit auch während der Profilfahrt (siehe Abb. 5.5). Um dem Rechnung zu tragen, werden in Abb. 5.4 Temperaturdifferenzen zwischen der jeweiligen Temperatur der Messfahrt und dem zeitgleichen Messwert der DWD-Station München-Stadt gezeigt. Dies macht es leicht, die relativ dazu wärmeren bzw. kälteren Gebiete

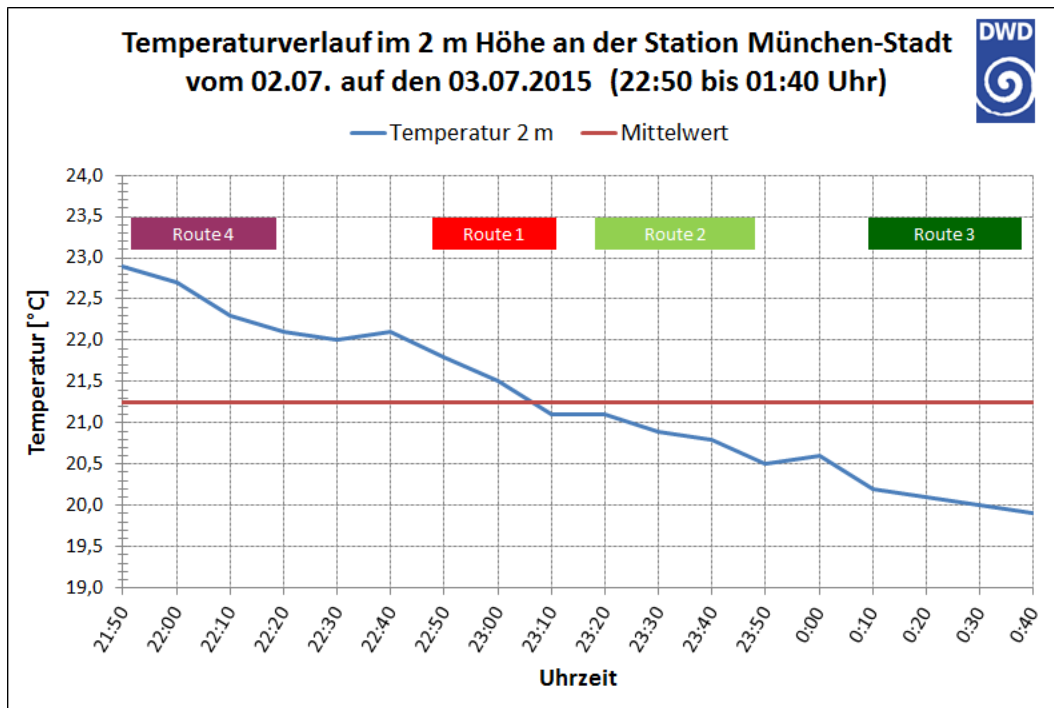


Abb. 5.5: Temperaturverlauf (°C) an der Station München-Stadt und Zeiträume der nächtlichen Profildfahrten. Die horizontale Achse zeigt die Uhrzeit in MESZ (MEZ+1) an, die vertikale Achse die Lufttemperatur in C.

eindeutig identifizieren zu können. Trotz dieser Temperaturkorrektur ergibt sich ein gewisser Fehler in der Auswertung, dies sollte bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt und kleinere Temperaturdifferenzen nicht überwertet werden. Höhenkorrekturen der Temperatur wurden aufgrund der geringen Höhendifferenzen entlang der Routen nicht vorgenommen.

Die Station München-Stadt kann aufgrund ihrer Lage als Stadtklimastation eingestuft werden, d.h. als Station, die die Verhältnisse innerhalb der städtischen Bebauung (sprich Wärmeinsel) abbildet. Im Verhältnis dazu am kältesten ist die Profilstrecke am südlichen Stadtrand von München (Route 4). Die Messungen zeigen, dass die dicht bebauten Bereiche im Stadtzentrum wesentlich wärmer sind als locker bebaute bzw. gut durchlüftete Bereiche. Deutlich erkennbar sind auch der Abkühlungseffekt von großen Grünflächen (z.B. Englischer Garten) und die wesentlich kühleren Bedingungen im Umland.

Für alle folgenden Auswertungen werden auch Temperaturdifferenzen betrachtet, jedoch nicht in Bezug auf die Station München-Stadt, sondern jeweils zur tiefsten gemessenen Lufttemperatur (T_{\min}) auf den vier Profilstrecken, eine Zeitkorrektur erfolgte nicht. Diese ist, neben den Startzeiten der vier Routen und der Uhrzeit des Sonnenuntergangs, für die vier Messfahrten in Tabelle 5.1 angegeben. Die Uhrzeiten sind in MEZ angegeben, die tatsächliche Sommerzeit erhält man durch Addition einer Stunde. Die vierte Strecke (Profilstrecke 2) wurde zur besseren Anschaulichkeit für die Auswertung an die Profilstrecke 1 angehängt und erscheint daher in der Auswertung nicht gesondert.

Tabelle 5.1: Startzeit der vier Routen für die vier Messfahrten zwischen 02.07. und 04.07.2015 Die Startzeit der jeweiligen Messfahrt ist in rot angegeben. Zusätzlich aufgeführt sind die Uhrzeit des Sonnenuntergangs sowie das Minimum der Temperatur während der jeweiligen Messfahrt und auf welcher der vier Routen diese gemessen wurde. Alle Zeiten sind in MEZ angegeben.

Datum	Sonnenuntergang	T _{min} in °C (Route)	Route 1	Route 2	Route 3	Route 4
02.07.15 (abends)	20:17	22,1 (R3)	19:29	19:53	20:59	18:25
02./03.07.15 (nachts)	20:17	17,1 (R3/R4)	22:54	23:20	00:13	21:57
03.07.15 (abends)	20:17	21,4 (R4)	20:34	21:03	18:59	19:40
03./04.07.15 (nachts)	20:17	16,7 (R4)	00:12	00:34	22:22	23:07

5.1.1 Routen 1 und 2: Ost-West (München-Riem - Schloss Nymphenburg):

Die Route verlief von der Galopprennbahn München-Riem entlang der A94 am Friedensengel vorbei über die Isar, tangierte das südliche Ende des Englischen Gartens und führte durch das Museumsviertel bis zum Schloss Nymphenburg. Auf dieser Ost-West verlaufenden Strecke sind die kleinräumigen Temperaturunterschiede je nach Landnutzung und Bebauungsdichte deutlich erkennbar. Auf allen vier Messfahrten ist ein Abkühlungseffekt durch den Englischen Garten als große innerstädtische Grünfläche in Verbindung mit der Isar erkennbar (zwischen 2 bis 4 K gegenüber den dicht bebauten Stadtbereichen westlich, in Extremfällen kann dieser Effekt auch größer sein).

I. 02.07.2015 abends: R1 19:29 MEZ, R2 19:53 MEZ, T_{min}=22,1 °C auf R3 (Abb. 5.6):

Fast auf der gesamten Strecke ist die Temperatur mindestens 3 K höher als die tiefste gemessene Temperatur. Das liegt am Verlauf der Strecke durch größtenteils dicht bebauten Gebiet. Nur am Rand des Englischen Gartens ist die Temperaturdifferenz mit etwa 2 K geringer. In den am dichtesten bebauten Streckenabschnitten ist es um 5,5 K wärmer.

II. 02.07. / 03.07.2015 nachts: R1 22:54 MEZ, R2 23:20 MEZ, T_{min}=17,3 °C auf R3 und R4 (Abb. 5.7):

In der Nacht ist der Unterschied zwischen dichter und lockerer Bebauung sehr deutlich erkennbar. Auf dem ersten Teil der Strecke ist die Temperatur nur etwa 1-2 K höher als die bei diesen Fahrten tiefste Temperatur. Das locker bebaute Gebiet mit einigen Grünflächen dort kühlt in der Nacht schneller aus, als im Vergleich der nächste Streckenabschnitt, der durch dichte Bebauung führt. Auf den zwei Kilometern bis zur Isar ist die Temperatur durchgängig mindestens 5 K höher als das Temperaturminimum. Die Abschnitte über den Fluss und am Englischen Garten vorbei heben sich mit ihrem deutlich geringeren Temperaturunterschied von nur 1 K bis maximal 3 K ab. Sobald die Strecke in das dicht bebauten

Museumsviertel und durch Wohngebiete führt, steigt die Temperatur rasch auf eine Differenz von über 6 K an. Mit dem Eintritt in das Viertel Nymphenburg-Neuhausen mit seinen einzeln stehenden Häusern mit Grünflächen sinkt die Temperatur wieder leicht und ist etwa 3 K höher als der tiefste Wert.

III. 03.07.2015 abends, R1 20:34 MEZ, R2 21:03 MEZ, $T_{\min}=21,4\text{ °C}$ auf R4 (Abb. 5.8):

Diese Profifahrt zeigt im Gegensatz zu der ersten abendlichen Fahrt am Vortag mehr Unterschiede zwischen den locker bebauten Arealen mit Grünflächen und der dichten Bebauung. Dies ist der stärkeren Aufheizung der Gebäude- und versiegelten Fläche im Laufe der Andauer einer Wärmeperiode geschuldet. Die Differenz zu kühleren Bereichen wird somit größer.

IV. 03.07. / 04.07.2015, nachts, R1 00:12, R2 00:34 MEZ, $T_{\min}=16,4\text{ °C}$ auf R4 (Abb. 5.9):

Die in dieser Nacht am Stadtrand gemessene tiefste Temperatur von $16,4\text{ °C}$ wird auf dieser ganzen Profifahrt eindeutig überschritten. Trotzdem erkennt man eine Differenz zwischen den verschiedenen Bebauungsdichten und dem Grünflächenanteil. Am höchsten ist die Temperatur auf den Streckenabschnitten westlich der Isar und ab dem Museumsviertel mit über 6 K Unterschied zur Minimumtemperatur der Messfahrt.

5.1.2 Route 3: Nord-Süd (Theresienwiese - Bahnhof Solln):

Diese Route startet am nördlichen Ende der Theresienwiese. Sie führt 6 km nach Süden aus dem Kernstadtbereich heraus in die ländlichere Vorstadt bis auf die Höhe des Bahnhofs Solln.

I. 02.07.2015, abends, 20:59 MEZ, $T_{\min}=22,1\text{ °C}$ auf R3 (Abb. 5.6):

Auf der ersten Hälfte der Fahrt ist die Temperatur fast durchgängig etwa 3 K wärmer als T_{\min} . Nur ein kurzer Abschnitt entlang der Theresienwiese ist etwas kühler. Auf der zweiten Hälfte der Strecke nimmt die Temperatur kontinuierlich ab je weiter die Route in die ländliche Vorstadt führt. Am Ziel ist der Unterschied nur noch bei 0,5 K zur tiefsten Temperatur.

II. 02.07. / 03.07.2015, nachts, 00:13 MEZ, $T_{\min}=17,3\text{ °C}$ auf R3 und R4 (Abb. 5.7):

Auf dieser Fahrt ist der Unterschied zwischen der nördlichen und der südlichen Hälfte der Strecke sehr klar. Im dicht bebauten Abschnitt ist die Temperatur durchgehend etwa 3-4 K höher als die niedrigste Temperatur und ab der Hälfte der Strecke nimmt die Differenz wieder kontinuierlich ab. Dabei wird der tiefste Temperaturmesswert dieser Messreihen am südlichen Ende der Profifahrt erreicht.

III. 03.07.2015, abends, 18.59 MEZ, $T_{\min}=21,4\text{ °C}$ auf R4 (Abb. 5.8):

Wie auch bei der Betrachtung der Route 1 sind an diesem Abend die Differenzen zur tiefsten Lufttemperatur deutlich ausgeprägter. Die Route 3 ist an diesem Abend die wärmste, da im Gegensatz zu den Fahrten am 02.07. die Route für die Profifahrten mit Route 3 startete und daher auf dieser Route noch Temperaturwerte um die 28 °C erreicht wurden. Aufgrund der gerade erst einsetzenden abendlichen Abkühlung sieht man sehr gut die allgemeine Erwärmung der Stadtbereiche. Die größeren Temperaturunterschiede

entlang der Nord-Süd-Route am 02.07. zeigen, dass sich die weniger dichten bzw. nur locker bebauten Areale am Abend deutlich schneller abkühlen, obwohl tagsüber ähnliche Temperaturverhältnisse erreicht wurden wie in den Innenstadtbereichen.

IV. 03.07. / 04.07.2015, 22.22 MEZ, $T_{\min}=16,4$ C auf R4 (Abb. 5.9):

Diese Fahrt ist analog zur anderen nächtlichen Fahrt aufgebaut, allerdings ist der Temperaturunterschied zur Mindesttemperatur mit bis zu 6 K auf der ersten Hälfte der Strecke um einiges höher. Die Temperaturabnahme auf der zweiten Hälfte erfolgt gleichmäßig von 4 K zu 2,5 K Differenz. Auch hier sieht man deutlich, dass die Innenstadtbereiche nachts nach sommerlichen Hitzeperioden deutlich weniger und viel langsamer abkühlen als Randbereiche oder Umlandbereiche. Am 03.07. erreichten die Lufttemperaturen tagsüber Werte von 32 bis 33 °C, der Tag war damit wärmer als die Vortage. Daher ist der städtische Wärmeinseleffekt nochmals klarer ausgebildet als am 02.07.2015.

5.1.3 Route 4: West-Ost (äußerster südlicher Stadtrand):

Die vierte Strecke liegt außerhalb der Innenstadt am südlichen Rand von München. Die Route verläuft vom Grünwalder Forst aus Richtung Osten durch größtenteils landwirtschaftlich genutztes Gebiet sowie lockere Bebauung und wurde im Bereich des Autobahnkreuzes Taufkirchen Ost beendet.

I. 02.07.2015, abends, 18.25 MEZ, $T_{\min}=22,1$ C auf R3 (Abb. 5.6):

Am 02.07. starten die Fahrten zu den Profilrouten auf dieser Route 4, daher hat die abendliche Abkühlung noch nicht vollständig eingesetzt. Man erkennt, dass auch die südlichen Stadtrandbereiche deutlich von der sommerlich warmen Witterung betroffen sind. Entlang der Route ergibt sich je nach Bebauungsdichte eine Abweichung von etwa 2,5 bis 5,5 K zum kühlfsten Punkt auf den Routen.

II. 02.07. / 03.07.2015, nachts, 21.57 MEZ, $T_{\min}=17,3^{\circ}\text{C}$ auf R3 und 4 (Abb. 5.7):

Deutlich sichtbar ist, dass sich die Grünflächen und Forstgebiete schneller abkühlen als die Siedlungen. So besteht zwischen diesen Landnutzungstypen ein Temperaturgradient von etwa 3 K. Die Differenz zu T_{\min} liegt an den wärmsten Arealen bei 3,5 K. Im Laufe dieser Route wird das Temperaturminimum bei dieser Messserie erreicht. Man sieht sehr deutlich, wie rasch die Flächen entlang dieser Route im Laufe des Abends/der Nacht gegenüber den Messungen am früheren Abend abkühlen.

III. 03.07.2015, abends, 19:40 MEZ, $T_{\min}=21,4^{\circ}\text{C}$ auf R4 (Abb. 5.8):

Auch auf dieser Fahrt stechen die land- und forstwirtschaftlich genutzten Gebiete heraus. Generell ist der Temperaturunterschied aber geringer als in den dicht besiedelten Kernstadtbereichen. Daran ist erkennbar, dass die Abkühlung entlang dieser Route annähernd gleichmäßig erfolgt. Die höchste gemessene Differenz in den Siedlungen beträgt hier 4 K, größtenteils bewegt sie sich aber zwischen 1 und 3 K.

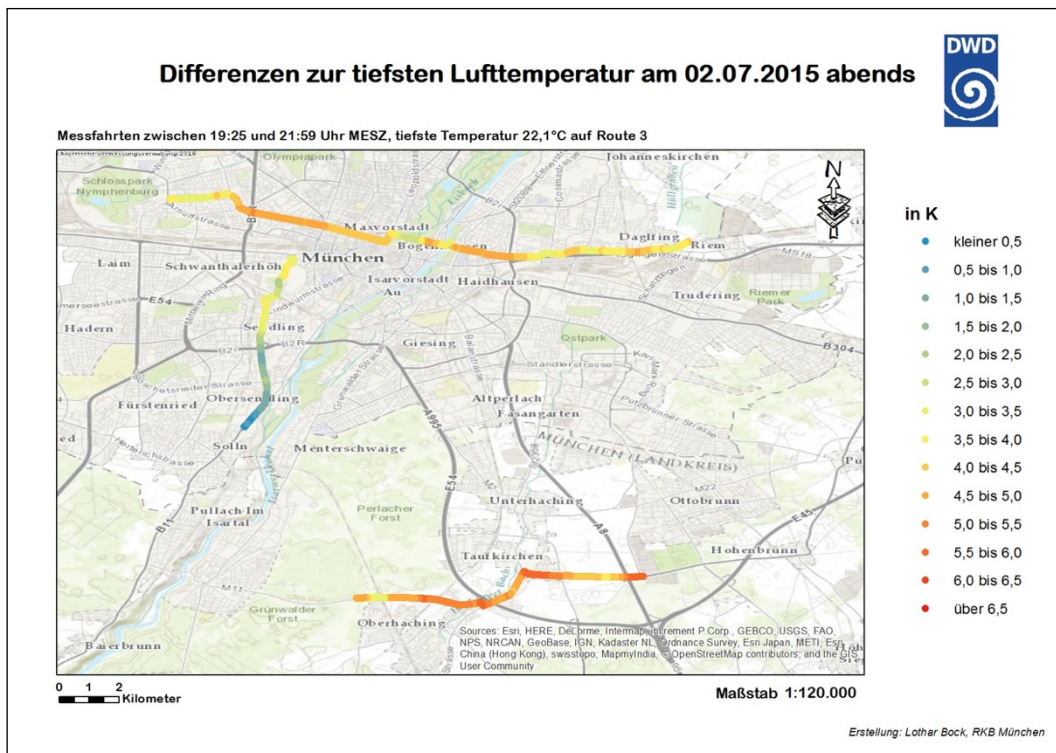


Abb. 5.6: Ergebnisse der Profilmessfahrt am 02.07.15 abends; Darstellung der Temperaturverläufe als Differenz zur tiefsten Lufttemperatur, die während der vier Routen gemessen wurde (Start: Route 4; $T_{\min}=22,1^{\circ}\text{C}$ auf Route 3, siehe auch Tabelle 5.1).

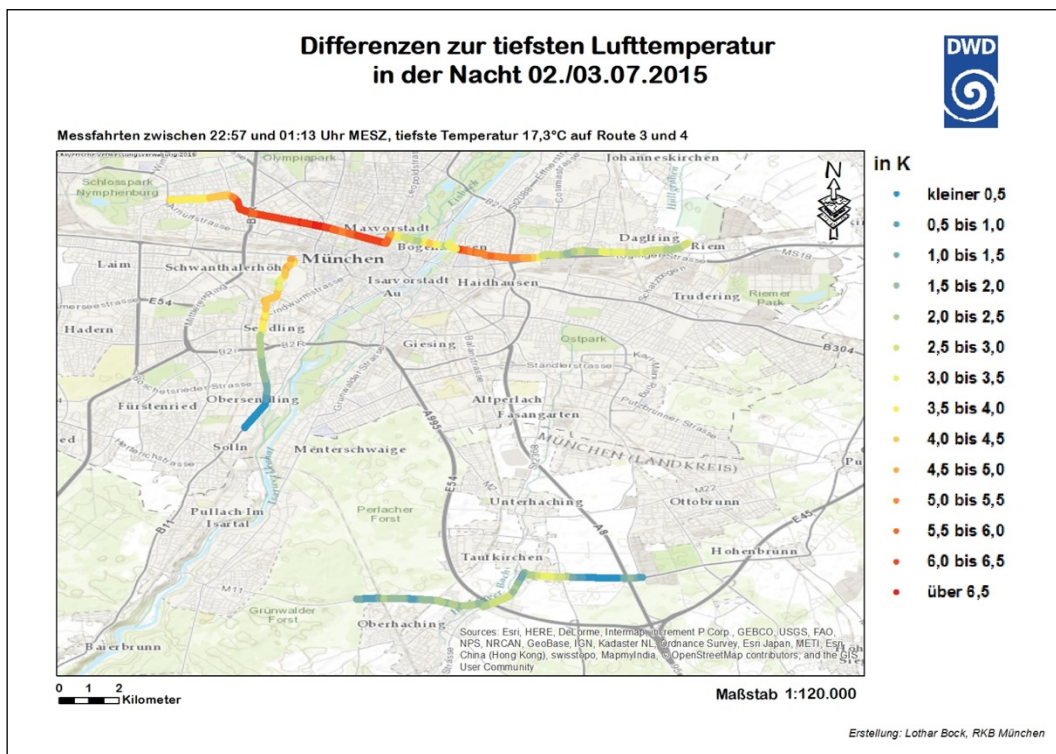


Abb. 5.7: Ergebnisse der Profilmessfahrt in der Nacht 02.-03.07.2015; Darstellung der Temperaturverläufe als Differenz zur tiefsten Lufttemperatur, die während der vier Routen gemessen wurde (Start: Route 4; $T_{\min}=17,3^{\circ}\text{C}$ auf Route 3 und 4, siehe auch Tabelle 5.1).

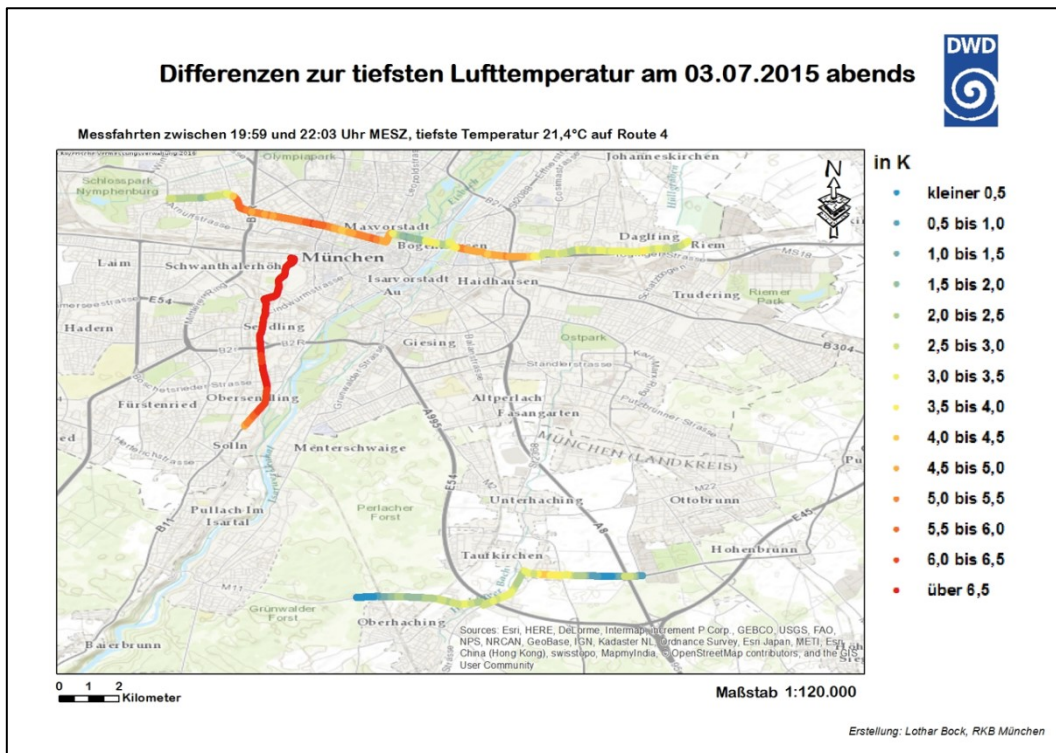


Abb. 5.8: Ergebnisse der Profilmessfahrt am 03.07.15 abends; Darstellung der Temperaturverläufe als Differenz zur tiefsten Lufttemperatur, die während der vier Routen gemessen wurde (Start: Route 3; $T_{\min}=17,3\text{ °C}$ auf Route 3 und 4, siehe auch Tabelle 5.1).

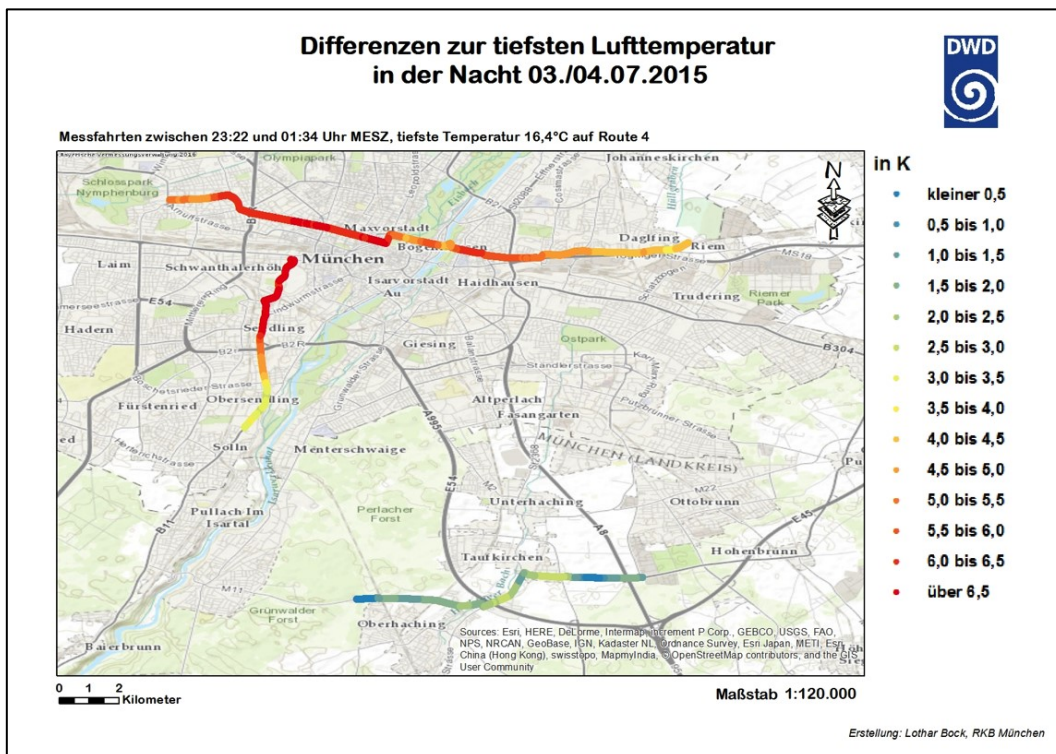


Abb. 5.9: Ergebnisse der Profilmessfahrt in der Nacht 03.-04.07.2015; Darstellung der Temperaturverläufe als Differenz zur tiefsten Lufttemperatur, die während der vier Routen gemessen wurde (Start: Route 3; $T_{\min}=16,4\text{ °C}$ auf Route 4, siehe auch Tabelle 5.1).

IV. 03.07. / 04.07.2015, nachts, 23:07 Uhr MESZ, $T_{\min}=16,4^{\circ}\text{C}$ auf R4 (Abb. 5.9):

Der Temperaturunterschied zur Mindesttemperatur auf dieser Profifahrt ist sehr gering - das Temperaturminimum wird dementsprechend auch auf dieser Route erreicht - und beträgt in den Siedlungen maximal 2 K. Im Forst und auf den Grünflächen liegt er unter 0,5 K. Der Gegensatz zur dicht bebauten Kernstadt ist sehr groß und beträgt teilweise über 6,5 K.

5.1.4 Zusammenfassung

Die Profilmessfahrten zeigen am Abend und vor allem in der Nacht ein deutlich strukturiertes Temperaturfeld, mit den **höchsten Temperaturen in der Innenstadt und den tiefsten Temperaturen in den südlichen Randbereichen** des Stadtgebiets, vor allem in den Freiflächen sowie Waldarealen. Ferner können folgende Aussagen getroffen werden:

- Nachts treten Temperaturdifferenzen von über 6,5 K auf. Deutlich erkennbar ist auch der Abkühlungseffekt großer Grünflächen wie dem Englischen Garten. Hier ist ein Temperaturunterschied von bis zu 4 K im Vergleich zu den dicht bebauten Bereichen erkennbar.
- Am früheren Abend sind diese Strukturen nicht so klar erkennbar, da tagsüber die Unterschiede innerhalb des Stadtgebiets nicht so groß sind (vergleiche auch Kapitel 4.1). Dennoch zeigen auch hier Waldbereiche im Süden der Stadt kühlere Temperaturen.

Messungen mittels Profifahrt geben die Verhältnisse an einem konkreten Tag mit großer Detailgenauigkeit wieder. Grundsätzlich gelten diese Ergebnisse aber auch nur für den jeweiligen Tag. Wie bei den Messungen an den zwei aufeinanderfolgenden Tagen zu sehen ist, kann sich das Temperaturniveau im Laufe einer Witterungsperiode bereits deutlich ändern. Damit können Temperaturunterschiede und auch die Strukturen zwischen Stadt und Umland bereits verschieden sein. Die Ergebnisse passen jedoch qualitativ zu denen von BRÜNDL (1980), der ebenfalls einen starken Abkühlungseffekt von Grünflächen innerhalb des Stadtgebietes gemessen hat. Im Zuge dieses Projektberichtes werden auch Modellsimulationen betrachtet, bei denen sich die absolute Temperaturverteilung aufgrund der oben beschriebenen Gründe von den hier beschriebenen Ergebnissen etwas unterscheiden.

Aus den oben genannten Gründen ist es für eine Stadtklimauntersuchung empfehlenswert, nicht nur einzelne Fallstudien zu untersuchen, sondern mithilfe von Modellsimulationen Klimatologien zu erstellen und diese mit temporären Messungen zu ergänzen – so wie es in diesem Projekt geschehen ist.

5.2 Temporäre Windmessungen

Lugauer und Winkler haben bereits als Beitrag zum VERTIKATOR-Projekt einen Einfluss des Alpenen Pumpens bis hin zur Donauebene anhand von Windmessungen nachgewiesen (LUGAUER 2003, LUGAUER und WINKLER 2005). In der Stadtumgebung südlich von München gab es jedoch zu dem Zeitpunkt der Studie keine Windbeobachtungen. Im Rahmen des Kooperationsprojektes zwischen der Landeshauptstadt München und dem Deutschen Wetterdienst wurden deswegen temporäre Messstationen südlich von München aufgestellt, womit eine detailliertere Betrachtung des thermischen Windsystems in der Umgebung von München möglich ist. Die Analyse der Windverhältnisse für diese temporären Messungen sowie einen Überblick für das gesamte Alpenvorland für die Jahre 2013-2015 wird in den folgenden Kapiteln dargestellt. Zusätzlich findet sich eine Auswertung der Temperaturverhältnisse an Tagen mit Alpinem Pumpen während des Messzeitraums.

5.2.1 Identifikation der Tage mit Alpinem Pumpen aus Stationsdaten

Zur Analyse der Windverhältnisse an Tagen mit Alpinem Pumpen müssen diese zunächst für den Untersuchungszeitraum identifiziert werden. Wie schon in Abschnitt 2.3 beschrieben, wurde in früheren Studien die solare Einstrahlung als wichtigster Faktor für das Auftreten von Alpinem Pumpen genannt und eine Tagessumme der solaren Einstrahlung (Globalstrahlung) von $\geq 20 \text{ MJ/m}^2$ als sehr günstige Bedingung für das Auftreten von Alpinem Pumpen bestimmt (LUGAUER und WINKLER 2005). Zudem ermittelten Lugauer und Winkler durch Regressionsanalyse für jeden Monat die Anzahl der Sonnenstunden pro Tag, die im Mittel dieser Strahlungssumme entspricht (LUGAUER und WINKLER 2005 oder Tabelle A.2 im Anhang). Da das Entstehen von thermischen Windsystemen durch Auftreten von Niederschlag reduziert wird (GEIGER et al, 1995), wurden Tage mit sehr günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen durch die folgenden Kriterien definiert und im Folgenden als **AP-Tage** bezeichnet:

- Die mittlere tägliche Sonnenscheindauer der vier in Abb. 3.1 auf Seite 20 mit orangem Punkt markierten Stationen ist größer als die Sonnenscheindauer, die 20 MJ/m^2 entspricht (LUGAUER und WINKLER 2005 oder Tabelle A.2 im Anhang).
- Die Summe der stündlichen Niederschlagssummen zwischen 07:00 und 07:00 MEZ des Folgetages an den vier in Abb. 3.1 markierten Niederschlagsstationen (hellblaues Dreieck) ist gleich null.

Hierbei ist anzumerken, dass Alpines Pumpen mehr oder weniger ausgeprägt durchaus an vielen Tagen auftreten kann. Für die folgenden Auswertungen wurden jedoch nur Tage mit besonders günstigen Bedingungen ausgewählt, an denen eine deutliche Ausprägung des thermischen Windsystems zu erwarten ist. Für die drei Jahre der Messkampagne (2013-2015) ergeben sich nach den oben genannten Kriterien **im Schnitt etwa 49 AP-Tage pro Jahr** (Abb. 5.10a), diese treten **hauptsächlich im Sommer** (23-32 Tage/Jahr) und Frühling (11-27 Tage/Jahr) auf, im Herbst findet man günstige Bedingungen nur an insgesamt vier Tagen im gesamten Zeitraum.

Zwischen März und August weisen somit im Mittel 27 % der Tage sehr günstige Bedingungen für Alpines Pumpen auf, betrachtet man nur die Sommermonate sind es 31 %. Diese Anzahl passt unter Berücksichtigung des zusätzlichen Niederschlagskriteriums sowie des leicht veränderten Zeitraums (März-August statt Mai-August sowie andere Zeitperiode) zu früheren Studien (LUGAUER, 2003 und LUGAUER und WINKLER, 2005). Die maximale Andauer von aufeinanderfolgenden Tagen mit günstigen Bedingungen innerhalb des

Messzeitraums beträgt sechs Tage. Episoden mit dieser Dauerstufe wurden zweimal in den Sommermonaten zwischen 2013 und 2015 beobachtet (Abb. 5.10b).

Zum Vergleich wurden auch Tage mit ungünstigen Bedingungen für das Auftreten von Alpinem Pumpen analysiert, im Folgenden auch als **SA-Tage** (strahlungsarme Tage) bezeichnet. Diese zeichnen sich durch eine sehr niedrige solare Einstrahlung aus und sind basierend auf LUGAUER und WINKLER (2005) definiert als:

- Tage, an denen die mittlere tägliche Sonnenscheindauer der vier in Abb. 3.1 mit orangefarbigem Punkt markierten Stationen kleiner ist als die Sonnenscheindauer, die 10 MJ/m² entspricht (LUGAUER und WINKLER, 2005 oder Tabelle A.2 im Anhang).

Die mittlere Anzahl von SA-Tagen pro Jahr beträgt 113, wobei diese hauptsächlich im Winter und Herbst auftreten (69-101 Tage/Jahr) und seltener im Frühling und Sommer (25-29 Tage/Jahr, beides ohne Abbildung).

Die Gesamtanzahl von AP-Tagen ist im Allgemeinen abhängig von den gewählten Kriterien. Aus meteorologischer Sicht gibt es noch weitere sinnvolle Kriterien zur Definition von Tagen mit günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen abhängig von dem gewünschten Untersuchungsthema. Ein detaillierterer Vergleich von verschiedenen Kriterienkombinationen erfolgte unter Verwendung von Modelldaten und ist in Abschnitt 6.2.1 zu finden. Für die Untersuchung der sommerlichen Temperaturverhältnisse ist ein strahlungsabhängiges Kriterium, wie hier angewendet, gut geeignet (siehe Abschnitt 6.2.1).

Analog zu der Definition des Alpinen Pumpens, bei dem die Sonnenscheindauer tagsüber und der Niederschlag zwischen 07:00 und 07:00 MEZ des Folgetages betrachtet wird, werden bei den Auswertungen der folgenden Kapitel die stündlichen Daten auch in dem gleichen Zeitraum betrachtet, d.h. wenn am 01.07.2015 sehr günstige Bedingungen für das Alpine Pumpen geherrscht haben, werden die stündlichen Wind- bzw. Temperaturdaten vom 01.07.2015 07:00 MEZ bis 02.07.2015 06:00 MEZ für die Auswertung verwendet.

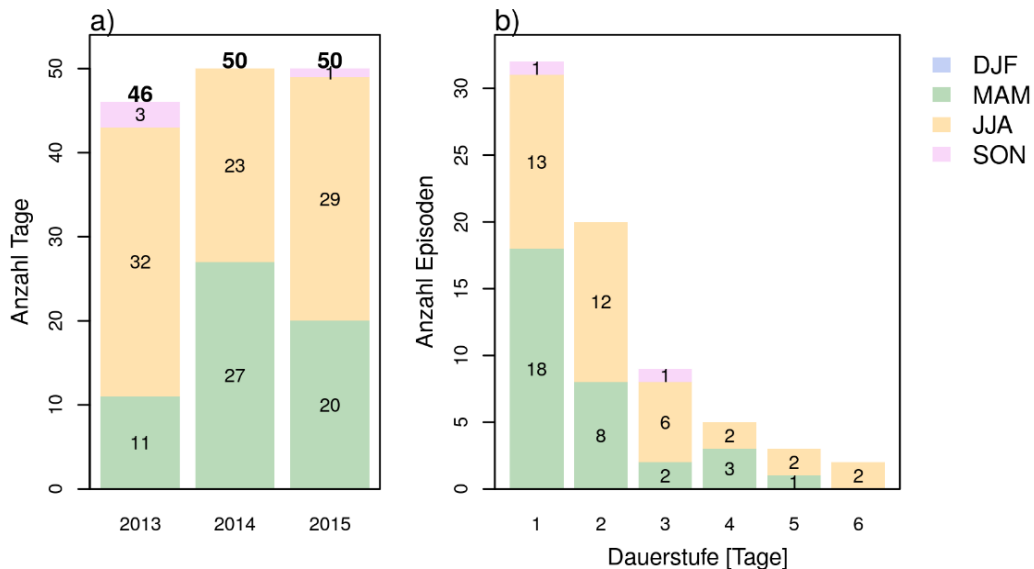


Abb. 5.10: a) Anzahl der Tage pro Jahr mit sehr günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen (Kriterien siehe Text) mit farblicher Unterscheidung der Jahreszeiten. b) Einteilung der Tage mit sehr günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen nach Dauerstufen in Tagen für den gesamten Zeitraum 2013-2015. Angegeben ist die Anzahl von Episoden (aufeinanderfolgenden Tagen mit günstigen Bedingungen) pro Dauerstufe mit farblicher Aufteilung nach Jahreszeit (DJF = Winter; MAM = Frühling; JJA = Sommer; SON = Herbst), z.B. gibt es drei Episoden mit Dauerstufe fünf Tage, von denen eine im Frühling und zwei im Sommer beobachtet wurden.

5.2.2 Ergebnisse der Windmessungen zu Alpinem Pumpen

Das in Abschnitt 2.3 beschriebene Windsystem des Alpinen Pumpens und der Wechsel der Windrichtung zwischen Tag und Nacht ist sehr gut im Tagesgang des Windes erkennbar. In Abb. 5.11 sind stündliche Windrosen für alle AP-Tage beispielhaft für die Station Aying südlich von München gezeigt (vgl. Abb. 3.1 auf Seite 20 für Stationsstandort). Die Auswertungen in diesem Kapitel beziehen sich generell auf Frühling und Sommer (d.h. März bis August), da in diesen Monaten die meisten Tage mit Alpinem Pumpen auftreten.

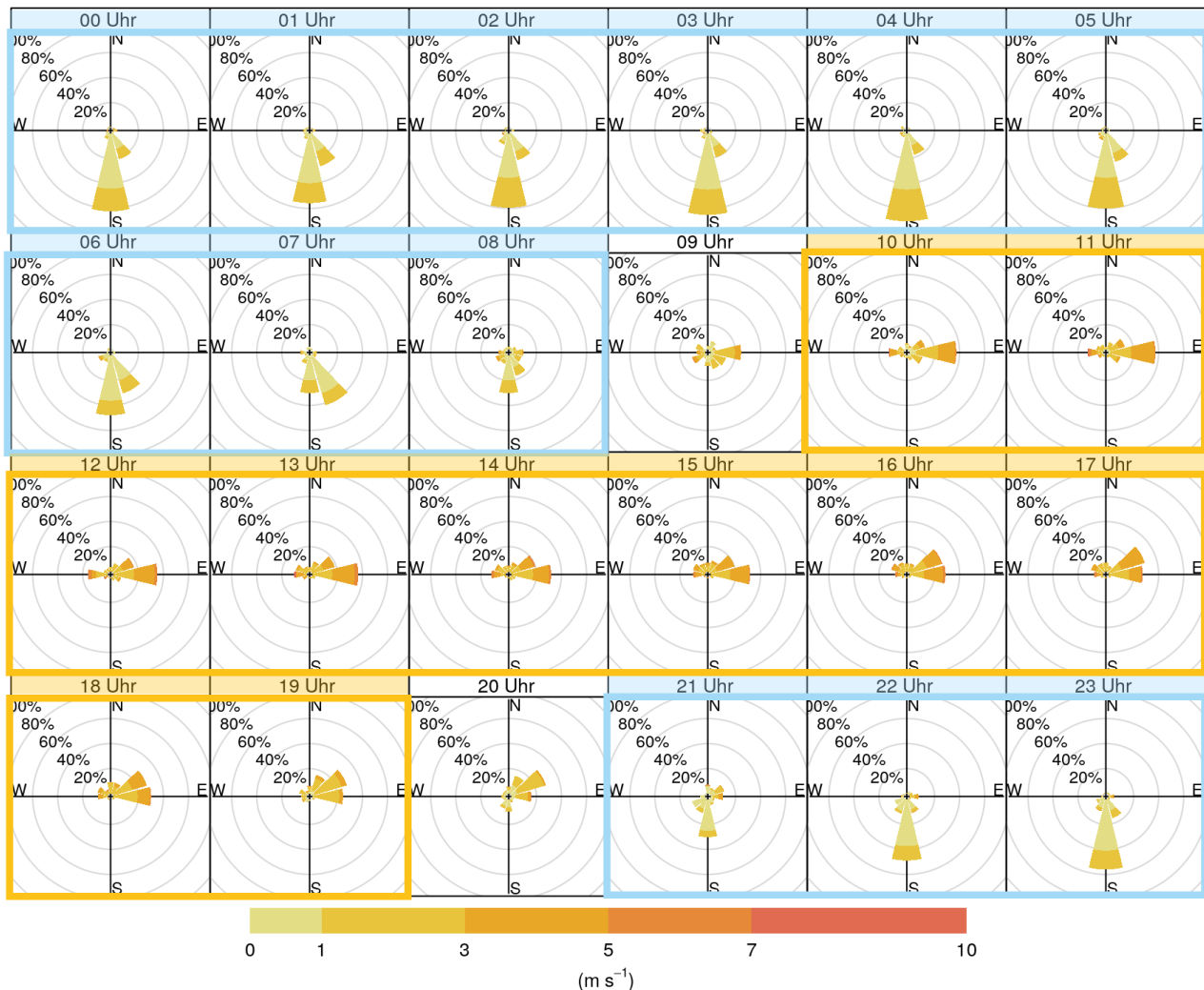


Abb. 5.11: Tagesgang des Windes am Beispiel der Station Aying für alle AP-Tage zwischen März und August im Zeitraum 2013-2015 (142 Tage). Für jede Windrose werden die entsprechenden Stundenwerte der 142 AP-Tage in 30° -Intervalle eingeteilt. Die Größe der einzelnen Windrosensegmente ist proportional zum Prozentsatz der 142 Werte, die in das jeweilige 30° -Windrichtungsintervall fallen. Die Einfärbung der Segmente gibt Auskunft über die Verteilung der mittleren stündlichen Windgeschwindigkeiten in dem jeweiligen Segment. Farblich umrandet sind Zeitabschnitte mit gleichen vorherrschenden Strömungsrichtungen; in hellblau die nächtliche Südströmung von den Alpen in Richtung München, in orange die tagsüber vorherrschende östliche Strömung.

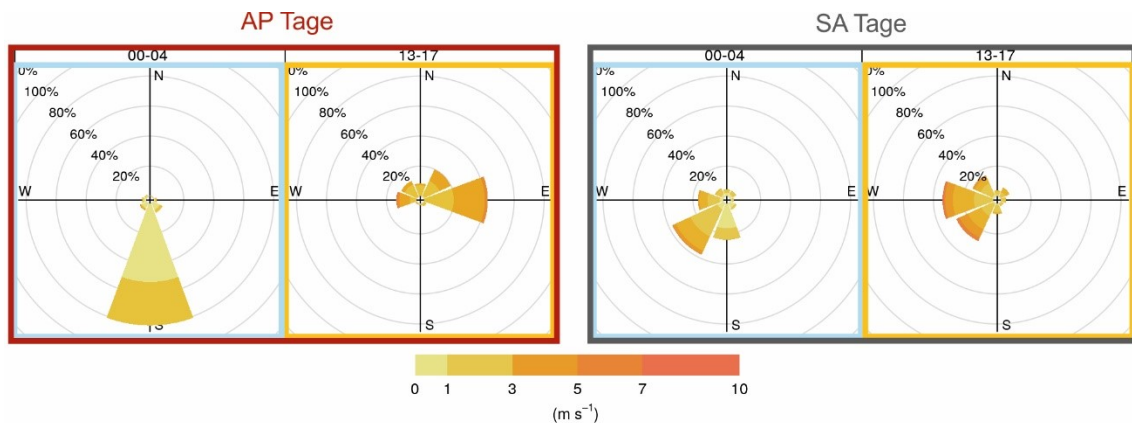


Abb. 5.12: Vergleich der nächtlichen (00-04 MEZ, hellblau umrandet) und täglichen (13-17 MEZ, orange umrandet) Windrichtungshäufigkeitsverteilungen für die Station Aying für die Monate März-August im Zeitraum 2013-2015. Links für Tage mit günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen (AP-Tage) und rechts für strahlungsarme Tage (SA-Tage).

Tagsüber (zwischen etwa 10:00 bis 19:00 MEZ, orange markierte Bereiche in Abb. 5.11) weht der Wind hauptsächlich aus Ost bzw. Nordost. Zwischen 19:00 und 21:00 MEZ gibt es keine dominante Windrichtung bis um 21:00 MEZ der Wind dreht und ein südlicher Wind von den Alpen in Richtung München einsetzt. Zwischen 08:00 und 10:00 MEZ dreht der Wind dann zu der tagsüber dominierenden Ostanströmung. Die Windgeschwindigkeiten in 10 m über Grund liegen nachts während der südlichen Einströmrichtung zwischen 0,3 und 3,5 m/s, während sie tagsüber mit bis zu 6 m/s deutlich höher sind. Während SA-Tagen wird das Windfeld von der generell vorherrschenden Westanströmung dominiert und es lässt sich keine markante Winddrehung im Tagesgang der Windrichtungsverteilung erkennen.

Abb. 5.12 zeigt einen Vergleich der Windverhältnisse an AP- und SA-Tagen für die Station Aying. Die Windrosen fassen die stündlichen Werte für zwei fünfstündige Zeitintervalle mit nahezu konstanten Windverhältnissen an AP-Tagen zusammen; nachts zwischen 00:00-04:00 MEZ (mit den fünf stündlichen Werten um 00:00, 01:00, 02:00, 03:00, und 04:00) und tagsüber zwischen 13:00-17:00 MEZ. Während an **AP-Tagen ein klarer Wechsel der Windrichtung** zu sehen ist, lässt sich zwischen den beiden Zeitspannen **an SA-Tagen nur eine leichte Verschiebung aber kein Sprung der Windrichtung** erkennen (dies gilt auch für die hier nicht gezeigten Tageszeiten). Der Anteil von hohen Windgeschwindigkeiten ist vor allem nachts höher an SA-Tagen als an AP-Tagen.

Das am Beispiel der Station Aying beschriebene Verhalten lässt sich auch an den anderen Stationen beobachten. In Abb. 5.13 oben ist der Tagesgang des Windes für die temporären Stationen sowie München-Stadt und Garmisch-Partenkirchen zusammengefasst. Gezeigt wird jeweils nur die Windrichtung in die der höchste Prozentsatz an Stunden fällt. Ist dieser geringer als 33 %, ist dies durch eine transparente Farbgebung gekennzeichnet.

Für Tage mit sehr günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen (Abb. 5.13 links) ist an allen Stationen südlich von München sowie für die Station Garmisch ein Unterschied zwischen den Windverhältnissen tagsüber und nachts zu erkennen. Abends **zwischen 19:00 und 22:00 MEZ dreht der Wind und die Luftmassen strömen von den Alpen in Richtung Stadt** (blaue Farben), in den Morgenstunden (**zwischen 08:00-11:00 MEZ**) dreht der Wind erneut und **tagsüber dominiert eine nördliche bzw. östliche Strömungsrichtung** (rote Farben). Im Unterschied zu den AP-Tagen, lässt sich bei den strahlungsarmen Tagen (Abb. 5.13 oben rechts) bei den

meisten Stationen kein Wechsel der Windrichtung erkennen und es dominieren ganztägig die West- und Südwestwinde.

Dieses Verhalten wurde auch schon in früheren Studien (z.B. BRÜNDL 1986) festgestellt. Die Windfelder werden allerdings je nach Messstandort auch von den lokalen Gegebenheiten geprägt. Die Station München z.B. hat wegen ihrer Lage in der Stadt ein Messinstrument in 28,5 m Höhe (und nicht wie üblich in 10 m Höhe) und befindet sich inmitten städtischer Bebauung, die das lokale Windfeld beeinflusst. An den Stationen Garmisch und Großhesseloherbrücke ist durch die Tallage das Windfeld stark kanalisiert. An beiden Stationen findet man die Umkehrung des Windes sowohl an AP- als auch an SA-Tagen, sie ist jedoch bei strahlungsinintensiven Tagen stärker ausgeprägt. An den Stationen Unterhaching, Buchendorf und Dingharting herrscht zwar tagsüber nach der in Abb. 5.13 oben verwendeten Einteilung keine dominante Windrichtung vor, insgesamt findet man aber bei mehr als der Hälfte der Stundenwerte eine östliche bis nordöstliche Windrichtung. Generell lässt sich für alle Stationen ein deutlicher Unterschied der Windrichtungen zwischen AP- und SA-Tagen feststellen und das thermische Windsystem des Alpinen Pumpens konnte an den temporären Messstationen südlich von München nachgewiesen werden.

Wie auch schon für die Station Aying beobachtet, sind die **Windgeschwindigkeiten an den temporären Stationen an SA-Tagen im Allgemeinen höher als an AP-Tagen** (Abb. 5.13 unten). Bei beiden Verhältnissen sind die Windgeschwindigkeiten tagsüber höher als nachts. Die über alle AP-Tage gemittelten Windgeschwindigkeiten betragen in der Nacht zwischen 0,5 und 1,5 m/s, nur an den Stationen München-Stadt und Dingharting liegen sie mit 2 m/s und 2,5 m/s höher. Dies kann durch die Lage der Stationen erklärt werden, Dingharting liegt auf einer Kuppe und die Windmessung an der Station München-Stadt erfolgt aufgrund der umliegenden

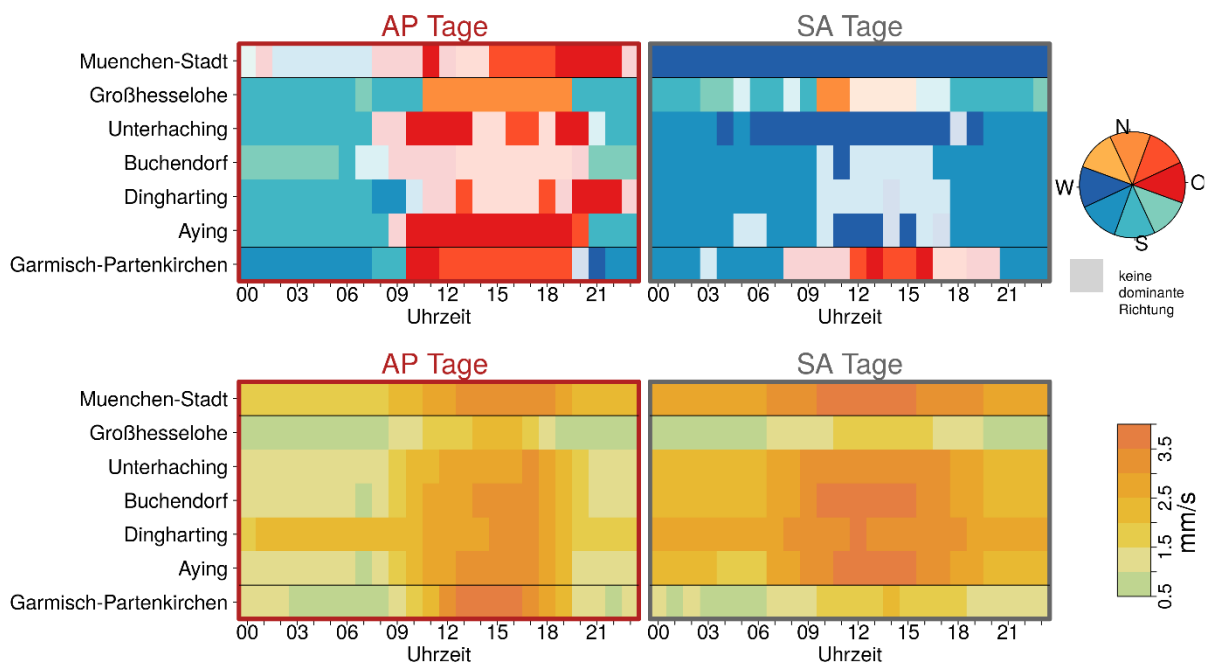


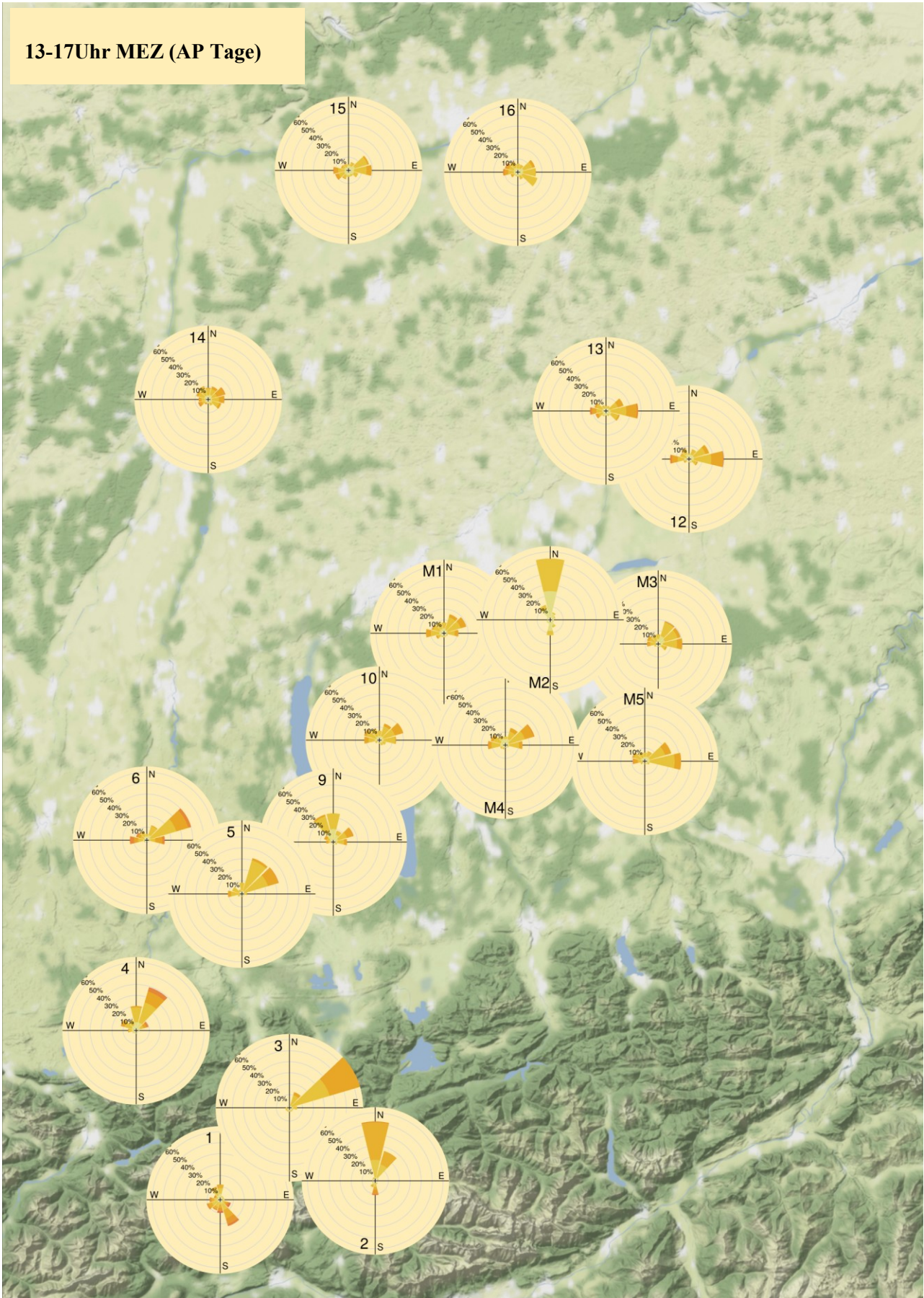
Abb. 5.13: Tagesgang von dominanter Windrichtung, d.h. der Windrichtung, in die die meisten Stundenwerte fallen (oben) und Windgeschwindigkeit (unten) gemittelt über alle AP-Tage (links) und SA-Tage (rechts) für die Monate März-August im Zeitraum 2013-2015. Zusätzlich zu den fünf temporären Stationen des Stadtklimaprojekts (vergleiche Abb. 3.1) sind die Ergebnisse für München und Garmisch-Partenkirchen dargestellt. Rötliche Farben bei der Windrichtung zeigen eine Strömung von der Stadt in Richtung Alpen, blaue Farben eine Strömung von den Alpen in Richtung München. Wenn in die dominante Windrichtung weniger als 33 % der Stundenwerte fallen, ist die Farbe abgeschwächt.

Bebauungen nicht wie üblicherweise in 10 m Höhe sondern wie schon weiter oben erwähnt in 28,5 m Höhe über Grund. Tagsüber ergeben sich mittlere Windgeschwindigkeiten von bis zu 3,5 m/s (4 m/s für Garmisch).

Um die **großräumigen Windverhältnisse an AP-Tagen** zu zeigen, wurden die Stundenwerte für die gleichen Zeitintervalle wie zuvor (tagsüber zwischen 13:00-17:00 MEZ und nachts zwischen 00:00-04:00 MEZ) zusammengefasst. Die Windrosen in Abb. 5.14 fassen alle stündlichen Windmessungen für AP-Tage für das jeweilige Zeitintervall zusammen. Tagsüber sieht man vor allem an den Stationen in Alpennähe (Stationen 1-6 und 9), dass die Anströmung aus Norden bzw. Nordosten dominiert mit Luftmassen, die aus dem Alpenvorland in Richtung Gebirge transportiert werden. An den südlich von München gelegenen temporären Messstationen (M1-M5) sowie an der Station München (Station 11) und nördlich davon (Stationen 12-16) dominiert eine östlich/nordöstliche Strömungsrichtung, die die Luft aus der Umgebung in Richtung Stadt transportiert. Eine Ausnahme ist die Großhesseloherbrücke, die wie schon weiter vorne erwähnt durch die lokalen Begebenheiten eine starke Kanalisierung des Windes erfährt.

In Gebirgsnähe wird die regionale Zirkulation durch Hang- und Talwindssysteme verstärkt und ist daher dort mit bis zu 10 m/s generell höher als an den Stationen in München und im Umland der Landeshauptstadt. Nachts (00:00-04:00 MEZ) ist die für das Alpine Pumpen typische südliche Anströmung vom Gebirge in Richtung Alpenvorland und München deutlich zu erkennen. Das thermische Windsystem lässt sich auch wie in früheren Studien bis nach Augsburg (Station 14) nachweisen. Das Windsystem ist je nach lokalen Faktoren unterschiedlich stark ausgeprägt, an der Station Hohenpeißenberg (Station 5) und in München-Stadt (Station 11) z.B. lässt sich kein dominanter Windrichtungssektor erkennen. Die beobachteten Winde kommen aus dem gesamten südlichen Richtungshalbraum. An den nördlich von München gelegenen Stationen findet man zwar eine dominante Anströmungsrichtung, aber sie ist nicht einheitlich und nicht aus Süden; Station 15 zeigt zum Beispiel nächtliche Kaltluftabflüsse von der Schwäbischen Alb. Der Unterschied zwischen den Windgeschwindigkeiten der Stationen in Gebirgsnähe im südlichen Messdatenauswertebiet und den Stationen in München und Umgebung wird nachts noch deutlicher. Während die stadtnahen Stationen hauptsächlich Stundenwerte der Windgeschwindigkeit unter 3 m/s zeigen (außer M4) findet man z.B. an den Stationen 2, 4 und 6 Geschwindigkeiten bis zu 10 m/s. Insgesamt passen diese Ergebnisse qualitativ zu denen von LUGAUER und WINKLER (2005) für den Zeitraum 1996-2000.

13-17Uhr MEZ (AP Tage)



00-04Uhr MEZ (AP Tage)

- 1: Zugspitze
- 2: Mittenwald/Obb.
- 3: Garmisch-Partenkirchen
- 4: Halblech-Bayernleiderhofen
- 5: Hohenpeissenberg
- 6: Altstadt
- 9: Wielenbach
- 10: Starnberg-Perchting
- 11: Muenchen-Stadt
- 12: Muenchen-Flughafen
- 13: Weihenstephan-Duemast
- 14: Augsburg
- 15: Neuburg/Donau (Flugplatz)
- 16: Ingolstadt (Flugplatz)
- M1: Buchendorf
- M2: Großhesselohe
- M3: Unterhaching
- M4: Dingharting
- M5: Aying

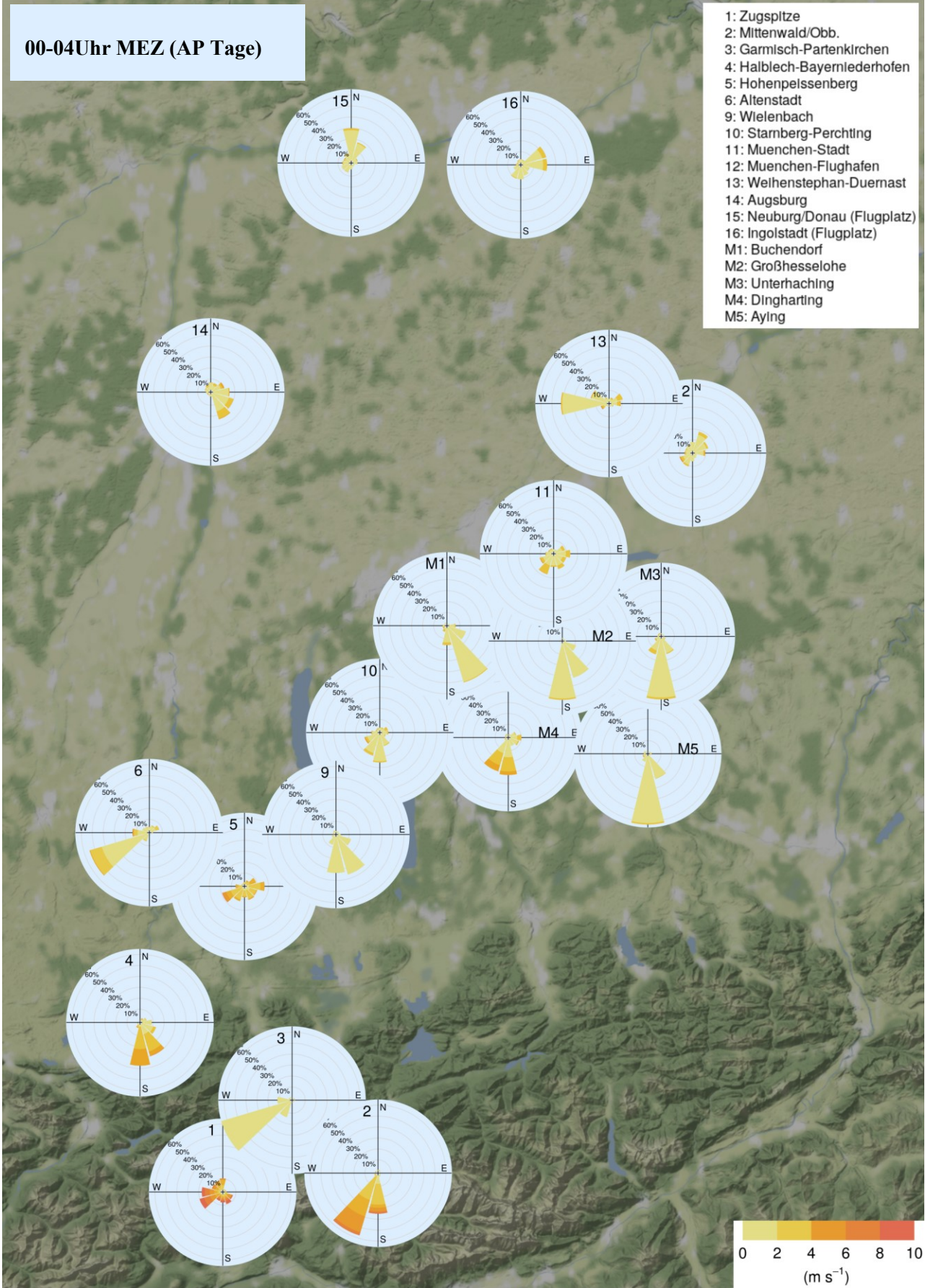


Abb. 5.14: (vorherige zwei Seiten). Übersicht der Windverhältnisse an AP-Tagen zwischen Mai-August, 2013-2015. Erste Graphik: Tagsüber 13:00-17:00 MEZ (orange hinterlegt); zweite Graphik: Nachts 00:00-04:00 MEZ (hellblau hinterlegt). Die Windrosen basieren auf den stündlichen Werten für das jeweilige Zeitintervall. München-Stadt ist Station 11, M1-M5 sind die temporären Stationen die ihm Rahmen des Projektes aufgestellt wurden. Für eine bessere Übersicht entspricht der Mittelpunkt der Windrose nicht immer den exakten Stationskoordinaten. Die Standorte sowie die Stationsnamen sind in Abb. 3.1 gezeigt.

5.2.3 Temperaturverhalten an Tagen mit Alpinem Pumpen

Da die Anzahl der Sonnenstunden als Auswahlkriterium verwendet wurde, um Tage mit sehr günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen zu identifizieren (siehe Abschnitt 5.2.1), ist zu erwarten, dass diese Tage auch vergleichsweise hohe Temperaturen aufweisen. Vergleicht man den gemittelten Tagesverlauf der Temperatur für alle Tage mit sehr günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen (AP-Tage) und strahlungsarmen Tagen mit ungünstigen Bedingungen für Alpines Pumpen (SA-Tage), ist dies deutlich erkennbar (siehe Abb. 5.15, links). In der Abbildung sind die mittleren Tagesverläufe für die Stationen München-Stadt sowie München-Flughafen (nördlich von München) und Oberhaching-Laufzorn (südlich von München) gezeigt. Der städtische Wärmeinseleffekt (d.h. die höheren Temperaturen in der Stadt gegenüber dem Umland, siehe auch Kapitel 2) wird vor allem in den Nachtstunden deutlich und ist in Abb. 5.15, rechts, nochmals genauer mittels sogenannter Kastengraphiken (engl. „Box-Whisker Plots“) dargestellt. Die Kastengraphiken zeigen die Verteilung aller stündlichen Temperaturdifferenzen zwischen München-Stadt und den Umlandstationen für zwei je fünfstündige Zeiträume. Der Kasten umfasst immer die mittleren 50 % der stündlichen Differenzwerte und die Antennen zeigen den Bereich an, in dem 90 % der Werte liegen. Der Strich in der Mitte gibt den Median an (den Wert bei dem 50 % der Werte darunter und 50 % darüber liegen). Die vier linken Kastengraphiken (in blau umrandet) zeigen die nächtlichen Differenzen für das in Abb. 5.15, links in hellblau markierte Zeitintervall von 00:00 bis 04:00 MEZ an, die vier rechten Kastengraphiken die Temperaturdifferenzen tagsüber für das in Abb. 5.15 links in orange markierte Zeitintervall von 13:00 bis 17:00 MEZ. Die Umrandung der Kastenplots gibt jeweils die Umlandstation an, bezüglich welcher die Temperaturdifferenz berechnet wurde (grün: München-Stadt – Oberhaching-Laufzorn; rot: München-Stadt – München-Flughafen) und die Füllfarbe des Kastens unterscheidet zwischen AP-Tagen (rote Füllung) und SA-Tagen (graue Füllung). Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass

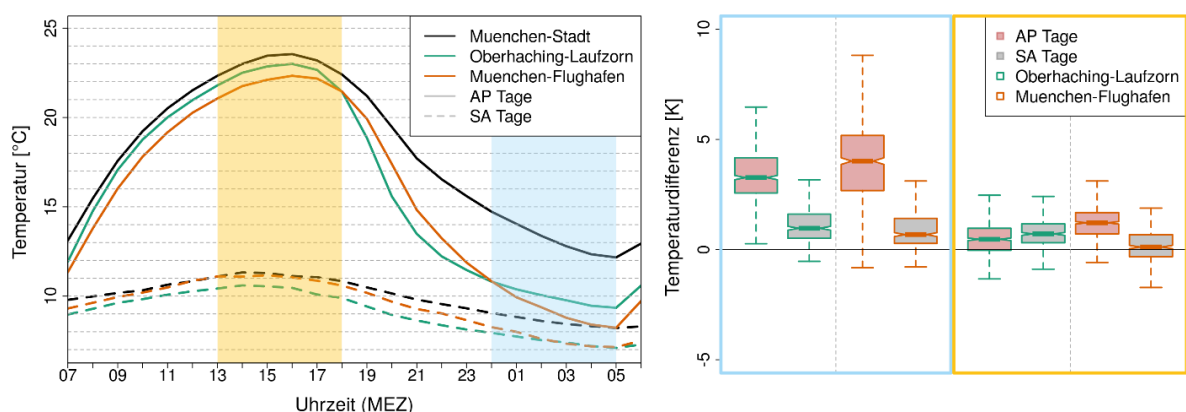


Abb. 5.15: Links: Mittlerer Tagesgang der Temperatur für AP-Tage und SA-Tage in München-Stadt, München-Flughafen (nördlich von München, siehe Abb. 3.1) und Oberhaching-Laufzorn (südlich von München). Rechts: Kastengraphiken der Differenzen zwischen der Temperatur von München-Stadt und den zwei Umlandstationen, ebenfalls für AP-Tage (rote Einfärbung) und SA-Tage (graue Einfärbung) für die zwei Zeiträume, die in der linken Graphik farbig schraffiert sind (für eine Erklärung der Kastengraphiken, siehe Text).

die Temperaturen in München-Stadt im Mittel immer wärmer sind als im Umland. Nachts ist dieser Wärmeinseleffekt an AP-Tagen deutlich stärker ausgeprägt als an SA-Tagen. Tagsüber ist der Unterschied zwischen AP- und SA-Tagen nicht so ausgeprägt und die Temperaturdifferenz zwischen München-Stadt und Oberhaching-Laufzorn ist sogar an AP-Tagen geringfügig kleiner als an SA-Tagen (siehe Abb. 5.15, rechts). Um den unterschiedlichen Stationshöhen Rechnung zu tragen, wurden die Temperaturdaten der Umlandstationen mittels der in KUNZ (2007) genannten Umrechnungsfaktoren auf die gleiche Höhe wie München-Stadt umgerechnet.

Mit den derzeit vorhandenen Messungen ist wegen der grundsätzlich höheren Temperaturen an AP-Tagen eine direkte Auswirkung des Alpines Pumpens auf die Lufttemperatur in der Stadt München schwierig. Dazu wäre ein weitaus dichteres Messnetz innerhalb des Stadtgebiets notwendig, was jedoch im Rahmen des temporären Messprogramms nicht möglich war. Die Wirkung des Alpines Pumpens auf die Lufttemperaturverteilung in München wird jedoch in Abschnitt 6.3 anhand von einer idealisierten Modellstudie gezeigt.

5.2.4 Zusammenfassung

Die Analyse der Windmessungen an den fünf südlich gelegenen Stationen sowie den regulären Stationen des Deutschen Wetterdienstes für den Zeitraum 2013 bis 2015 liefert folgende Ergebnisse:

- Stark strahlungsreiche Tage, an denen Alpines Pumpen in hohem Maße begünstigt wird, traten nach dem hier definierten, vor allem strahlungsabhängigen Kriterium, an 146 Tagen im Zeitraum 2013-2015 auf (\approx 49 Tage/Jahr), wobei davon fast alle im Sommer und Frühling auftraten, nur drei im Herbst und keine im Winter. Damit traten **sehr günstige Bedingungen für Alpines Pumpen an etwa 27 % der Tage zwischen März und August** auf.
- Die Analysen von Windbeobachtungen von insgesamt 19 Stationen zwischen der Zugspitze im Süden und Ingolstadt im Norden zeigen die **Ausprägung des thermischen Windsystems (Alpines Pumpen)**. Tagsüber strömen die Luftmassen bei München aus östlicher bzw. nordöstlicher und am Alpenrand aus nördlicher Richtung vom Alpenvorland in Richtung Gebirge; nachts aus südlicher Richtung vom Gebirge Richtung Alpenvorland und dem Münchener Stadtgebiet. An den Stationen südlich von München setzt die nächtliche Strömung im Mittel zwischen 20:00 und 24:00 MEZ ein und ist zwischen 07:00 und 10:00 MEZ beendet. Die nördliche Anströmung setzt in München im Mittel zwischen 10:00 und 11:00 MEZ ein und ist zwischen 19:00 und 23:00 MEZ beendet.
- Die Windgeschwindigkeiten nehmen vom Gebirge (mit Geschwindigkeiten bis zu 10 m/s) in Richtung Alpenvorland ab und sind generell nachts geringer als tagsüber.
- Die zusätzlichen temporären Windmessungen südlich von München im Rahmen der Kooperation zwischen DWD und der Landeshauptstadt zeigen, dass das Alpine Pumpen an den Messstationen südlich von München deutlich ausgeprägt ist und sich die **Windverhältnisse an Tagen mit günstigen Bedingungen und ungünstigen Bedingungen für Alpines Pumpen deutlich unterscheiden**. An Tagen, an denen das Alpine Pumpen nicht auftritt, dominiert eine westliche bzw. südwestliche Anströmungsrichtung im Stadtgebiet. Einen Einfluss des regionalen thermischen Windsystems auf die Durchlüftung, vor allem in den südlichen Stadtteilen von München, ist daher anzunehmen.

- Ein Einfluss des Alpinen Pumpens auf die Temperatur im Stadtgebiet München ist mit den derzeit vorhandenen Beobachtungen schwer nachzuweisen, da es nur einen Standort mit kontinuierlichen Temperaturmessungen gibt. Der Einfluss wurde allerdings im Rahmen einer Modellstudie simuliert und ist im Kapitel 6.3 zusammengefasst.

Die Messergebnisse können zusätzlich dafür benutzt werden, um die Qualität der Modellergebnisse zu überprüfen. Hier muss allerdings berücksichtigt werden, dass ein Vergleich nur qualitativ erfolgen kann. Während Windmessungen an Stationen zum Teil sehr stark von lokalen Gegebenheiten beeinflusst werden, stellen Modellergebnisse eine Mittelung über einen Gitterpunkt im Modell dar. Ferner liegen die temporären Messungen nur für die Jahre 2013-2015 vor, während die Modellauswertungen für einen klimatologischen (und damit längeren) Zeitraum erfolgen.

6 Ergebnisse der Modellierungen

6.1 MUKLIMO_3-Stadtklimaprojektion

6.1.1 Quadermethode

Sehr hoch auflösende Simulationen mit dynamischen Klimamodellen wie MUKLIMO_3 sind für klimatologische Zeiträume von 30 Jahren extrem aufwendig und mit heutigen Computern noch nicht leistbar. Zur Reduzierung des Rechenaufwands für Stadtklimaprojektionen wurde daher die Quadermethode als dynamisch-statistisches Downscaling-Verfahren entwickelt (FRÜH et al., 2011a, b).

Die Quadermethode basiert auf der Annahme, dass das lokale Auftreten wärmebelastender Wetterlagen im Wesentlichen von den regional repräsentativen Werten der drei Klimaparameter Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit abhängt. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass man für jede der drei Größen einen Wertebereich definieren kann, auf den man sich bei seinen Betrachtungen beschränken kann. Die Minima und Maxima dieser Wertebereiche beschreiben einen dreidimensionalen Ereignisraum, der als Quader visualisiert werden kann (Abb. 6.1). Da aus Klimamodellen und zum Teil auch aus Beobachtungen zwar Tagesmaximum und -minimumtemperatur, für die Feuchte und den Wind in der Regel aber nur Tagesmittel vorliegen, wird für die regionalen Klimaparameter der Wertebereich ihrer Tagesmittelwerte betrachtet.

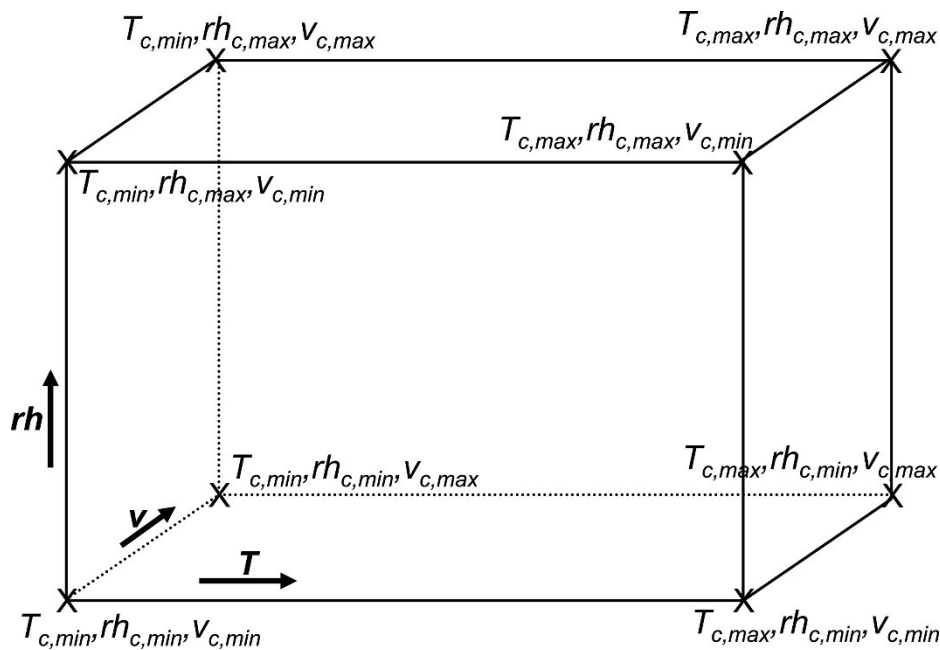


Abb. 6.1: Skizze des Quaders zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der multiplen linearen Interpolation. Die Quadereckpunkte werden durch Tagesmittelwerte der Lufttemperatur T , der relativen Luftfeuchtigkeit rh und der Windgeschwindigkeit v bestimmt und sind für die im Gebiet von München durchgeführten MUKLIMO_3-Simulationen in Tabelle 6.1 aufgelistet. Hierbei sind z. B. $T_{c,min}$, $rh_{c,min}$ und $v_{c,min}$ die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit für die in der Tabelle 6.1 mit „000“ gekennzeichnete, kühle, trockene und windschwache Quadereckpunktsimulation (Index c steht für engl. Corner).

Tabelle 6.1: Tagesmittelwerte bodennaher Klimaparameter für die in Abb. 6.1 illustrierten acht Eckpunktsimulationen der Quadermethode.

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

Es werden für die beiden im Raum München herrschenden Hauptwindrichtungen WSW und ONO jeweils acht, als Eckpunktsimulationen bezeichnete, räumlich hoch aufgelöste Berechnungen der Tagesgänge von Wind, Temperatur und Feuchte mit dem Modell MUKLIMO_3 durchgeführt, die den in Abb. 6.1 skizzierten Quader aufspannen und jeweils für einen Windrichtungshalbraum von $\pm 90^\circ$ gültig sein sollen. Den Tagesgang oder die Tagesmaxima und -minima der Klimaparameter an allen Gitterpunkten von MUKLIMO_3 für einen beliebigen Tag X erhält man dann aus den Ergebnissen der acht Eckpunktsimulationen für die entsprechende Windrichtung mittels dreifacher linearer (trilinear) Interpolation auf die regionalen Mittelwerte des Tages X (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit). Zur Bestimmung von klimatologischen Kennwerten werden die bodennahen Felder (Gitterpunktwerte) der Lufttemperatur des Tages ausgewertet. Nachfolgend wird die Auswertung der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen für 30-jährige Klimazeiträume in Vergangenheit und Zukunft präsentiert. „Sommertage“ sind Tage an denen die Tagesmaximumtemperatur mindestens 25 °C erreicht. Da Sommertage bereits heute häufig auftreten, liefern diese ein statistisch besonders belastbares Maß für die Wärmebelastung in der Stadt (FRÜH et al. 2011a).

Bei der Auswertung von Modellergebnissen für die Zukunft werden Perzentile verwendet, um die Spannweite der Ensemble-Ergebnisse darzustellen. Perzentile gliedern die Modellergebnisse in Maßklassen, womit sich ein bestimmter Prozentanteil dieser Ergebnisse umschließen lässt. Dabei gibt z.B. das 15. Perzentil den Wert an, bei dem 15 % der Modellergebnisse unterhalb und 85 % der Modellergebnisse oberhalb liegen. Der, auch hier verwendete, Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil umschließt somit 70 % der Modellergebnisse und entspricht in Analogie zum Deutschen Klimaatlas (www.dwd.de/klimaatlas) dem 70 % Vertrauensintervall. Für die Entwicklung von Klimaanpassungsmaßnahmen wird von den Autoren des Berichts empfohlen, sich am 85. Perzentil der berechneten Zunahme an Kenntagen zu orientieren.

6.1.2 Jährliche Anzahl an Sommertagen 1971-2000

Um die mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen im vergangenen Zeitraum 1971-2000 mit dem MUKLIMO_3-Modell und einer räumlichen Auflösung von 100 m zu berechnen, wurden als regionale Kli-

mawerte für die Quadermethode die gemessenen Tagesmittelwerte der etwa 30 km nordnordöstlich von München gelegenen Klimastation Weihestephan (bei Freising) verwendet. Die in Abb. 6.3 (oberstes Diagramm) dargestellte Karte zeigt die mittlere jährliche Anzahl der Sommertage für den Zeitraum 1971-2000. In Waldgebieten und über Wasserflächen (überwiegend außerhalb der Stadtgrenzen) finden sich die niedrigsten Werte mit unter 20 Sommertagen pro Jahr, während im Freiland um die Stadt ca. 28 bis 32 Sommertage berechnet wurden. In den sehr dicht bebauten Stadtteilen und insbesondere im Stadtzentrum Münchens werden häufig 40 bis 48 Sommertage pro Jahr erreicht, während in den Quartieren mit geringer oder mäßiger Bebauungs- und Versiegelungsdichte ca. 32 bis 40 Sommertage auftreten. Größere Grün- und Parkflächen im Stadtgebiet, z.B. entlang der Isar, weisen verbreitet weniger als 28 Sommertage auf, sind also kühler und haben bei Hitze-lagen daher eine wichtige ausgleichende Klimafunktion. Diese Ergebnisse passen qualitativ zu den Temperaturmessungen der Profilmessfahrten (Kapitel 5.1).

Zur Evaluierung der Ergebnisse werden in Tabelle 6.2 die berechneten Werte der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen mit Stationsmessungen verglichen. Die Modellergebnisse stellen hierbei räumliche Mittelwerte von 3 x 3 Modellgitterzellen um den Stationsstandort dar. Bei den Stationsauswertungen wurden Daten für fehlende Jahre aus Messungen benachbarter Stationen übertragen. An den Stationsstandorten München-Stadt, und Nymphenburgerpark (siehe Tabelle A.1 im Anhang für Stationskoordinaten) stimmen die Modellergebnisse mit 5 % bzw. 3 % Abweichung sehr gut mit den Messergebnissen überein. Am Stationsstandort Oberschleißheim liefern die Modellsimulationen mit 19 % weniger Sommertagen als die Messungen eine deutlich größere Abweichung, die aber noch im Bereich früherer Untersuchungen für andere Städte liegt (z.B. FRÜH et al., 2011a; KOSSMANN 2012). Die für den Zeitraum 1971-2000 berechnete Karte der jährlichen Anzahl an Sommertagen mit 100 m Auflösung liefert somit eine geeignete Basis für die Projektion der Anzahl der Sommertage im zukünftigen Zeitraum 2041-2070.

Tabelle 6.2: Berechnete und gemessene mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen für ausgewählte Standorte in München für den Zeitraum 1971-2000 sowie ihre berechnete Änderung bis 2041-2070. Die Stationskoordinaten sind in Tabelle A.1 im Anhang aufgeführt.

Standort GK-Koordinaten	Mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen		
	Modell (Messung*) 1971-2000	Änderung 2041-2070 zu 1971-2000 15. bis 85. Perzentil	Zukunft 2041-2070 15. bis 85. Perzentil
Marienplatz	43 (**)	16 – 29	59 – 72
München-Stadt	41 (39)	16 – 29	57 – 70
Nymphenburg	34 (35)	13 – 30	47 – 64
Oberschleißheim	30 (37)	12 – 31	42 – 61

* Messdatenlückenschließung durch Übertragung von Daten benachbarter Stationen.

** keine Messdaten verfügbar

6.1.3 Änderung der mittleren, jährlichen Anzahl an Sommertagen bis 2041-2070

Um die durch den Klimawandel in München zu erwartende **Änderung der Anzahl an Sommertagen** zu ermitteln, wurden aus dem für den Deutschen Klimaatlas (www.dwd.de/klimaatlas) genutzten Ensemble regionaler Klimaprojektionen für das SRES Szenario A1B (NAKICENOVIC und SWART 2000) 17 geeignete Projektionen herangezogen (Tabelle 6.3). Diese Projektionen wurden mit unterschiedlichen globalen und regionalen Klimamodellen berechnet und stellen somit ein umfangreiches Multi-Modell-Ensemble der benötigten Tagesmittelwerte von Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit dar. Die aus den regionalen Klimaprojektionen für die regionale Skala, d.h. für die Umgebung von München berechnete Zunahme an Sommertagen gegenüber 1971-2000 ist in Abb. 6.2 für die drei Klimaperioden 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 dargestellt. Man erkennt, dass die regionale Zunahme an Sommertagen sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts fortsetzt, und die sich aus dem Ensemble an Klimaprojektionen ergebende Unsicherheit für fernere Klimaperioden zunimmt.

Zur Bestimmung der **Spannbreite der zukünftig zu erwartenden Anzahl an Sommertagen** auf der städtischen Skala in München, wurden aus den 17 Klimaprojektionen diejenigen ermittelt, die regional, ohne Stadteinfluss den 15. bzw. den 85. Perzentilwert in der Zunahme an Sommertagen aufweisen und anschließend als Eingangsdaten in das Berechnungsverfahren der Quadermethode verwendet. Die auf Basis der Klimaprojek-

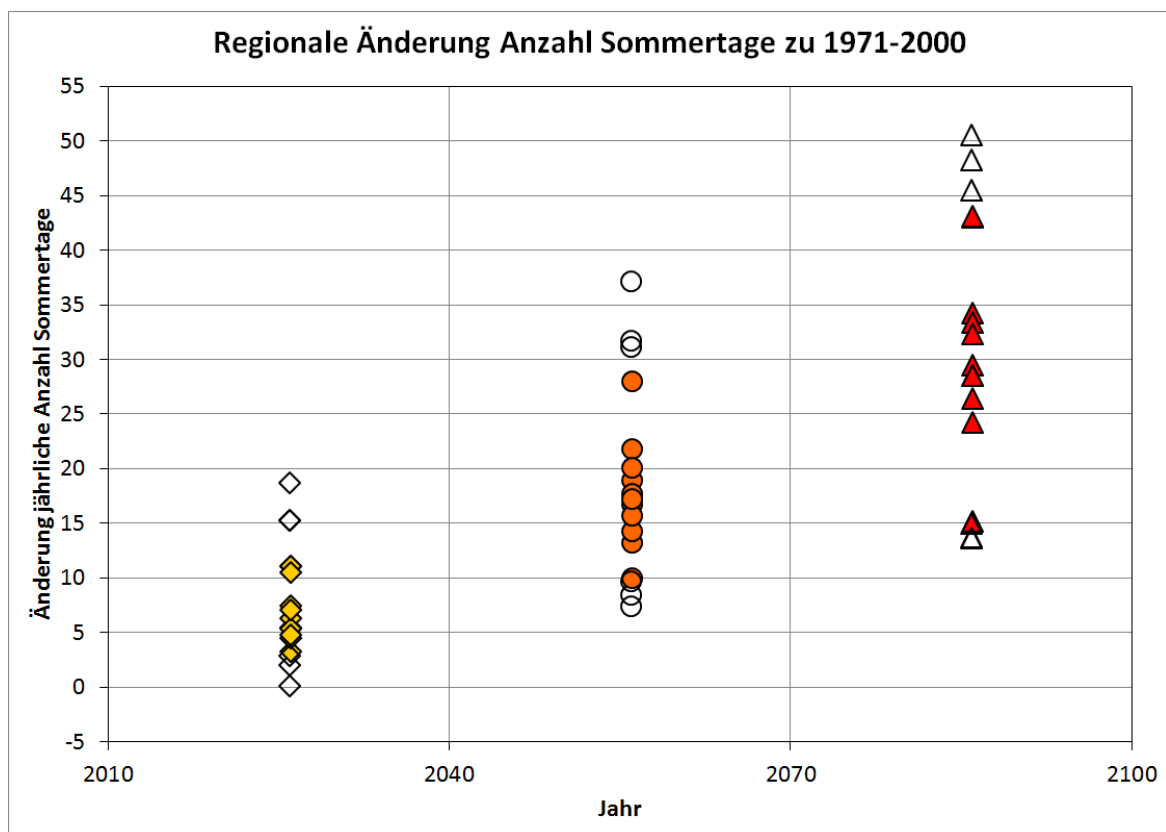


Abb. 6.2: Aus 17 Projektionen für das Szenario A1B ermittelte regionale Änderung der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen für die Klimaperioden 2011-2040 (links), 2041-2070 (Mitte) und 2071-2100 (rechts) im Vergleich zu 1971-2000. Die Auswertung der regionalen Klimaprojektionen erfolgte für den ost-nordöstlich von München gelegenen Gebietsausschnitt 48,0° N-48,5°N und 11,6°E-12,2°E. Farbig ausgefüllte Wertesymbole kennzeichnen Ergebnisse, die zwischen dem 15. und 85. Perzentilwert liegen.

Tabelle 6.3: Regionale Klimaprojektionen für das Emissionsszenario A1B mit Angabe der horizontalen Auflösung und der verwendeten Global- und Regionalmodelle. Zusätzlich angegeben ist die regional simulierte Zunahme der mittleren Anzahl an Sommertagen ($\Delta N_{T_{\max} \geq 25}$) im Zeitraum von 1971-2000 bis 2041-2070 für den ostnordöstlich von München gelegenen Gebietsausschnitt 48,0°N-48,5°N und 11,6°E-12,2°E (siehe Text).

Nr.	Globales Klimamodell	Regionales Klimamodell	Auflösung	$\Delta N_{T_{\max} \geq 25}$
1	BCM 2	HIRHAM5	25 km	7,4
2	BCM 2	RCA3.0	25 km	8,4
3	ECHAM5-r3	HIRHAM5	25 km	9,7
4	ECHAM5-r3	RCA3.0	25 km	10,0
5	ECHAM5-r3	RACMO2.1	25 km	13,3
6	ECHAM5-r3	RegCM3	25 km	14,3
7	ECHAM5-r3	REMO5.7	25 km	15,7
8	ECHAM5-r2	CLM2.4.11	19 km	16,8
9	HadCM3Q3	RCA3.0	25 km	17,2
10	HadCM3Q0	CLM 2.4.6	25 km	17,8
11	ECHAM5-r1	CLM2.4.11	19 km	19,0
12	HadCM3Q3	HadRM3Q3	25 km	20,2
13	ECHAM5-r1	REMO5.7	10 km	21,9
14	HadCM3Q16	RCA3.0	25 km	28,1
15	ARPEGE	ALADIN RM5.1	25 km	31,2
16	HadCM3Q0	HadRM3Q0	25 km	31,8
17	HadCM3Q16	HadRM3Q16	25 km	37,1

tonen in der Stadt München zu erwartende Zunahme der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen bis zur Mitte diesen Jahrhunderts ist in Abb. 6.4 als Differenz der Sommertaganzahl zwischen den Zeiträumen 2041-2070 und 1971-2000 dargestellt. Für das 15. Perzentil liegt die Zunahme im Stadtgebiet zwischen etwa 10 und 18 Sommertagen, während für das 85. Perzentil die Zunahme zwischen etwa 30 und 32 Sommertagen beträgt. Beim 15. Perzentil zeigt sich für die bebauten Gebiete eine leicht höhere Zunahme der Sommertage im Vergleich zu Parks und Grünflächen. Für das 85. Perzentil ergibt sich hingegen wie bei früheren Studien (FRÜH et al., 2011a und b) eine nahezu von der Landnutzung unabhängige Zunahme der Anzahl an Sommertagen.

Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in Tabelle 6.2 in den Änderungswerten für die drei Messstationsstandorte und den Innenstadtstandort Marienplatz wieder. Die 15. Perzentilwerte der vier Standorte liegen zwischen 12 und 16 zusätzlichen Sommertagen für 2041-2070 gegenüber 1971-2000, während die 85. Perzentilwerte mit 29 bis 31 zusätzlichen Tagen in einem engeren Bereich liegen.

Die Anzahl der Sommertage in München für den Zeitraum 2041-2070 wurde durch Addition der mittels regionaler Beobachtungsdaten von Weihenstephan für den Zeitraum 1971-2000 berechneten Werte (Abschnitt 6.1.2 bzw. Abb. 6.3 oben) und der mittels regionaler Klimaprojektionen ermittelten **Änderungen der Anzahl Sommertage zwischen den Zeiträumen 1971-2000 und 2041-2070** (Abb. 6.4) berechnet.

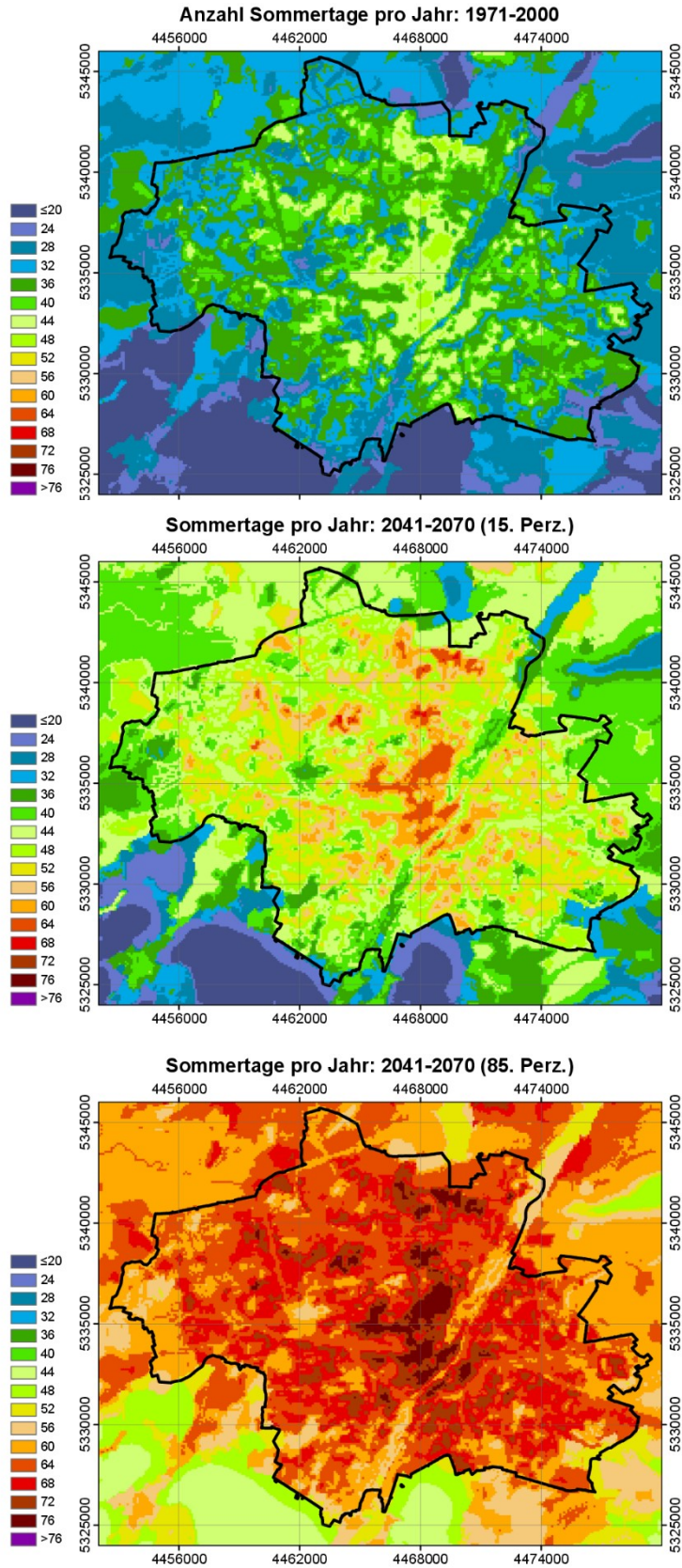


Abb. 6.3: Karten der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage für München (100 m Raster) für die Zeiträume 1971-2000 (oben) und 2041-2070 (A1B Szenario, 15. und 85. Perzentil, Mitte und unten).

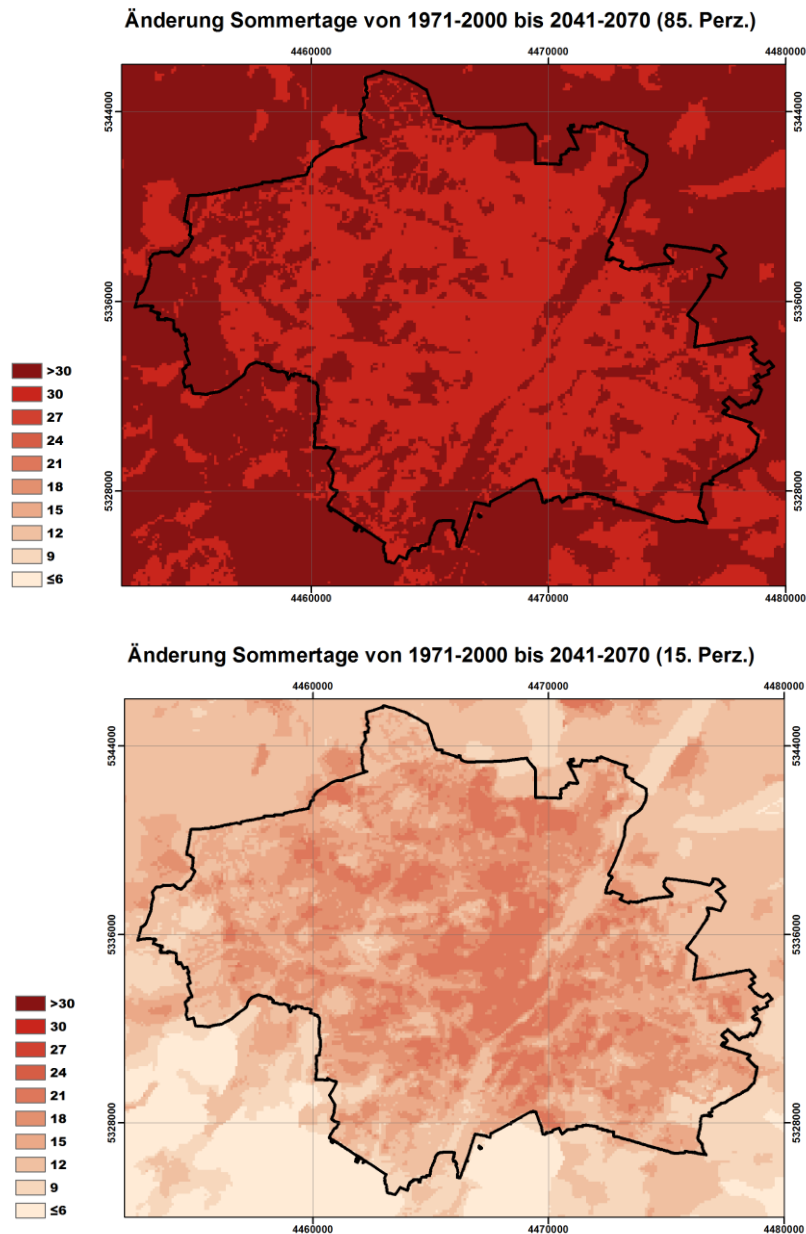


Abb. 6.4: Karten der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage für München (100 m Raster) im Zeitraum zwischen 1971-2000 und 2041-2070 (A1B Szenario, 15. und 85. Perzentil).

Durch diese Vorgehensweise erfolgt eine implizite Korrektur des den regionalen Klimaprojektionen inhärenten Biasfehlers (Biaskorrektur durch Delta-Methode). Im mittleren und unteren Diagramm von Abb. 6.3 sind die so berechneten 15. und 85. Perzentilkarten für die mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen für den Zeitraum 2041-2070 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen in den dicht besiedelten Stadtquartieren Münchens eine Spannweite von ca. 60 bis 68 Sommertage (15. Perzentil) und ca. 68 bis 76 Sommertage (85. Perzentil). Die in Tabelle 6.2 für vier Standorte in München gelisteten Werte für 2041-2070 liegen je nach Standort zwischen 42 und 59 Sommertagen pro Jahr für das 15. Perzentil sowie zwischen 61 und 72 Sommertagen für das 85. Perzentil.

Prozentual betrachtet ergeben die Stadtklimaprojektionen für das Emissionsszenario A1B und den Zeitraum 2041-2070 im Münchener Stadtgebiet eine Zunahme der jährlichen Anzahl an Sommertagen zwischen etwa 35 und 40 % für das 15. Perzentil und zwischen etwa 65 und 100 % für das 85. Perzentil (relativ zum Zeitraum 1971-2000). Das bedeutet, dass bei Eintreten des Szenarios A1B bis zur Mitte des Jahrhunderts im ungünstigen Fall (85. Perzentil) die jährliche Anzahl an Sommertagen bis zu doppelt so hoch werden kann wie im Zeitraum 1971-2000.

Hierbei werden die Stadtquartiere, die bereits heute schon eine hohe Anzahl an Sommertagen aufweisen, auch zukünftig am häufigsten von hohen Temperaturen betroffen sein. Die Anzahl an Tagen mit hohen Temperaturen wird auch in entsiegelten und begrünten Flächen sowie Flächen mit Baumbestand (Parks und stadtnahe Wälder) zukünftig zunehmen. Im Vergleich zur umgebenden Bebauung stellen diese Flächen aber auch zukünftig kühlere Refugien mit hoher stadtplanerische Bedeutung dar.

6.1.4 Zusammenfassung

Unter Verwendung des Stadtklimamodells MUKLIMO_3 und der Quadermethode wurde die räumliche Verteilung der Anzahl Sommertage in der Landeshauptstadt München zunächst für den Referenzzeitraum 1971-2000 berechnet und mit Beobachtungen verglichen. Zusätzlich wurden die möglichen Änderungen für die Zukunft ermittelt. Dies führte zu folgenden Ergebnissen:

- Die Anzahl der ermittelten **Sommertage im Referenzzeitraum** (1971-2000) variiert stark innerhalb des Stadtgebiets abhängig von der Landnutzungsklasse. Waldgebiete und Wasser weisen mit unter 20 Sommertagen pro Jahr die niedrigsten mittleren Werte auf, während in dicht besiedelten Innenstadtgebieten bis zu 48 Sommertage pro Jahr im Mittel auftreten. Ein Vergleich zwischen Modellergebnissen und Messungen zeigt eine gute Übereinstimmung.
- Die Modellrechnungen für die Zukunft basierend auf einem Ensemble von regionalen Klimaszenarien unter Annahme des A1B-Szenarios und projizieren eine **Zunahme der Anzahl von Sommertagen** bis zum Ende des Jahrhunderts im gesamten Stadtgebiet. Im günstigen Fall (15. Perzentil) liegen die **Zunahmen zwischen 1971-2000 und 2041-2070 zwischen 35-40 %**. Im ungünstigen Fall kann es bereits zur Mitte des Jahrhunderts (2041-2070) zu einer **Verdopplung der Anzahl von Sommertagen kommen (Zunahme um 65-100 %)**.
- Die Änderungen im 15. Perzentil sind leicht abhängig von der Landnutzungsklasse mit einer leicht höheren Zunahme in bebauten Gebieten. Für das 85. Perzentil zeigen die Modelle eine von der Landnutzungsklasse unabhängige Zunahme von Sommertagen. Somit wird die **Wärmebelastung im gesamten Stadtgebiet ansteigen**, entsiegelte und begrünte Flächen sowie Parks und stadtnahe Wälder werden aber auch in Zukunft kühler sein als der dicht bebaute Innenstadtbereich und haben dadurch eine hohe stadtplanerische Bedeutung.

6.2 CCLM-Ergebnisse zur regionalen Klimatologie des Alpinen Pumpens

Um den Einfluss des Alpinen Pumpens auf das Stadtklima von München bewerten zu können, ist es wichtig, die Häufigkeit und Intensität und die räumliche Ausdehnung dieses regionalen thermischen Windsystems zu untersuchen. In Ergänzung zu Beobachtungsdaten bieten hierzu die Computersimulationen mit CCLM (siehe Kapitel 3.3) eine flächendeckende, 3-dimensionale Datenbasis. Die hier präsentierten CCLM-Ergebnisse wurden zu einem großen Teil im Rahmen einer Bachelorarbeit gewonnen und sind in einem Fachartikel publiziert (GRAF 2014 und GRAF et al., 2016).

6.2.1 Identifikation der Tage mit Alpinem Pumpen

6.2.1.1 Kriterien zur Identifikation

Es wurden vier auf Literaturangaben basierende Kombinationen meteorologischer Kriterien getestet, um die für Alpines Pumpen günstigen Tage durch CCLM-Ergebnisse zu identifizieren (Tabelle 6.4). Die für die Anwendung aller Kriterien benötigten Daten stehen durch die stündlich vorliegenden CCLM-Simulationsergebnisse bereit, sind prinzipiell aber auch durch Routineerhebungen des Klimamessnetzwerks verfügbar.

Die **solare Strahlung** wird als Haupteinflussgröße des Alpinen Pumpens gesehen (ZAITCHIK et al., 2007). Aufgrund dessen wird die Tagessumme der Sonneneinstrahlung (Globalstrahlung) von $\geq 20 \text{ MJ/m}^2$ als erste Kenngröße (**S-Kriterium**) für die Analyse der CCLM-Ergebnisse definiert. Dieser Schwellwert folgt einer auf Messdaten basierenden Studie von LUGAUER und WINKLER (2005).

Die zweite Kriterienkombination (**Hw_S**) verwendet ebenfalls das S-Kriterium, schließt aber Tage mit **Höhenwindgeschwindigkeiten in 850 hPa** $\geq 6 \text{ m/s}$ um 01:00, 13:00 oder 00:00 MEZ aus (Hw-Kriterium). Hohe Windgeschwindigkeiten, verursacht durch hohe Luftdruckunterschiede auf der großräumigen Skala,

Tabelle 6.4: Für die Identifizierung von Tagen mit günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen verwendete Kriterienkombinationen mit Schwellenwerten und mittlerer jährlicher Anzahl an günstigen Tagen entsprechend der CCLM-Ergebnisse für den Zeitraum 1989-2008.

Bezeichnung der einzelnen Kriterien-kombinationen	Schwellenwerte für meteorologische Kriterien	Ermittelte Tage pro Jahr
S	Tagessumme der Sonnenstrahlung [#] $\geq 20 \text{ MJ/m}^2$	60,0
Hw_S	Höhenwindgeschwindigkeit* $< 6 \text{ m/s}$ und Tagessumme der Sonnenstrahlung $\geq 20 \text{ MJ/m}^2$	20,4
Ns_Hw	Tagessumme des Niederschlags [#] $< 1 \text{ mm}$ und Höhenwindgeschwindigkeit* $< 6 \text{ m/s}$	52,1
Ns_Hw_Bd	Tagessumme des Niederschlags [#] $< 1 \text{ mm}$ und Höhenwindgeschwindigkeit* $< 6 \text{ m/s}$ und Tagesmittel der Wolkenbedeckung [#] $< 5/8$	38,9

[#] gemittelt über das CCLM-Auswertegebiet

* basierend auf Windgeschwindigkeiten in 850hPa über Oberschleißheim um 01:00, 13:00 und 00:00 MEZ

wirken der Entstehung von durch Temperaturunterschieden angetriebenen lokalen Winden entgegen oder maskieren diese (STEWART et al. 2002; KOSSMANN et al. 2002). Die aus den CCLM-Simulationen verwendete 850 hPa Windgeschwindigkeit stammt aus Modellgitterzellen über Oberschleißheim (Koordinaten: 48,17° N; 11,56° O).

Die anderen beiden Kriterienkombinationen sind unabhängig von der Sonneneinstrahlung und können als Ausschlusskriterien bezeichnet werden. So reduziert **Niederschlag** bekanntlich die fühlbaren Wärmeströme an der Erdoberfläche und dadurch das Entstehen von thermischen Windsystemen (GEIGER et al. 1995). Die dritte Kriterienkombination (**Ns_Hw**) kombiniert das Hw-Kriterium mit dem Ausschluss von Tagen mit Niederschlagssummen >1mm im räumlichen Mittel über das CCLM-Auswertegebiet (Ns-Kriterium).

Die vierte Kriterienkombination (**Ns_Hw_Bd**) verwendet zusätzlich zu den Hw- und Ns-Kriterien einen **maximalen Wolkenbedeckungsgrad (Bd-Kriterium)** als Proxy für die solare Einstrahlung. Der Schwellenwert des mittleren Gesamtbedeckungsgrades wurde für den Untersuchungsraum mit 5/8 festgelegt, um Tage mit einer täglichen solaren Strahlungsmenge von weniger als 75 % der theoretisch maximal erreichbaren Strahlung auszuschließen (SCHAFER et al. 1996).

Mit den genannten Kriterien werden wie beschrieben Tage identifiziert, an denen die meteorologischen Bedingungen günstig für die Ausbildung des Alpenen Pumpens sind. Alternativ wurde zusätzlich ein **Windwechsel-Kriterium** angewendet, um Tage auszuwählen, an denen tatsächlich eine entsprechende Winddrehung stattfindet. Dazu wird überprüft, ob der bodennahe Wind um 04:00 MEZ aus den Alpen in Richtung Vorland weht (Windrichtung zwischen 120° und 240°), um 14:00 MEZ vom Vorland in Richtung Alpen gerichtet ist (Windrichtung zwischen 300° und 60°) und um 00:00 MEZ wieder aus den Alpen in Richtung Vorland weht. Durch Mittelung der CCLM-Ergebnisse für den gesamten Simulationszeitraum über alle vom Windwechsel-Kriterium gewählten Tage in einem südlich von München befindlichen Gebiet (aus einer 8x8 Gitterzellenmatrix) ergab sich eine mittlere tägliche solare Strahlungssumme von etwa 18 MJ/m², eine mittlere 850 hPa Windgeschwindigkeit über München von etwa 6,5 m/s, eine tägliche Niederschlagssumme von etwa 1,5 mm und ein mittlerer Bedeckungsgrad zwischen 4/8 und 5/8. Diese Ergebnisse untermauern die Eignung der sich auf Literaturrecherchen basierenden und in Tabelle 6.4 dargestellten Schwellenwerte für die Definition günstiger Voraussetzungen für das Auftreten von Tagen mit Alpinem Pumpen. Um zu bewerten, ob durch die vier Kriterienkombinationen (Tabelle 6.4) als günstig für Alpines Pumpen eingestufte Tage auch wirklich Charakteristika einer regionalen thermischen Zirkulation zwischen Alpenvorland und Alpen aufweisen, wurde das Windwechselkriterium zusätzlich auch nur auf die von den vier Kombinationen ermittelten Tage angewandt.

6.2.1.2 Häufigkeiten von Tagen mit für das Alpine Pumpen günstigen Bedingungen

Im Durchschnitt über den Gesamten CCLM-Simulationszeitraum erfüllen 60 Tage pro Jahr das S-Kriterium in der Modellsimulation (Tabelle 6.4). Dieser Wert liegt im Rahmen der 67 Tage pro Jahr, die aus Beobachtungsdaten von LUGAUER und WINKLER (2005) ermittelt wurden und passt, wenn man das zusätzliche Niederschlagskriterium und die unterschiedlichen Zeiträume betrachtet, auch zu den 49 Tagen die für den Zeitraum der temporären Messungen ermittelt wurden (siehe Kapitel 5.2). Die mittlere jährliche Anzahl von identifizierten Tagen auf Basis der anderen drei Kriterienkombinationen ist niedriger und bewegt sich zwischen 20 und 52. Abb. 6.5 verdeutlicht, wie viele der vier Kriterienkombinationen an jedem einzelnen Tag des 20-Jahreszeitraums der CCLM-Modellsimulation erfüllt sind. Alle Kriterienkombinationen zeigen eine starke Variabilität innerhalb der einzelnen Jahre sowie zwischen Jahren mit größerer Häufigkeit (z.B. 2003) und Jahren mit kleinerer Häufigkeit (z.B. 1993). Insgesamt werden 25,9 % aller Tage zumindest von einem der

vier Kriterienkombinationen identifiziert, aber nur ungefähr der Hälfte dieser Tage werden von zwei, drei oder vier Kriterienkombinationen erfüllt.

Auf der einen Seite wird die tägliche Strahlungsmenge von mindestens 20 MJ/m² nur während der Monate von April bis September (mit höchsten Häufigkeiten von Mai bis August) erreicht. Durch Kombination des S-Kriteriums mit dem Hw-Kriterium wird nur noch ein Drittel der das S-Kriterium erfüllenden Tage ausgewählt (siehe Tabelle 6.4). Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass an zwei Dritteln der Tage mit hoher Sonneneinstrahlung die thermischen Windsysteme von moderaten oder starken großräumigen Winden beeinflusst sind.

Auf der anderen Seite treten Tage für die beiden Kriterienkombinationen Ns_Hw und Ns_Hw_Bd ohne Schwellenwert für die Strahlung das ganze Jahr über auf. Mit weniger Tagen des Alpinen Pumpens pro Jahr erscheinen diese zwei Kriterienkombinationen strikter als das S-Kriterium, insbesondere während der warmen Jahreszeit. Aufgrund der jahreszeitlichen Verteilung sind strahlungsabhängige Kriterien offenbar vor allem zur Studie der Einflüsse des Alpinen Pumpens auf die städtische Wärmebelastung oder photochemischen Smogereignisse geeignet, während für Untersuchung der bei Hochdruckwetterlagen ganzjährig auftretenden städtischen Durchlüftungsprobleme eher die Anwendung strahlungsunabhängiger Kriterienkombinationen zu empfehlen ist.

Die Trefferquote des Windwechsel-Kriteriums zeigt eine hohe räumliche Variabilität, sowohl bei der Anwendung auf alle Tage als auch bei Anwendung auf die vier Datensätze der durch die Kriterienkombinationen identifizierten Tage. Für die Tage, die durch die vier Kriterienkombinationen ausgewählt wurden, ergeben sich hohe Trefferquoten zwischen 75 und 85 % für die Region zwischen München und dem Alpenvorland (ohne Abbildung). Die Analyse von 8x8 CCLM-Gitterzellen zwischen München und dem Alpenvorland (siehe Abb. 6.6) zeigt, dass das Windwechselkriterium an 81 % der Tage erfüllt ist, an denen auch das S-Kriterium oder die Hw_S-Kriterienkombination gegeben ist. Für die Tage, die durch die Ns_Hw- und die Ns_Hw-Bd-Kriterienkombinationen ausgewählt sind, ergeben sich für das Windwechselkriterium etwas kleinere Anteile von

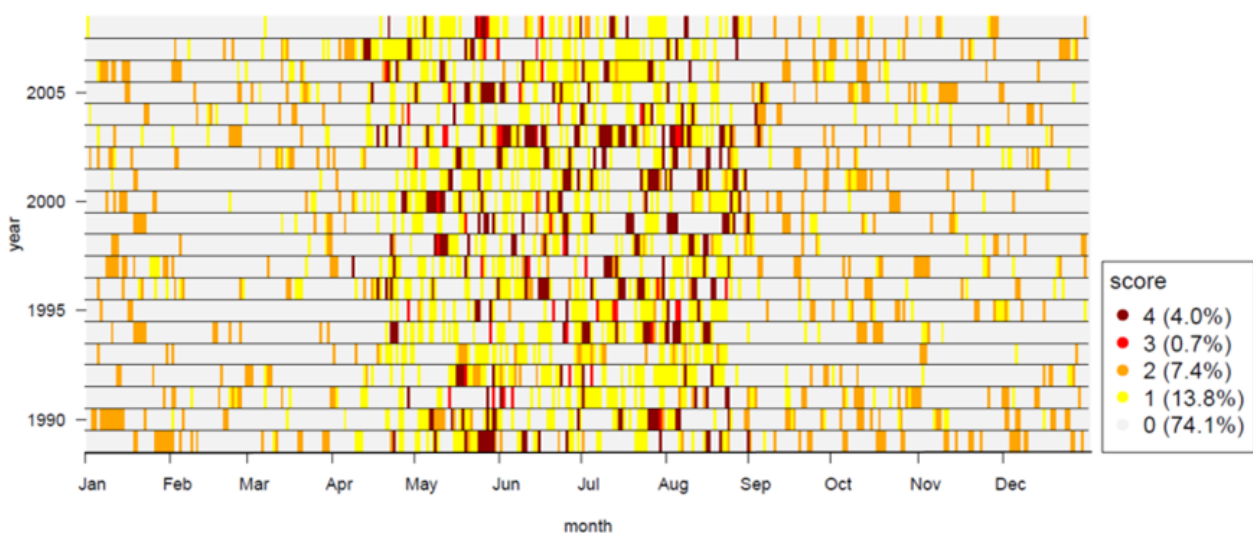


Abb. 6.5: Tägliche Anzahl an erfüllten Kriterienkombinationen aus Tabelle 6.4 (Score) für die Identifizierung von Tagen mit günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen. 0= kein Kriterium wurde erfüllt, 1: eine Kriterienkombination wurde erfüllt, ...,4: alle Kriterienkombinationen wurden erfüllt. Die Graphik gibt keinen Aufschluss darüber welche Kriterienkombinationen erfüllt wurden.

77 % und 78 %. Bei Anwendung auf alle Tage liegt die Trefferquote des Windwechselkriteriums bei 62 Tagen pro Jahr. Die relativ hohen Trefferquoten des Windwechselkriteriums lassen den Schluss zu, dass sich durch Alpinen Pumpen entstehende Windsignaturen zum großen Teil durch die vier Kriterienkombinationen erkennen lassen. Im nachfolgenden Abschnitt werden die Winddaten der ausgewählten Tage für die Analyse der mittleren zeitlichen und räumlichen Merkmale des Alpinen Pumpens ausgewertet

6.2.2 Ergebnisse – Klimatologie-Analyse der Tage Alpinen Pumpens

Für die Tage, die die im Abschnitt 6.2.1 beschriebenen vier Kriterienkombinationen erfüllen, wurde für jede Modellgitterzelle der mittlere Tagesgang des Windes berechnet. Durch visuelle Prüfung der mittleren stündlichen Karten des bodennahen Windes und der mittleren stündlichen vertikalen Schnitte des Windfelds durch München zeigt sich, dass der Tageszyklus des Alpinen Pumpens in den mittleren Windfeldern aller vier Kriterienkombinationen sehr ausgeprägt ist (GRAF 2014).

Tabelle 6.5 fasst die mittleren Tagesabschnitte der nördlichen Strömung in Richtung Alpen, der südlichen Strömung in Richtung Alpenvorland und der Umstellungsphasen zusammen. Für München bedeuten die tagsüber in Richtung Alpen gerichteten Winde eine Anströmung aus nördlichen Richtungen, z.B. aus dem Donautal. Die nächtliche Strömung aus Süden bewirkt für München das Heranführen von besonders kühler Luft aus dem Alpenraum. In Übereinstimmung mit LUGAUER und WINKLER (2005) und den Ergebnissen aus Kapitel 5.2 ist die nördliche Strömungsphase kürzer als die südliche Strömungsphase: Dies gilt auch für das S-Kriterium und die Hw-S-Kriterienkombination, obwohl diese aufgrund der Strahlungsabhängigkeit nur von Tagen mit länger andauernder Tages- als Nachtzeit erfüllt werden. Die aus der Modellstudie ermittelten Tagesabschnitte des Alpinen Pumpens passen qualitativ sehr gut zu den Ergebnissen der temporären Messungen (siehe Abschnitt 5.2.2).

Zwischen 20:00 und 21:00 MEZ beginnt die südliche Strömung des Alpinen Pumpens von den Alpen ins Münchner Stadtgebiet. Morgens bildet sich ab 10:00 bis 12:00 MEZ eine nördliche Strömung von der Schotterebene und dem Münchner Stadtgebiet Richtung Alpen aus. Wegen stärkerer jahreszeitlicher Schwankung der Zeiten des Sonnenaufgangs und Sonnenuntergangs, zeigt die Windklimatologie bei Anwendung strahlungsunabhängiger Kriterienkombinationen längere Übergangsphasen zwischen den südlichen und nördlichen Strömungsphasen des Alpinen Pumpens.

Tabelle 6.5: Durchschnittliche Zeiten der nördlichen Strömung von der Schotterebene und dem Münchener Stadtgebiet Richtung Alpen (rot), der südlichen Strömung von den Alpen ins Münchener Stadtgebiet (blau) und Übergangsphasen des Alpinen Pumpens, ermittelt aus den mittleren stündlichen Windfeldern für Tage mit verschiedenen Kriterienkombinationen. Zeitangaben in MEZ. Für die in München in der warmen Jahreszeit geltende mitteleuropäische Sommerzeit (MESZ) muss eine Stunde addiert werden (MEZ+1).

Uhrzeit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	00
S	blau	blau	blau	blau	blau	blau	blau	blau	braun	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	braun	blau	blau	blau	blau
S_Hw	blau	blau	blau	blau	blau	blau	blau	blau	braun	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	braun	blau	blau	blau	blau
Ns_Hw	blau	blau	blau	blau	blau	blau	blau	blau	blau	braun	braun	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	braun	braun	blau	blau	blau	blau
Ns_Hw_Bd	blau	blau	blau	blau	blau	blau	blau	blau	blau	braun	braun	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	braun	braun	blau	blau	blau	blau

Wegen der Ähnlichkeit der Ergebnisse und aus Gründen der gebotenen Kurzfassung konzentrieren sich im Folgenden die Einzelheiten der Darstellung und Analyse der mittleren Windfelder der CCLM-Simulation auf das S-Kriterium und die Ns_Hw-Kriterienkombination, die jeweils strahlungsabhängige beziehungsweise strahlungsunabhängige Auswahlkriterien repräsentieren. Details zu allen Kriterienkombinationen gibt GRAF (2014).

6.2.2.1 Bodennahe zeitliche und räumliche Merkmale

Abb. 6.6 zeigt die Vektoren des mittleren Windfeldes in 10 m über Grund um 01:00 und 13:00 MEZ für die Tage, die während des simulierten 20-Jahreszeitraums durch das S-Kriterium und die Ns_Hw-Kriterienkombination ausgewählt wurden. Zusätzlich sind in Abb. 6.7 Raum-Zeit-Schnitte der Südkomponente des Windes in 10 m über Grund auf dem Längengrad von München (11,58°O), gemittelt über die ausgewählten Tage und 5 Gitterzellen (ca. 14 km) in zonaler Richtung, dargestellt.

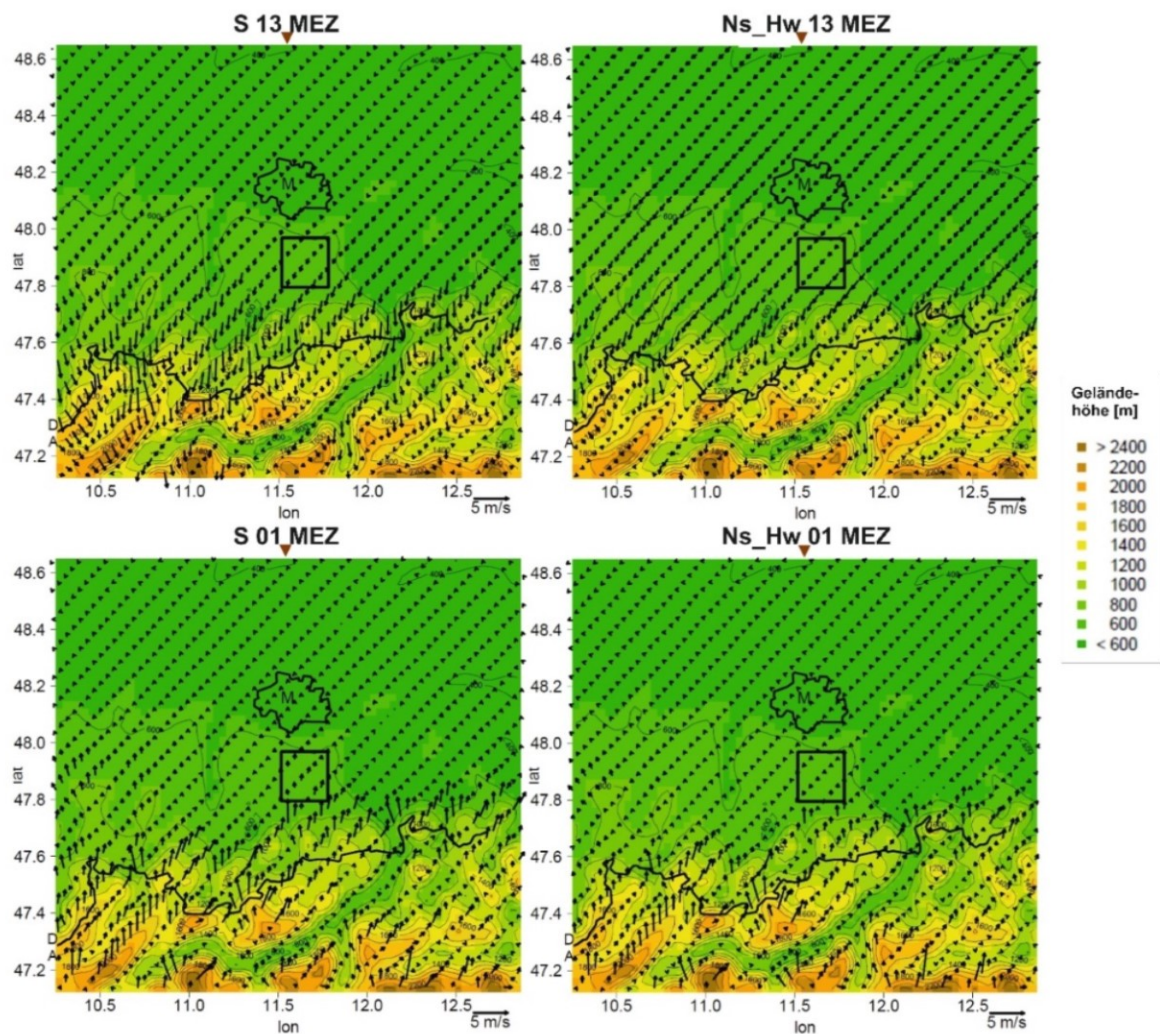


Abb. 6.6: Mittleres Windfeld in 10 m über Grund um 13:00 MEZ (oben) und 01:00 MEZ (unten) für das S-Kriterium (links) und die Ns_Hw-Kriterienkombination (rechts). An den Achsen sind der Längengrad (lon) und der Breitengrad (lat) angegeben. Dargestellt sind das Stadtgebiet von München (M), die deutsch-österreichische Grenze (dicke schwarze Linie) und die Geländehöhe (farbige Darstellung, dünne Konturlinie). Daten der durch einen schwarzen Rahmen umrandeten 8x8 Gitterpunkte südlich von München wurden zur Berechnung des Windwechselkriteriums verwendet. Dreiecke am oberen Rand der Diagramme zeigen die geographische Länge der in Abb. 6.7 und 6.8 gezeigten meridionalen Schnitte.

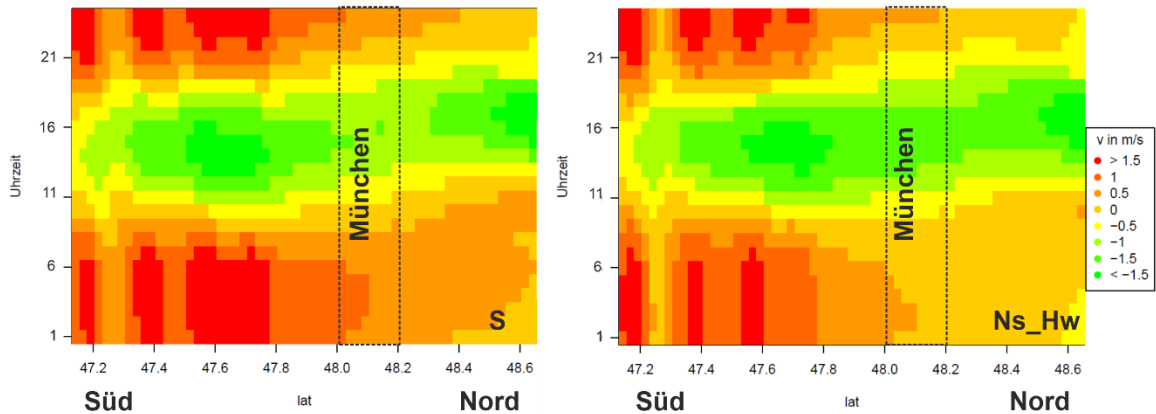


Abb. 6.7: Raum-Zeit Schnitte der Südkomponente des Windes in 10 m über Grund auf dem Längengrad von München, gemittelt über fünf Gitterzellen in zonaler Richtung für das S-Kriterium (links) und die Ns_Hw-Kombination (rechts). Uhrzeit in MEZ. Die schwarz eingezeichneten Linien markieren die nördliche und südliche Stadtgrenze von München.

In Übereinstimmung mit Beobachtungen dehnt sich die simulierte regionale Zirkulation bis zum Donautal aus, welches etwa 100 km nördlich der Alpen liegt. Im Gebiet von München (etwa 48,15°N) erreichen die mittleren Geschwindigkeiten der südlichen Windkomponente 0,5-1,0 m/s während der Nacht und bis zu $\approx 1,5$ m/s tagsüber (Abb. 6.7). Die nächtlichen Windgeschwindigkeiten nördlich von München sind sehr niedrig (unter 0,5 m/s). Dies ist wahrscheinlich durch die sich im Donautal in der kühleren Jahreszeit und nachts formenden Kaltluftseen begründet (ZÄNGL 2005). Nördlich von München dreht sich die Windrichtung tagsüber allmählich in nordöstliche Richtungen, sowohl für das S-Kriterium als auch für die Ns_Hw-Kriterienkombination. In den Beobachtungen ist diese Drehung schon südlich von München zu beobachten. Die gemessenen Windfelder sind allerdings auch von sehr lokalen Effekten beeinflusst und das großflächige Windgeschehen wird durch das Modell gut wiedergegeben.

Am Alpenrand und insbesondere an den Talausgängen der Alpen ist das regionale Gebirgswindsystem durch Hang- und Talwindssysteme überlagert. Die simulierten mittleren Windgeschwindigkeiten sind dort daher stärker und erreichen örtlich etwa 2,0 m/s während des Tages und 2,5 bis 3,0 m/s während der Nacht (Abb. 6.6). Die in Abbildung 6.7 dargestellten Zeit-Raum Schnitte der bodennahen meridionalen Windkomponente (Südkomponente des Windes) zeigen, dass der tageszeitliche Zyklus des Alpenen Pumpens mit zunehmender Entfernung von den Alpen um bis zu 3 Stunden verzögert auftritt. In München beträgt die Verzögerung im Vergleich zum Alpenrand etwa 2 Stunden. Während die räumliche Ausdehnung sowie die bodennahe Windgeschwindigkeit und Windrichtung des regionalen Alpenen Pumpens im Alpenvorland aus den CCLM-Simulationen gut mit den Beobachtungen von LUGAUER und WINKLER (2005) übereinstimmen, ist die Güte der simulierten Hang- und Talwindssysteme durch die horizontale Modellauflösung von 2,8 km begrenzt.

6.2.2.2 Vertikale Struktur des Alpenen Pumpens

Die Vertikalstruktur des Alpenen Pumpens ist stark von der Tageszeit und von der Entfernung zu den Alpen abhängig (Abb. 6.8). Die Betrachtung der meridionalen Vertikalschnitte des simulierten Windfeldes durch München zeigt, dass die höheren Windgeschwindigkeiten in der Nähe der Alpen – wie im vorangegangenen Abschnitt über bodennahe Winde diskutiert – auch in höheren Lagen nachweisbar sind. Die Analyse der stündlich vorliegenden Vertikalschnitte (die hier nur für zwei Termine dargestellt sind) belegen ebenfalls, dass die

tageszeitlichen Windrichtungsänderungen des Alpinen Pumpens in Alpennähe früher erfolgen als weiter im Norden im Alpenvorland. Die Dicke der bodennah tagsüber in Richtung Alpen oder nachts aus den Alpenströmenden Luftschichten nimmt von Norden nach Süden zu. Die mittleren Winde in über 2500 m Höhe reflektieren schwache Winde auf der großräumigen Skala, die während der das S-Kriterium und die Ns-Hw-Kombination betreffenden Tage meist aus nördlichen Richtungen wehen (Abb. 6.8).

Infolge der synoptischen Höhenwindrichtung aus Norden kann die vertikale Ausdehnung der Schicht mit südlicher Strömung aus den Alpen leichter als die Dicke der Schicht mit nördlicher Strömung in Richtung der Alpen bestimmt werden (Abb. 6.8). Um 01:00 MEZ erreicht die mittlere Mächtigkeit der südlichen Strömung verbreitet bis zu 400 m, in München etwa bis 300 m. Die Windgeschwindigkeit in der südlichen Strömung erreicht nahe den Alpen bis zu 3 m/s, sowohl für das S-Kriterium als auch für die Ns_Hw-Kombination. Hohe südliche Strömungswindgeschwindigkeiten ergeben sich für zwei Zonen, die durch eine Zone mit schwachen Winden voneinander getrennt sind. Eine Zone befindet sich über den steilsten Nordhängen der Alpen, wo die regionale Gebirgswindzirkulation stark von lokalen Kaltluftabflüssen verstärkt wird. Die zweite Zone findet sich weiter nördlich, ungefähr auf dem halben Weg zwischen den Alpen und München. Diese Zone mit hohen Windgeschwindigkeiten verlagert sich während der Nacht nordwärts und schwächt sich dort zum Morgen hin ab.

Die mittlere simulierte Mächtigkeit der Schicht mit nördlicher Strömung um 13:00 MEZ beträgt für die Ns_Hw-Kombination in München etwa 400 m. Für das S-Kriterium beträgt die mittlere Schichtdicke etwa 1000 m. In den nachfolgenden drei Stunden kann in München die maximale Schichtdicke der nördlichen Strömung bis zu 700 m (Ns_Hw-Kombination) beziehungsweise 1500 m (S-Kriterium) erreichen.

Die stärksten nördlichen Winde treten über dem Alpenvorland, und für das S-Kriterium auch über den Nordhängen der Alpen auf. Insgesamt verursacht die stärkere durchschnittliche Einstrahlung beim S-Kriterium mit Windgeschwindigkeiten bis zu 3 m/s eine stärkere nördliche Strömung in die Alpen, während die mittlere nördliche Strömungsgeschwindigkeit für die Ns_Hw-Kombination aufgrund des Einbezugs von Tagen mit niedriger Sonneneinstrahlung während der kühleren Jahreszeiten auf etwa 1,5 m/s begrenzt ist.

Der bodennahe Zweig der thermischen Zirkulation weist sowohl tags als auch nachts eine jetartige Vertikalstruktur der Windgeschwindigkeit auf. Das Jet-Maximum liegt meist zwischen 30 und 150 m über Grund. Im Fall der tagsüber auftretenden für das S-Kriterium liegt es etwas höher und kann lokal 200-300 m über Grund erreichen.

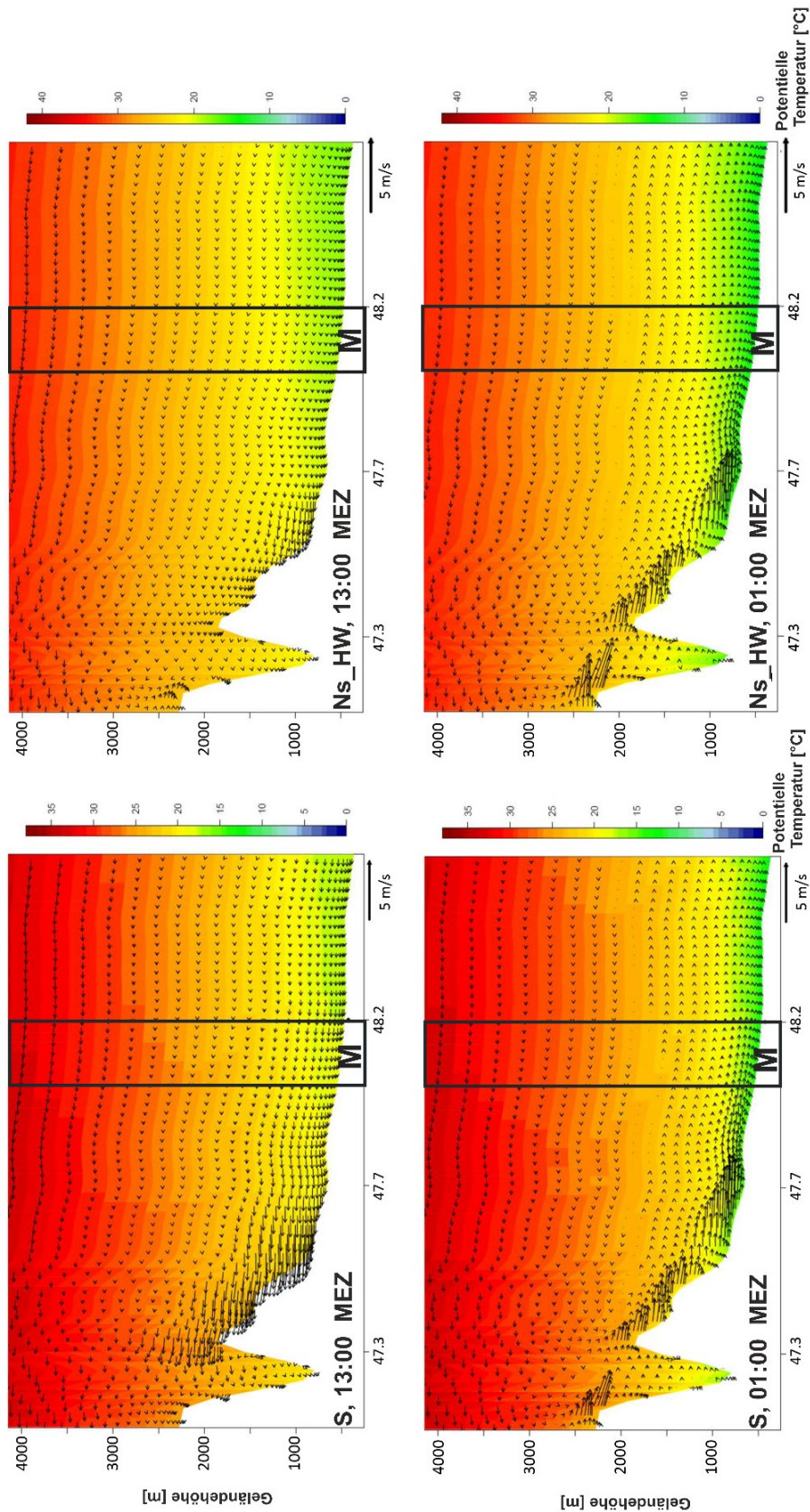


Abb. 6.8: Vektordarstellung der mittleren südlichen und vertikalen Windkomponenten und entlang eines meridionalen Vertikalschnitts durch München um 13:00 MEZ (oben) und 01:00 MEZ (unten) für das S-Kriterium (links) und die Ns_Hw-Kombination (rechts). Die Farbschattierung im Hintergrund zeigt die mittlere potentielle Temperatur. Die schwarz eingezeichneten Linien markieren die nördliche und südliche Stadtgrenze von München.

6.2.3 Zusammenfassung

Die stündlichen und täglichen Ergebnisse der regionalen CCLM-Klimasimulation für den Zeitraum 1989-2008 wurden verwendet, um Tage mit Alpinem Pumpen zu identifizieren und die mittleren Tagesgänge der Richtung, Intensität und Ausdehnung der regionalen thermischen Zirkulation zu bestimmen. Diese ergänzen die Auswertung der Messdaten aus Kapitel 5.2 und lassen eine großräumige, flächendeckende Analyse des Windsystems zu. Des Weiteren ermöglichen sie eine Betrachtung in verschiedenen Höhenstufen. Die wesentlichen Erkenntnisse sind wie folgt:

- Die mittels vier unterschiedlicher Kriterienkombinationen bestimmte **mittlere Anzahl von Tagen mit für Alpinen Pumpen günstigen Bedingungen variiert zwischen 20 und 60 Tagen pro Jahr**. Ein einfaches Windwechselkriterium, welches zu bestimmten Zeiten am Tag eine nördliche Strömung in Richtung Alpen bzw. eine südliche Strömung von den Alpen in das Vorland fordert, ist im Mittel an 62 Tagen pro Jahr erfüllt.
- Für alle vier Kriterienkombinationen zeigen die ausgewählten Tage mittlere Windfelder, die den erwarteten täglichen Zyklus des Alpinen Pumpens widerspiegeln.
- Die durch die vier Kriterienkombinationen identifizierten Tage wurden durch Anwendung des Windwechselkriteriums jeweils bezüglich des Auftretens täglicher Windrichtungsänderungen getestet. Für das Gebiet zwischen München und dem Alpenvorland zeigt sich, dass je nach dem, mit welcher Kriterienkombination, die Tage ausgewählt werden, an 77 bis 81 % der ausgewählten Tage tägliche Windrichtungsumkehrungen auftreten.
- Die durchschnittliche jährliche Anzahl von 60 Tagen, die das das Strahlungskriterium (S-Kriterium) erfüllen, stimmt gut mit den 67 Tagen pro Jahr überein, die durch die Beobachtungen und LUGAUER und WINKLER (2005) ermittelt wurden.
- In Übereinstimmung mit LUGAUER und WINKLER (2005) **erstreckt sich die simulierte regionale thermische Zirkulation von den Alpen bis in das sich etwa 100 km nördlich der Alpen liegende Donautal**.
- Die **simulierte, mittlere oberflächennahe Windgeschwindigkeit des Alpinen Pumpens** im Gebiet von München schwankt zwischen **0,5 und 1,0 m/s während der Nacht** und erreicht **bis zu 1,5 m/s am Tag**. Am Alpenrand und an den Talausgängen der Alpen wird das regionale Gebirgswindsystem durch Hang- und Talwindssysteme verstärkt. Die mittlere Windgeschwindigkeit erreicht hier örtlich etwa 2,0 m/s während des Tages und etwa 2,5 bis 3,0 m/s während der Nacht.
- Im Alpenvorland hängen die Zeiten des Einsetzens der Einströmungs- und Ausströmungsphasen des Alpinen Pumpens von der Entfernung zu den Alpen ab. Im Vergleich zu Standorten am Alpenrand ist nördlich von München der tägliche Zyklus bis zu drei Stunden verzögert und in der Stadt München um etwa zwei Stunden verzögert. Für die untersuchten Kriterienkombinationen setzt in München abends die südliche Anströmung im Mittel zwischen 20:00 und 21:00 MEZ ein und ist zwischen 09:00 und 10:00 MEZ zu Ende. Die nördliche Anströmung setzt in München im Mittel zwischen 10:00 und 12:00 MEZ ein und ist zwischen 18:00 und 20:00 MEZ beendet.

- Die aus meridionalen Vertikalschnitten durch München abgeleitete mittlere Mächtigkeit der tagsüber auftretenden **Schicht mit nördlicher Strömung in Richtung Alpen liegt zwischen 500 m und 1500 m**; während die Dicke der **nächtlichen Strömungsschicht mit südlichen Winden maximal mehrere hundert Meter** erreicht.
- Die Vertikalschnitte des Windes zeigen eine jetartige Struktur in der thermischen Zirkulation zwischen den Alpen und dem Vorland mit den höchsten Windgeschwindigkeiten meist in Höhen zwischen 30 und 150 m über Grund. Größere Jet-Höhen von bis zu 200-300 m über Grund ergaben sich bei nördlicher Strömung tagsüber für das S-Kriterium.

Die Ergebnisse bestätigen, dass **Alpines Pumpen ein häufig erscheinendes Phänomen im Untersuchungsgebiet ist, das bei großräumig windschwachen Wetterbedingungen eine signifikante Durchlüftung im Stadtgebiet von München und im weiteren Untersuchungsgebiet** bewirken kann. München und weitere Städte im Alpenvorland profitieren bei Hitzesituationen sowohl zur Tages- als auch Nachtzeit von den durch Alpines Pumpen herangeführten kühleren Luftmassen des Umlands.

Im nachfolgenden Kapitel werden die CCLM-Auswertungen für eine Simulation mit dem lokalen städtischen Klimamodell MUKLIMO_3 unter typischen Bedingungen des Alpines Pumpens genutzt um die Auswirkungen des regionalen Windsystems auf die Temperaturverteilung in der Stadt zu untersuchen.

6.3 MUKLIMO_3-Fallstudie zum Alpines Pumpen in München

6.3.1 Tageszeitlich variierender Regionalwind

In einer idealisierten Fallstudie für einen sehr heißen und trockenen Sommertag wurde mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 die Auswirkung des Alpines Pumpens auf die Lufttemperaturverteilung in München simuliert. Mit Ausnahme des Windes wurden für die regionalen Klimabedingungen (siehe Kapitel 3.4) die gleichen Modelleinstellungen wie bei der Quadereckpunktsimulation 100 gewählt (siehe Tabelle 6.1 in Abschnitt 6.1.1). In Anlehnung an die Auswertungen der regionalen CCLM-Simulation (siehe Kapitel Abschnitt) und von Beobachtungsdaten (LUGAUER und WINKLER, 2005), erfolgte die Vorgabe des Regionalwindes tageszyklisch mit stündlichen Werten in 100 m über Grund wie folgt:

- Um 6:00 MEZ Einsetzen einer nördlichen Strömung (Windrichtung 0 Grad) von 0,4 m/s.
- Danach bis 15:00 MEZ allmähliche Zunahme der Windgeschwindigkeit auf 2,3 m/s bei gleichzeitiger Winddrehung auf ostnordöstliche Richtung (60 Grad).
- Bis 20:00 MEZ allmähliche Abschwächung des ostnordöstlichen Windes auf 0,6 m/s.
- Um 21:00 MEZ Einsetzen einer südlichen Strömung (180 Grad) von 0,9 m/s.
- Danach bis 1:00 MEZ allmähliche Zunahme der Windgeschwindigkeit auf 2,2 m/s bei gleichzeitiger Winddrehung auf südsüdwestliche Richtung (210 Grad).

- Zwischen 2:00 MEZ und 5:00 MEZ allmähliche Abschwächung des Windes auf 0,8 m/s bei gleichzeitiger Winddrehung auf westsüdwestliche Richtung (240 Grad).

6.3.2 Ergebnisse der idealisierten Fallstudie

Wie zu erwarten zeigen die Simulationsergebnisse, dass die zeitlich variierende regionale Windgeschwindigkeit und -richtung des Alpenen Pumpens das Lufttemperaturniveau und die räumliche Lage der maximalen Wärmeinsel in München stark beeinflussen (Abb. 6.9). Durch das Alpine Pumpen gibt es einen starken Tagesgang bezüglich der Lage des Gebietes im Luv von München, in dem das Einströmen von kühlerer Luft aus dem Umland auftritt.

Während der Nacht und in den sehr frühen Morgenstunden profitieren die südlichen und südwestlichen Stadtteile München von der Kühlwirkung der von den Alpen in das Vorland gerichteten Strömungsphase des Alpenen Pumpens. Das Eindringen der Kaltluft in das Stadtgebiet wird von der lokalen Geländeform und der Landnutzung beeinflusst. So ist in der bodennahen Wind- und Temperaturverteilung um 23:00 MEZ (siehe Abb. 6.9 oben) gut zu erkennen, dass die Kaltluft durch die Täler der Würm, der Isar und auch des Hachinger Baches kanalisiert wird. Besonders kühle Luft kommt von den Waldgebieten am südlichen Stadtrand (Forstrieder Park, Perlacher Forst). Allerdings sind die Windgeschwindigkeiten der Kaltluft von diesen Waldflächen durch die vegetationsbedingte Strömungsreibung geringer als in den Taleinschnitten. Aufgrund der südlichen Kaltluftströmung treten in den Modellsimulationen in München die höchsten Lufttemperaturen in den nördlichen und nordöstlichen Stadtteilen bis hin zur dortigen Stadtgrenze auf. Die maximale Wärmeinsel liegt somit nicht im Stadtzentrum, sondern in den nördlich davon gelegenen Stadtteilen Schwabing, Milbertshofen und Kieferngarten.

Dagegen zeigt sich am Morgen nach der Winddrehung des Alpenen Pumpens auf nördliche bis nordöstliche Richtungen eine ganz andere Verteilung der Lufttemperatur im Stadtgebiet. Nun sind es die im Norden und Nordosten gelegenen Stadtteile, in die kühlere ländliche Umgebungsluft durch das Alpine Pumpen geführt wird. Die städtische Warmluft wird in den Süden der Stadt verlagert. Als Folge erhält man um 07:00 MEZ die stärkste Wärmeinselintensität in den Stadtteilen Sendling und Giesing (siehe Abb. 6.9 unten).

Am Mittag und Nachmittag ist die simulierte Lufttemperaturverteilung in München aufgrund der starken Sonneneinstrahlung von der Oberflächentemperatur und dem vertikalen turbulenten Wärmetransport dominiert. Der Einfluss des Alpenen Pumpens auf die simulierte Lufttemperaturverteilung (advektive Kühlwirkung auf der gesamtstädtischen Skala) ist relativ gering, da auch die gesamtstädtische Wärmeinselintensität zu dieser Tageszeit (im Vergleich zur Nacht) nur schwach ausgeprägt ist (Abb. 6.10). Die simulierte Lufttemperaturverteilung für den Mittag und Nachmittag zeigt daher in ihrer Struktur große Ähnlichkeit mit Modellsimulationen bei denen das Alpine Pumpen nicht berücksichtigt wurde (siehe Kartenteil der Stadtklimaanalyse Landeshauptstadt München, GEO-NET 2014).

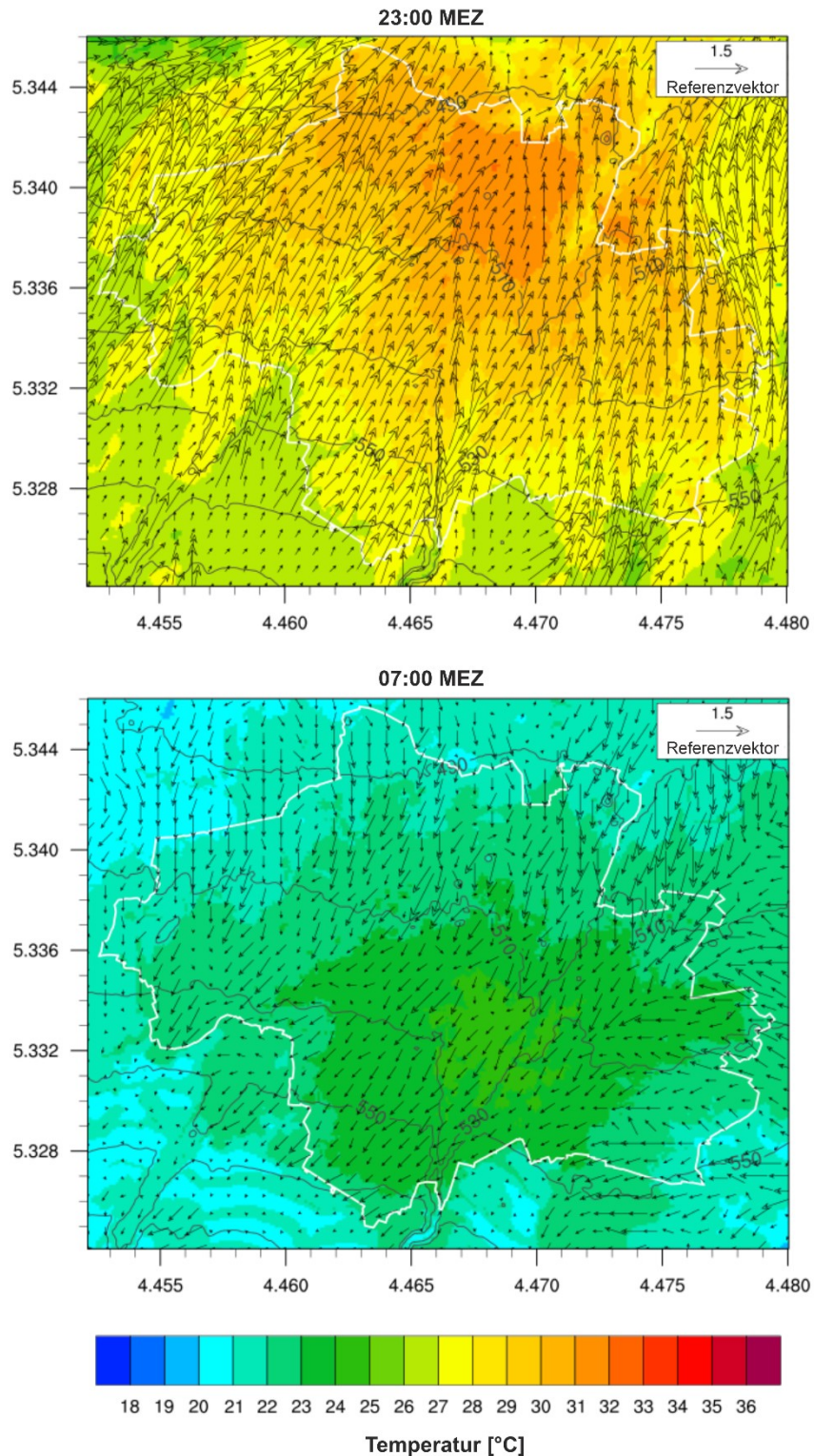


Abb. 6.9: MUKLIMO_3-Ergebnisse der bodennahen Lufttemperaturen (Farbskala, °C) und Windvektoren (m/s) in München (MUKLIMO_3-Auswertebereich) für die Simulation mit Alpinem Pumpen. Oben: 23:00 MEZ, unten: 07:00 MEZ. Schwarze Konturlinien zeigen die Geländehöhe in 20 m-Intervallen. Die weiße Linie zeigt die Stadtgrenze.

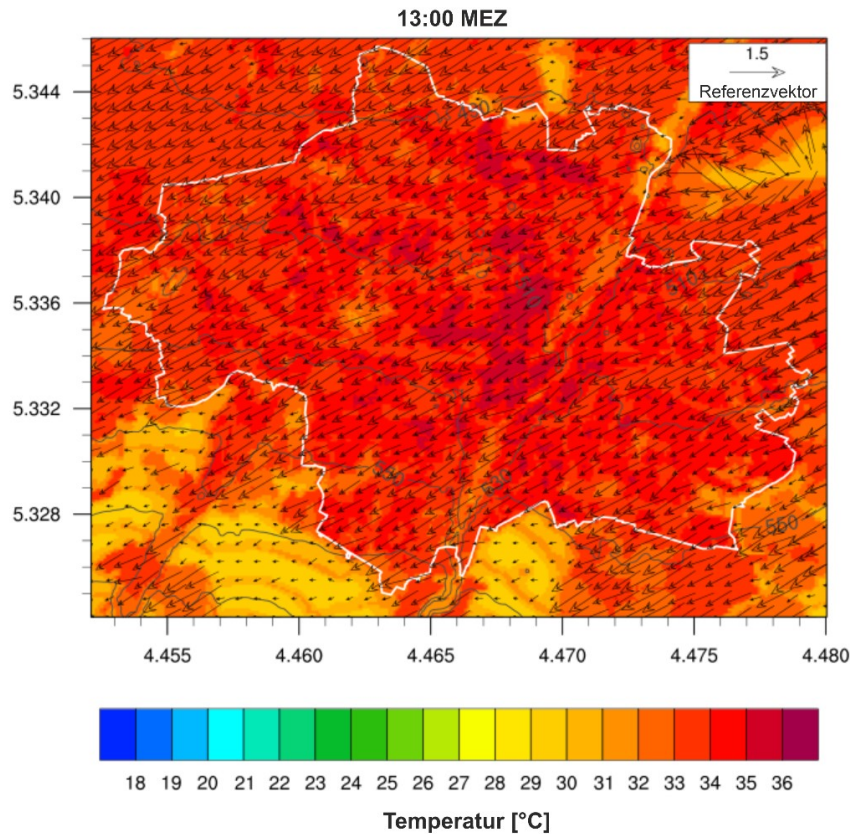


Abb. 6.10: MUKLIMO_3-Ergebnisse der bodennahen Lufttemperaturen (Farbskala, °C) und Windvektoren (m/s) in München (MUKLIMO_3-Auswertebereich) für die Simulation mit Alpinem Pumpen für 13MEZ. Schwarze Kontourlinien zeigen die Geländehöhe in 20 m Intervallen. Die weiße Linie zeigt die Stadtgrenze.

6.3.3 Zusammenfassung

Die idealisierte MUKLIMO_3-Studie für einen Sommertag mit zeitlich variierender Richtung und Geschwindigkeit des Regionalwindes zeigt, dass durch die Modellerweiterung die thermische Wirkung des Alpinen Pumpens auf das Stadtklima von München simuliert werden kann. Aus den Ergebnissen können wichtige Schlussfolgerungen für die Erstellung von Stadtklimaprojektionen und für die klimaresiliente Stadtplanung gezogen werden:

- Die **Lufttemperaturverteilung in München ist besonders nachts und vormittags von Alpinem Pumpen beeinflusst**. Die Heranführung von Luft aus dem Umland durch die regionale thermische Zirkulation hat bei heißen Wetterlagen insbesondere nachts im Süden der Stadt und am Vormittag im Norden der Stadt eine kühlende Wirkung. Ziel der Stadtplanung sollte es daher sein, das Einströmen der Umlandluft in die Stadt möglichst zu begünstigen.
- Durch das Alpine Pumpen erfolgt nachts eine **Verlagerung der maximalen Wärmeinsel** vom Stadtzentrum in die nördlichen Stadtteile und vormittags eine Verlagerung in die südlichen Stadtteile. Klimaanpassungsmaßnahmen gegen Hitze, insbesondere stadtplanerische Maßnahmen, sollten dies berücksichtigen.

- Die simulierte tageszeitliche Verlagerung des Wärminselmaximums durch das Alpine Pumpen sollte durch gezielte Lufttemperaturmessungen bestätigt und bezüglich der Häufigkeit ihres Auftretens genauer untersucht werden.
- Da die räumliche Lufttemperaturverteilung in München am Nachmittag nur in geringem Maße durch das Alpine Pumpen beeinflusst ist, kann bei den Quadereckpunktsimulationen für die Berechnung von 30-jährigen Mittelwerten der Anzahl von Kenntagen, die auf dem täglichen Temperaturmaximum basieren (z.B. Sommertage), in guter Näherung auf die Vorgabe der im Tagesgang variierenden Windrichtung verzichtet werden (siehe Kapitel 6.1). Für die Simulation nächtlicher Temperaturindizes (z.B. Tropennächte) sollten Kaltluftabflüsse der regionalen Skala durch das Alpine Pumpen jedoch berücksichtigt werden.

7 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Messungen und Modellierungen

Der vorliegende Ergebnisbericht stellt die wesentlichen Ergebnisse der Forschungsarbeit, die im Rahmen der Kooperation zwischen dem Referat für Gesundheit und Umwelt der Landeshauptstadt München und dem Deutschen Wetterdienst entstanden sind, zusammen. Mit sich ergänzenden Messungen und Modellierungen wurden zwei Hauptthemen untersucht; die wichtigsten Ergebnisse werden im Folgenden nochmals zusammengefasst:

Informationen zum Stadtklima und dessen künftiger Entwicklung

Als Grundlage für die spezifischeren Fragestellungen der Kooperationsvereinbarung wurden zunächst die langjährigen Messreihen von Temperatur und Niederschlag an der Station München-Stadt ausgewertet, um den **IST-Zustand** des Klimas zu erfassen. Dabei zeigt sich, dass sowohl der Mittelwert der Lufttemperatur als auch die Kenntage, die die Wärmebelastung beschreiben (Sommertage/heiße Tage mit einer maximalen Lufttemperatur von mindestens 25 °C/30 °C) an der Station München-Stadt seit Messbeginn 1955 deutlich (und statistisch signifikant) zugenommen haben. **Von den fünf wärmsten Jahren liegen vier in diesem Jahrhundert**, die fünf Jahre mit der höchsten Anzahl an Sommertagen wurden sogar alle in diesem Jahrhundert beobachtet (mit einem Maximum von 88 Tagen im Jahr 2003, gefolgt von 87 Tagen im Jahr 2018). Damit einhergehend ist die Anzahl der **Frost- und Eistage** (minimale bzw. maximale Temperatur von höchstens 0 °C) **seit Messbeginn gesunken** und die Rekordjahre liegen fast alle vor 2000. Im Vergleich zum Umland ist die Temperatur an der Station München-Stadt deutlich wärmer. Dieser **Wärmeinseleffekt** ist nachts, wenn sich das Umland schneller abkühlt als die Stadt, am größten. Im betrachteten Zeitraum (1998-2018) ist in den Nachtstunden die Temperatur in der Stadt in den Monaten Mai bis August im Mittel etwa 1,7 K höher als am Flughafen. An einzelnen Tagen können die Differenzen der Stundenwerte sogar bis knapp 9 K betragen.

Die Niederschlagsmessungen an der Station München-Stadt zeigen eine sehr große jährliche Variabilität mit jährlichen Niederschlagssummen zwischen etwa 650 und 1300 mm sowie einem Mittel von 954 mm im Zeitraum 1971-2000. Eine Auswertung für Niederschlagsextreme speziell für das Stadtgebiet München war nicht Teil dieser Untersuchung, ist aber ein möglicher Gegenstand für eine zukünftige Kooperation zwischen Deutschem Wetterdienst und dem Referat für Gesundheit und Umwelt.

Die Station München-Stadt repräsentiert das Klima an einem Standort im Stadtgebiet. Um die **Temperaturunterschiede innerhalb des Stadtgebiets** zu erfassen, wurde an ausgewählten Tagen, während der Abend- und Nachtstunden, die Lufttemperatur bei Profilmessfahrten auf verschiedenen Routen im Stadtgebiet gemessen. Dabei zeigten sich deutliche Unterschiede, die von der Bebauungsdichte und der Landnutzung abhängen, mit kühleren Bedingungen in den Randbezirken sowie in begrünten entsiegelten Flächen wie z.B. dem Englischen Garten und den wärmsten Temperaturen im dicht bebauten Innenstadtbereich. Die Temperaturdifferenzen innerhalb des Stadtgebiets erreichten dabei an den Tagen der Messkampagne Werte von über 6,5 K. Wie auch schon bei dem Vergleich der Stationsmessungen der Temperatur zwischen München-Stadt und Umland sind die **Temperaturunterschiede nachts größer als in den Abendstunden**.

Um die Temperaturverteilung innerhalb des Stadtgebiets nicht nur an einzelnen Tagen, sondern auf längeren, klimatologischen Zeitskalen (zukünftiges Stadtklima) zu untersuchen und **räumlich flächendeckende Aussagen über die Temperaturverteilung** im Stadtgebiet zu treffen, wurden zusätzlich das hoch auflösende Stadtklimamodell MUKLIMO_3 und die am DWD entwickelte Quadermethode (FRÜH et al. 2011a) angewendet. Die hierbei durchgeführte Kombination der Ergebnisse der Stadtklimasimulationen mit MUKLIMO_3

mit Ergebnissen von verfügbaren regionalen Klimaprojektionen ermöglicht auch die Spannweite der zukünftig zu erwartenden Änderungen des Stadtklimas abzuschätzen. Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der Wärmebelastung liegt, wurde die Auswertung für sogenannte „Sommertage“ gemacht, da diese bereits heute vergleichsweise häufig auftreten und somit ein statistisch belastbares Maß für die Wärmebelastung in der Stadt liefern (FRÜH et al. 2011a). Ähnlich wie bei den Profilmessfahrten erhält man auch bei der Anzahl von Sommertagen eine **starke Abhängigkeit von der Landnutzung und Bebauungsdichte**. In Waldgebieten und über Wasserflächen treten Sommertage im Referenzzeitraum (1971-2000) mit unter 20 Tagen pro Jahr am seltensten auf, während in dicht besiedelten Innenstadtgebieten bis zu 48 Sommertage pro Jahr im 30-jährigen Referenzzeitraum auftreten. Ein Vergleich mit Messungen zeigt eine gute Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den Beobachtungen, sodass die Modellergebnisse auch für die Zukunft als belastbar eingeschätzt werden können.

Die Bandbreite **der bis 2041-2070 zu erwartenden Zunahme an Sommertagen** im Vergleich zu dem Referenzzeitraum liegt im günstigen Fall (15. Perzentil) bei 35-40 %, im ungünstigen Fall (85. Perzentil) bei 65-100 %. Dabei ist die Zunahme bei dem 15. Perzentil nur leicht und bei dem 85. Perzentil nicht abhängig von der Bebauungsklasse. In Zukunft ist somit im ungünstigen Fall auf Grünflächen mit einer ähnlich hohen Anzahl an Sommertagen wie heute in den dicht besiedelten Gebieten zu rechnen. Im Vergleich zu den stark versiegelten Flächen, ist aber auf nicht versiegelten Flächen auch in Zukunft mit einer geringeren Wärmebelastung zu rechnen.

Auftreten von Alpinem Pumpen und dessen Auswirkung auf die Temperaturverhältnisse in München

Um die Auswirkung des lokal auftretenden thermischen Windsystems, des Alpinen Pumpens, auf das Stadtgebiet der Landeshauptstadt München zu untersuchen, wurde zunächst dessen Häufigkeit, Intensität und räumliche Ausdehnung im Großraum München analysiert. Dies geschah anhand von sich ergänzenden Windmessungen und Modellsimulationen mit dem regionalen Klimamodell COSMO-CLM. Hierfür wurden zunächst basierend auf regionalen Klimasimulationen verschiedene meteorologische Kriterienkombinationen aus früheren Studien angewandt, um Tage, an denen das regionale Windsystem auftritt, zu identifizieren. Zur Untersuchung der sommerlichen Wärmebelastung eignen sich insbesondere strahlungsabhängige Kriterien. Je nach verwendetem Kriterium variiert die mittlere jährliche Anzahl von Tagen mit günstigen Bedingungen für das Alpine Pumpen zwischen 20 und 60 und die Modellstudien zeigen, dass an mehr als 3/4 dieser Tage auch eine tägliche Windrichtungsumkehr zwischen München und dem Alpenvorland stattfindet. Wendet man strahlungsabhängige Kriterien auf die Stationsmessungen an, so zeigt sich, dass Tage mit günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen hauptsächlich in den Sommermonaten auftreten, also dann, wenn die Wärmebelastung auch am höchsten ist (bei den temporären Messungen zwischen 2013-2015 wurden dies an ca. 1/3 der Tage zwischen März und August festgestellt).

Der **typische Tagesgang des Alpinen Pumpens**, mit nächtlichen kühleren Strömungen aus Süden von den Alpen in Richtung Stadtgebiet und mit tagsüber nördlicher bzw. östlicher Strömung von kühlerer Luft aus dem Umland in Richtung Stadt, **lässt sich sowohl in den Messungen als auch in den Simulationen nachweisen**. So beginnt die nach München und Umgebung gerichtete südliche Einströmung etwa zwischen 20:00 - 21:00 MEZ und endet zwischen 09:00 - 10:00 MEZ des Folgetags. Zwischen 10:00 - 12:00 MEZ setzt im Modell eine nördlich bis nordöstliche, in den Beobachtungen vorwiegend östliche Anströmung ein, die dann im Mittel bis zwischen 18:00 und 20:00 MEZ anhält. Die Ergebnisse einzelner Stationen zeigen davon leicht abweichende Zeiten. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass bei den Auswertungen von Modellrechnungen und Stationsmessungen sowohl die Kriterien zur Definition des Alpinen Pumpens als auch

der betrachtete Zeitraum unterschiedlich sind und die Messungen den Wind an einem Punkt betrachten und oft von lokalen Effekten beeinflusst werden, wohingegen die Modellergebnisse die mittleren Verhältnisse in einer Modelgittermasche von 2,8 km x 2,8 km darstellen. In Anbetracht dieser Unterschiede passen die hier ermittelten Werte sehr gut zusammen. Die Modellrechnungen ergeben eine Erstreckung des Windsystems bis in die Donauebene und auch Messungen einiger Stationen nördlich von München zeigen noch eine leichte Ausprägung der für Alpines Pumpen typischen Windverhältnisse. Ein Vergleich von gemessenen Windverhältnissen zwischen Tagen mit sehr günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen und ungünstigen Bedingungen (d.h. niedrige solare Einstrahlung) zeigt, dass diese sich deutlich unterscheiden und an Tagen mit ungünstigen Bedingungen kein Windrichtungswechsel stattfindet, sondern ganztägig eine westliche Strömung vorherrscht.

Anhand von Modellrechnungen wurde zusätzlich zu den bodennahen Windverhältnissen die **vertikale Ausprägung des Alpines Pumpens** untersucht. Die mittlere Mächtigkeit der nördlichen Strömung in Richtung Alpen tagsüber liegt zwischen 500 m und 1500 m, während die nächtliche Strömungsschicht mit Winden aus Süden in Richtung Stadtgebiet maximal mehrere hundert Meter erreicht. Zusätzlich zeigen die Vertikalschnitte des Windes eine jetartige Struktur mit den höchsten Windgeschwindigkeiten meist in Höhen zwischen 30 und 150 m über Grund. Tagsüber bei starker Einstrahlung und nördlicher Strömung treten die Windmaxima auch in 200-300 m über Grund auf.

Um den Einfluss des Alpines Pumpens auf das Temperaturgeschehen im Stadtgebiet zu untersuchen, wurde das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 dahingehend erweitert, dass dem Modell der Tagesgang des regionalen Windes als Antrieb vorgegeben werden kann. Unter Vorgabe der typischen Windbedingungen des Alpines Pumpens wurde eine idealisierte Fallstudie für einen Sommertag im Stadtgebiet München simuliert. Dabei zeigt sich, dass vor allem nachts und vormittags die Temperaturverteilung im Stadtgebiet durch das Alpine Pumpen beeinflusst wird. **In der Nacht verlagert sich die maximale Wärmeinsel vom Stadtzentrum in die nördlichen Stadtteile, vormittags in die südlichen Stadtteile.** Ein Vergleich von Temperaturdifferenzen zwischen der im nördlichen Teil Münchens gelegenen Station München-Stadt und zwei Umlandstationen für den Zeitraum der temporären Messungen (2013-2015) zeigt bei günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen insbesondere nachts einen deutlich stärker ausgeprägten Wärmeinselleffekt als während Perioden mit ungünstigen Bedingungen. Genau für diese Tage mit einer hohen Wärmebelastung liefert die Fallstudie somit starke Hinweise auf eine positive, abkühlende Wirkung des Alpines Pumpens.

Eine genauere Untersuchung dieser Verlagerung des Wärmeinselmaximums anhand von gezielten Lufttemperaturmessungen innerhalb des Stadtgebiets wäre eine interessante zukünftige Ergänzung der Modellergebnisse, wurde jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt. Ferner wäre eine Erweiterung der Berechnung von Kenntagen mit den derzeit aktuell verfügbaren Klimaprojektionen basierend auf den RCP Szenarien möglich, eine grundlegende Änderung der Aussagen ist dadurch jedoch nicht zu erwarten (KOSSMANN et al., 2018).

Die Ergebnisse aus Messungen und Modellierungen bestätigen, dass das **Alpine Pumpen ein häufig erscheinendes Phänomen in München und Umgebung ist**, das – vor allem an Tagen mit einer hohen Wärmebelastung – eine signifikante Durchlüftung und somit auch Kühlung im Stadtgebiet, sowohl tagsüber als auch nachts, bewirken kann. Die Ergebnisse verdeutlichen die Bedeutung von Durchlüftungsschneisen im Stadtgebiet, die die Klimawirkung dieser Luftzirkulation begünstigen, damit die Landeshauptstadt auch zukünftig von der Auswirkung des Alpines Pumpens profitiert. Aufgrund der verwendeten Skalen (gesamtes Stadtgebiet,

Raster 100 m x 100 m, keine Auflösung von detaillierten Gebäudestrukturen), lassen sich aus diesem Bericht jedoch keine konkreten Ableitungen für einzelne Gebiete innerhalb des Stadtgebiets gewinnen.

8 Schlussbemerkungen

Die in diesem Bericht beschriebenen Ergebnisse der Kooperation zwischen der Landeshauptstadt München und dem Deutschen Wetterdienst bieten der Landeshauptstadt München eine wissenschaftliche Grundlage, um eine den meteorologischen Verhältnissen gerechte und klimaresiliente Stadtplanung zu entwickeln und somit negative Folgen für die Stadtbevölkerung zu minimieren. Sie liefern der Stadt wichtige Informationen für die Arbeiten zur Anpassung an den Klimawandel, wie z.B. die Fortschreibung des „Maßnahmenkonzepts Anpassung an den Klimawandel“.

Die Analyse des Münchner Klimas zeigt, dass der Klimawandel bereits stattfindet. Die Wärmebelastung hat in München seit Beginn der Beobachtungen im Jahr 1955 zugenommen. Die Erwärmung wird sich mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit in Zukunft weiter fortsetzen, so dass bis zur Mitte des Jahrhunderts eine deutlich höhere Wärmebelastung im Stadtgebiet zu erwarten ist. Der Bericht liefert dazu aktuelle Aussagen zur Ausprägung der städtischen Wärmeinsel und ergänzt die Aussagen der Klimafunktionskarte der Landeshauptstadt München von 2014. Durch den Bericht wird deutlich, dass München als Stadt durch den überlagerten Wärmeinseleffekt vom Klimawandel besonders betroffen ist.

Des Weiteren beinhaltet der Ergebnisbericht eine umfassende Analyse des thermischen Windsystems „Alpines Pumpen“ und dessen Ausprägung im Alpenvorland. Die Modellstudien liefern starke Hinweise auf eine positive, abkühlende Wirkung dieses Windsystems, vor allem in den Nachtstunden bei strahlungsintensiven, wind-schwachen Wetterlagen mit besonders hoher Wärmebelastung.

Damit unterstreichen die vorliegenden Erkenntnisse, wie wichtig es ist, die Funktionsfähigkeit der Luftaustauschbahnen zu erhalten, vor allem im Hinblick auf das aktuelle, starke städtische Wachstum und die steigende Wärmebelastung in der Stadt. Insbesondere große und zusammenhängende Grünflächen fungieren als Luftaustauschbahnen. Diese funktionsfähigen Austauschbahnen sind notwendig, um auch zukünftig möglichst günstige bioklimatische Bedingungen und eine hohe Lebensqualität für die Bewohnerinnen und Bewohner in der Stadt gewährleisten zu können.

Wie die Funktionsfähigkeit von Luftaustauschbahnen durch einzelne Bebauungsvorhaben beeinträchtigt werden könnte, kann der vorliegende Bericht auf gesamtstädtischer Ebene nicht beantworten. Daher sollte dies in vertiefenden mikroskaligen Klimagutachten überprüft werden.

Danksagung

An dieser Stelle möchten die Autoren allen danken, die durch ihre Mitwirkung und Unterstützung die Erstellung des vorliegenden Berichts möglich gemacht haben. Besonders hervorheben möchten wir die sehr gute Kooperation mit dem Referat für Umwelt der Landeshauptstadt München, insbesondere Veronika Wirth, Teresa Zölch, Ulrich Teichman und Werner Bründl. Ein besonderer Dank geht auch an Oliver Nitsche, Peter Köhler sowie Maximilian Graf. Ersten beiden für den Aufbau und das Betreiben der temporären Windmessungen sowie die Durchführung der Profilmessfahrten und letztem für seine Beiträge für das Kapitel 6, das weitestgehend auf Ergebnissen seines Praktikums und seiner Bachelorarbeit basiert. Weiter möchten die Autoren folgenden Personen danken: Gerhard Hofmann und Werner Bründl für die Planung und Aufsetzung des Projektes, Tabea Klier und Marco Sirbescu, die im Rahmen ihrer Praktika bei der Auswertung der Messergebnisse und der Klassifizierung des langjährigen Klimas mitgeholfen haben, Uwe Zimmermann für die Datenaufbereitung sowie Lothar Bock und Heidelore Turau für die Erstellung der GIS Abbildungen. Die Simulation für das Modellgebiet EUROPA wurde von der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg durchgeführt und durch Dr. Klaus Keuler zur Verfügung gestellt. Für die Geodatenbereitstellung durch die Landeshauptstadt München danken wir Herrn Georg Sedlmeir. Für ihre Durchsicht des finalen Berichts und die hilfreichen Verbesserungsvorschläge danken die Autoren zudem Petra Fuchs und Heike Noppel.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Schematische Darstellung der städtischen Wärmeinsel.	11
Abb. 2.2: Luftbild München (© Landeshauptstadt München - Kommunalreferat GeodatenService 2017).	13
Abb. 2.3: Skizzierte Darstellung des Alpinen Pumpens. (Quelle: DWD).	15
Abb. 2.4: Stadtklimaanalyse / Klimafunktionskarte (stadtklimatische Bewertungskarte) (RGU 2014).	17
Abb. 3.1: Übersicht der Messstandorte. Zur Identifikation von Tagen mit Alpinem Pumpen wurde die Sonnenscheindauer (orangefarbige Punkte) sowie der Niederschlag (hellblaue Dreiecke) an jeweils vier Stationen verwendet. Lila Rauten markieren die Windmessungen des regulären Messnetzwerks des DWD, rote Rauten die zusätzlichen temporären Windmessungen im Rahmen des Stadtklimaprojekts. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Symbole leicht verschoben, Messungen der verschiedenen Variablen beziehen sich immer auf den gleichen Messstandort.	20
Abb. 3.2: CCLM-Modellgebiet EUROPA (links) und das darin eingebettete Modellgebiet MÜNCHEN (schwarzer Rahmen, rechts). Das Modellgebiet MÜNCHEN (rechts) zeigt das CCLM-Auswertebereich (roter Rahmen).	21
Abb. 3.3: MUKLIMO_3-Landnutzungsdaten mit 100 m Auflösung für München und Umgebung. Der äußere Rahmen zeigt das gesamte Modellgebiet von 48 km x 40 km, der innere Rahmen zeigt das MUKLIMO_3-Auswertebereich von 28 km x 22 km.	23
Abb. 4.1: Jahresmittel der Lufttemperatur an der Station München-Stadt für den Zeitraum 1955-2018. Zusätzlich zu den jährlichen Werten ist gestrichelt der langjährige Trend eingezeichnet. Die graue Linie markiert den 30-jährigen Mittelwert über den Referenzzeitraum 1971-2000. Die Temperaturwerte sind an der linken Skala angegeben. Die eingefärbten Balken kennzeichnen negative Abweichungen von diesem Mittelwert in blau und positive Abweichungen in rot. Die Stärke der Abweichungen (die auch als Anomalien bezeichnet werden) lässt sich an der rechten Skala der Graphik ablesen.	26
Abb. 4.2: Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur an der Station München-Stadt im Zeitraum 1971-2000.	27
Abb. 4.3: Zahl der Sommertage pro Jahr zwischen 1955-2018 an der Station München-Stadt. Jeder Balken steht für ein Jahr der Messperiode. Zusätzlich zu den jährlichen Werten ist gestrichelt der langjährige Trend eingezeichnet. Rechts sind die fünf Jahre (TOP 5) mit der höchsten Anzahl von Sommertagen seit 1955 aufgeführt.	28
Abb. 4.4: Zahl der heißen Tage pro Jahr zwischen 1955-2018 an der Station München-Stadt. Jeder Balken steht für ein Jahr der Messperiode. Zusätzlich zu den jährlichen Werten ist gestrichelt der langjährige Trend eingezeichnet. Rechts sind die fünf Jahre (TOP 5) mit der höchsten Anzahl von heißen Tagen seit 1955 aufgeführt.	28
Abb. 4.5: Zahl der Tropennächte pro Jahr zwischen 1994-2018 an der Station München-Stadt. Jeder Balken steht für ein Jahr der Messperiode. Für die Jahre im grau schraffierten Bereich sind keine stündlichen Minimumtemperaturen zur Berechnung der Tropennächte verfügbar. Rechts sind die fünf Jahre (TOP 5) mit der höchsten Anzahl von Tropennächten seit 1994 aufgeführt. Ein Trend wurde aufgrund der kurzen Zeitreihe nicht berechnet.	29
Abb. 4.6: Zahl der Frosttage pro Jahr zwischen 1955-2018 an der Station München-Stadt. Jeder Balken steht für ein Jahr der Messperiode. Zusätzlich zu den jährlichen Werten ist gestrichelt der langjährige Trend eingezeichnet. Rechts sind die fünf Jahre (TOP 5) mit der höchsten Anzahl von Frosttagen seit 1955 aufgeführt.	29
Abb. 4.7: Zahl der Eistage pro Jahr zwischen 1955-2018 an der Station München-Stadt. Jeder Balken steht für ein Jahr der Messperiode. Zusätzlich zu den jährlichen Werten ist gestrichelt der langjährige Trend eingezeichnet. Rechts sind die fünf Jahre (TOP 5) mit der höchsten Anzahl von Eistagen seit 1955 aufgeführt.	30
Abb. 4.8: a) Mittlerer Tagesgang der Temperatur in München-Stadt von Mai-August für den Zeitraum 1998-2018. b) Mittlerer Tagesgang der Temperaturdifferenz zwischen München-Stadt und München-Flughafen. In beiden Graphiken werden gleitende Mittel über die mittleren Stundenwerte von 15 aufeinanderfolgenden Tagen gezeigt.	31
Abb. 4.9: Vergleich der Temperaturkenntage zwischen der Station München-Stadt (bunte Balken) mit der Station München-Riem (1955-1991, hellgraue Balken) und der Station München-Flughafen (1993-2018,	

dunkelgraue Balken). Die Balken geben die mittlere Anzahl von Kenntagen pro Jahr für den darunter genannten Zeitraum an.	32
Abb. 4.10: Jahressumme des Niederschlags an der Station München-Stadt für den Zeitraum 1955-2018. Die schwarze Linie zeigt die Niederschlagssumme für jedes Jahr, die blaue Linie markiert den 30-jährigen Mittelwert über den Referenzzeitraum 1971-2000. Die Niederschlagswerte sind an der linken Skala angegeben. Die eingefärbten Balken kennzeichnen Abweichungen des Niederschlags von dem Mittel des Referenzzeitraumes, negative Abweichungen in braun und positive Abweichungen in grün. Die Stärke der Abweichungen (die auch als Anomalie bezeichnet werden) lässt sich an der rechten Skala der Graphik ablesen.	33
Abb. 4.11: Jahresgang des Niederschlags an der Station München-Stadt. Die Werte beziehen sich auf den Zeitraum 1955-2018. Die Balken im Hintergrund zeigen die mittlere Anzahl von Tagen mit Niederschlag > 0,1 mm pro Monat, die dazugehörige Skala ist rechts in der Graphik eingezeichnet.	34
Abb. 5.1: Profilmessfahrzeug mit Sensoren zur Messung von Temperatur und Feuchte.	36
Abb. 5.2: Verlauf der vier Messrouten.	37
Abb. 5.3: Tagesgänge der Lufttemperatur (°C) vom 01.07.-05.07.15 an den Stationen DWD München-Stadt, München Flughafen und Holzkirchen (Daten bereitgestellt durch DWD 2016). Die horizontale Achse zeigt die Uhrzeit (MEZ) an, die vertikale Achse in Lufttemperatur in °C.	37
Abb. 5.4: Nächtliche Temperaturverteilung im Stadtgebiet zum Zeitpunkt der nächtlichen Profilmessfahrt am 02./03.07.2015, dargestellt als Differenz der Lufttemperatur zur DWD-Station München-Stadt. Die Zeitangaben der Graphik sind in MESZ angegeben (MEZ+1).	38
Abb. 5.5: Temperaturverlauf (°C) an der Station München-Stadt und Zeiträume der nächtlichen Profilmessfahrten. Die horizontale Achse zeigt die Uhrzeit in MESZ (MEZ+1) an, die vertikale Achse die Lufttemperatur in C.	39
Abb. 5.6: Ergebnisse der Profilmessfahrt am 02.07.15 abends; Darstellung der Temperaturverläufe als Differenz zur tiefsten Lufttemperatur, die während der vier Routen gemessen wurde (Start: Route 4; T _{min} =22,1°C auf Route 3, siehe auch Tabelle 5.1).	43
Abb. 5.7: Ergebnisse der Profilmessfahrt in der Nacht 02.-03.07.2015; Darstellung der Temperaturverläufe als Differenz zur tiefsten Lufttemperatur, die während der vier Routen gemessen wurde (Start: Route 4; T _{min} =17,3 C auf Route 3 und 4, siehe auch Tabelle 5.1).	43
Abb. 5.8: Ergebnisse der Profilmessfahrt am 03.07.15 abends; Darstellung der Temperaturverläufe als Differenz zur tiefsten Lufttemperatur, die während der vier Routen gemessen wurde (Start: Route 3; T _{min} =17,3 °C auf Route 3 und 4, siehe auch Tabelle 5.1).	44
Abb. 5.9: Ergebnisse der Profilmessfahrt in der Nacht 03.-04.07.2015; Darstellung der Temperaturverläufe als Differenz zur tiefsten Lufttemperatur, die während der vier Routen gemessen wurde (Start: Route 3; T _{min} =16,4 °C auf Route 4, siehe auch Tabelle 5.1).	44
Abb. 5.10: a) Anzahl der Tage pro Jahr mit sehr günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen (Kriterien siehe Text) mit farblicher Unterscheidung der Jahreszeiten. b) Einteilung der Tage mit sehr günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen nach Dauerstufen in Tagen für den gesamten Zeitraum 2013-2015. Angegeben ist die Anzahl von Episoden (aufeinanderfolgenden Tagen mit günstigen Bedingungen) pro Dauerstufe mit farblicher Aufteilung nach Jahreszeit (DJF = Winter; MAM = Frühling; JJA = Sommer; SON = Herbst), z.B. gibt es drei Episoden mit Dauerstufe fünf Tage, von denen eine im Frühling und zwei im Sommer beobachtet wurden.	47
Abb. 5.11: Tagesgang des Windes am Beispiel der Station Aying für alle AP-Tage zwischen März und August im Zeitraum 2013-2015 (142 Tage). Für jede Windrose werden die entsprechenden Stundenwerte der 142 AP-Tage in 30°-Intervalle eingeteilt. Die Größe der einzelnen Windrosensegmente ist proportional zum Prozentsatz der 142 Werte, die in das jeweilige 30°-Windrichtungsintervall fallen. Die Einfärbung der Segmente gibt Auskunft über die Verteilung der mittleren stündlichen Windgeschwindigkeiten in dem jeweiligen Segment. Farblich umrandet sind Zeitabschnitte mit gleichen vorherrschenden Strömungsrichtungen; in hellblau die nächtliche Südströmung von den Alpen in Richtung München, in orange die tagsüber vorherrschende östliche Strömung.	48
Abb. 5.12: Vergleich der nächtlichen (00-04 MEZ, hellblau umrandet) und täglichen (13-17 MEZ, orange umrandet) Windrichtungshäufigkeitsverteilungen für die Station Aying für die Monate März-August im Zeitraum 2013-2015. Links für Tage mit günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen (AP-Tage) und rechts für strahlungsarme Tage (SA-Tage).	49

Abb. 5.13: Tagesgang von dominanter Windrichtung, d.h. der Windrichtung, in die die meisten Stundenwerte fallen (oben) und Windgeschwindigkeit (unten) gemittelt über alle AP-Tage (links) und SA-Tage (rechts) für die Monate März-August im Zeitraum 2013-2015. Zusätzlich zu den fünf temporären Stationen des Stadtklimaprojekts (vergleiche Abb. 3.1) sind die Ergebnisse für München und Garmisch-Partenkirchen dargestellt. Rötliche Farben bei der Windrichtung zeigen eine Strömung von der Stadt in Richtung Alpen, blaue Farben eine Strömung von den Alpen in Richtung München. Wenn in die dominante Windrichtung weniger als 33 % der Stundenwerte fallen, ist die Farbe abgeschwächt.	50
Abb. 5.14: (vorherige zwei Seiten). Übersicht der Windverhältnisse an AP-Tagen zwischen Mai-August, 2013-2015. Erste Graphik: Tagsüber 13:00-17:00 MEZ (orange hinterlegt); zweite Graphik: Nachts 00:00-04:00 MEZ (hellblau hinterlegt). Die Windrosen basieren auf den stündlichen Werten für das jeweilige Zeitintervall. München-Stadt ist Station 11, M1-M5 sind die temporären Stationen die ihm Rahmen des Projektes aufgestellt wurden. Für eine bessere Übersicht entspricht der Mittelpunkt der Windrose nicht immer den exakten Stationskoordinaten. Die Standorte sowie die Stationsnamen sind in Abb. 3.1 gezeigt.	54
Abb. 5.15: Links: Mittlerer Tagesgang der Temperatur für AP-Tage und SA-Tage in München-Stadt, München-Flughafen (nördlich von München, siehe Abb. 3.1) und Oberhaching-Laufzorn (südlich von München). Rechts: Kastengraphiken der Differenzen zwischen der Temperatur von München-Stadt und den zwei Umlandstationen, ebenfalls für AP-Tage (rote Einfärbung) und SA-Tage (graue Einfärbung) für die zwei Zeiträume, die in der linken Graphik farbig schraffiert sind (für eine Erklärung der Kastengraphiken, siehe Text).	54
Abb. 6.1: Skizze des Quaders zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der multiplen linearen Interpolation. Die Quadereckpunkte werden durch Tagesmittelwerte der Lufttemperatur T , der relativen Luftfeuchtigkeit rh und der Windgeschwindigkeit v bestimmt und sind für die im Gebiet von München durchgeführten MUKLIMO_3-Simulationen in Tabelle 6.1 aufgelistet. Hierbei sind z. B. $T_{c,min}$, $rh_{c,min}$ und $v_{c,min}$ die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit für die in der Tabelle 6.1 mit „000“ gekennzeichnete, kühle, trockene und windschwache Quadereckpunktsimulation (Index c steht für engl. Corner).	57
Abb. 6.2: Aus 17 Projektionen für das Szenario A1B ermittelte regionale Änderung der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen für die Klimaperioden 2011-2040 (links), 2041-2070 (Mitte) und 2071-2100 (rechts) im Vergleich zu 1971-2000. Die Auswertung der regionalen Klimaprojektionen erfolgte für den ost-nordöstlich von München gelegenen Gebietsausschnitt 48,0° N-48,5°N und 11,6°E-12,2°E. Farbig ausgefüllte Wertesymbole kennzeichnen Ergebnisse, die zwischen dem 15. und 85. Perzentilwert liegen.	60
Abb. 6.3: Karten der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage für München (100 m Raster) für die Zeiträume 1971-2000 (oben) und 2041-2070 (A1B Szenario, 15. und 85. Perzentil, Mitte und unten).	62
Abb. 6.4: Karten der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl Sommertage für München (100 m Raster) im Zeitraum zwischen 1971-2000 und 2041-2070 (A1B Szenario, 15. und 85. Perzentil).	63
Abb. 6.5: Tägliche Anzahl an erfüllten Kriterienkombinationen aus Tabelle 6.4 (Score) für die Identifizierung von Tagen mit günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen. 0= kein Kriterium wurde erfüllt, 1: eine Kriterienkombination wurde erfüllt, ...,4: alle Kriterienkombinationen wurden erfüllt. Die Graphik gibt keinen Aufschluss darüber welche Kriterienkombinationen erfüllt wurden.	67
Abb. 6.6: Mittleres Windfeld in 10 m über Grund um 13:00 MEZ (oben) und 01:00 MEZ (unten) für das S-Kriterium (links) und die N_s_Hw -Kriterienkombination (rechts). An den Achsen sind der Längengrad (lon) und der Breitengrad (lat) angegeben. Dargestellt sind das Stadtgebiet von München (M), die deutsch-österreichische Grenze (dicke schwarze Linie) und die Geländehöhe (farbige Darstellung, dünne Konturlinie). Daten der durch einen schwarzen Rahmen umrandeten 8x8 Gitterpunkte südlich von München wurden zur Berechnung des Windwechselkriteriums verwendet. Dreiecke am oberen Rand der Diagramme zeigen die geographische Länge der in Abb. 6.7 und 6.8 gezeigten meridionalen Schnitte.	69
Abb. 6.7: Raum-Zeit Schnitte der Südkomponente des Windes in 10 m über Grund auf dem Längengrad von München, gemittelt über fünf Gitterzellen in zonaler Richtung für das S-Kriterium (links) und die N_s_Hw -Kombination (rechts). Uhrzeit in MEZ. Die schwarz eingezeichneten Linien markieren die nördliche und südliche Stadtgrenze von München.	70
Abb. 6.8: Vektordarstellung der mittleren südlichen und vertikalen Windkomponenten und entlang eines meridionalen Vertikalschnitts durch München um 13:00 MEZ (oben) und 01:00 MEZ (unten) für das S-Kriterium (links) und die N_s_Hw -Kombination (rechts). Die Farbschattierung im Hintergrund zeigt die	

mittlere potentielle Temperatur. Die schwarz eingezeichneten Linien markieren die nördliche und südliche Stadtgrenze von München. 72

Abb. 6.9: MUKLIMO_3-Ergebnisse der bodennahen Lufttemperaturen (Farbskala, °C) und Windvektoren (m/s) in München (MUKLIMO_3-Auswertegebiet) für die Simulation mit Alpinem Pumpen. Oben: 23:00 MEZ, unten: 07:00 MEZ. Schwarze Konturlinien zeigen die Geländehöhe in 20 m-Intervallen. Die weiße Linie zeigt die Stadtgrenze. 76

Abb. 6.10: MUKLIMO_3-Ergebnisse der bodennahen Lufttemperaturen (Farbskala, °C) und Windvektoren (m/s) in München (MUKLIMO_3-Auswertegebiet) für die Simulation mit Alpinem Pumpen für 13MEZ. Schwarze Konturlinien zeigen die Geländehöhe in 20 m Intervallen. Die weiße Linie zeigt die Stadtgrenze. 77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Parameter zur Beschreibung der Bebauung für die MUKLIMO_3-Landnutzungsklassen: mittlerer Gebäudegrundflächenanteil γ_b , mittlere Gebäudehöhe h_b in m, mittlerer Wandflächenindex w_b und mittlerer Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden v.	22
Tabelle 5.1: Startzeit der vier Routen für die vier Messfahrten zwischen 02.07. und 04.07.2015 Die Startzeit der jeweiligen Messfahrt ist in rot angegeben. Zusätzlich aufgeführt sind die Uhrzeit des Sonnenuntergangs sowie das Minimum der Temperatur während der jeweiligen Messfahrt und auf welcher der vier Routen diese gemessen wurde. Alle Zeiten sind in MEZ angegeben.	40
Tabelle 6.1: Tagesmittelwerte bodennaher Klimaparameter für die in Abb. 6.1 illustrierten acht Eckpunktsimulationen der Quadermethode.	58
Tabelle 6.2: Berechnete und gemessene mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen für ausgewählte Standorte in München für den Zeitraum 1971-2000 sowie ihre berechnete Änderung bis 2041-2070. Die Stationskoordinaten sind in Tabelle A.1 im Anhang aufgeführt.	59
Tabelle 6.3: Regionale Klimaprojektionen für das Emissionsszenario A1B mit Angabe der horizontalen Auflösung und der verwendeten Global- und Regionalmodelle. Zusätzlich angegeben ist die regional simulierte Zunahme der mittleren Anzahl an Sommertagen ($\Delta N_{T_{\max} \geq 25}$) im Zeitraum von 1971-2000 bis 2041-2070 für den ostnordöstlich von München gelegenen Gebietsausschnitt 48,0°N-48,5°N und 11,6°E-12,2°E (siehe Text).	61
Tabelle 6.4: Für die Identifizierung von Tagen mit günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen verwendete Kriterienkombinationen mit Schwellenwerten und mittlerer jährlicher Anzahl an günstigen Tagen entsprechend der CCLM-Ergebnisse für den Zeitraum 1989-2008.	65
Tabelle 6.5: Durchschnittliche Zeiten der nördlichen Strömung von der Schotterebene und dem Münchener Stadtgebiet Richtung Alpen (rot), der südlichen Strömung von den Alpen ins Münchener Stadtgebiet (blau) und Übergangsphasen des Alpines Pumpens, ermittelt aus den mittleren stündlichen Windfeldern für Tage mit verschiedenen Kriterienkombinationen. Zeitangaben in MEZ. Für die in München in der warmen Jahreszeit geltende mitteleuropäische Sommerzeit (MESZ) muss eine Stunde addiert werden (MEZ+1).	68
Tabelle A.1 Übersicht der verwendeten Messstationen mit Koordinaten und Höhenangabe des letzten Stationsstandortes. Stationen 1-20 gehören zu dem regulären Messnetz des DWD, weitere Informationen über diese Stationen sowie die Stationshistorie können unter https://cdc.dwd.de/portal/ unter Angabe der Stationsnummer abgerufen werden. Wenn die Messhöhe bei Windmessungen von 10 m und bei Temperaturmessungen von 2 m abweicht, ist dies unter „Bemerkung“ angegeben. Für die Windauswertungen wurden Stationen 1-16 verwendet. Stationen M1-M5 wurden temporär für drei Jahre 2013-2015 während der Projektlaufzeit aufgestellt.	93
Tabelle A.2 Anzahl der Sonnenstunden in Stunden pro Monat, die einer Globalstrahlung von 20 bzw. 10 MJ/m ² entspricht (aus LUGAUER und WINKLER, 2005).	94

Literatur

- BMBAU (Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau) 1980: Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungsanlagen. *Schriftenreihe Raumordnung* 06.044, Forschungsprojekt BMBau RS II 4-70 41 02-77. 10.
- BRÜNDL, W., 1980: Das Klima in München, Diplomarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München.
- BRÜNDL, W., MAYER, H., BAUMGARTNER, A., 1987: Untersuchung des Einflusses von Bebauung und Bewuchs auf das Klima und die lufthygienischen Verhältnisse in bayerischen Großstädten – STADTKLIMA BAYERN. Abschlussbericht zum Teilprogramm Klimamessungen in München. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Materialien 43, München.
- DEE, D.P., UPPALA, S.M., SIMMONS, A.J., BERRISFORD, P., POLI, P., KOBAYASHI, S., ANDRAE, U., BALMASEDA, M.A., BALSAMO, G., BAUER, D.P., BECHTOLD, P., 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656), S. 553-597.
- DOMS, G., FÖRSTNER, J., HEISE, E., HERZOG, H.-J., MIRONOV, D., RASCHENDORFER, M., REINHARDT, T., RITTER, B., SCHRODIN, R., SCHULZ, J.-P., VOGEL, G., 2011: A description of the nonhydrostatic regional COSMOmodel. Part II: Physical parameterization. *Deutscher Wetterdienst*, Offenbach, 154 pp.
- DWD, 1950: Klima-Atlas von Hessen, Deutscher Wetterdienst in der US-Zone, Bad Kissingen.
- FRITZ, S., BARTHOLOMÉ, E., BELWARD, A., HARTLEY, A., STIBIG, H.J., EVA, H., MAYAUX, P., BARTALEV, S., LATIFOVIC, R., KOLMERT, S., ROY, P.S., 2003: Harmonisation, mosaicing and production of the Global Land Cover 2000 database (Beta Version) (No. 20849 EN). EC-JRC.
- FRÜH, B., KOSSMANN, M., ROOS, M., 2011a: Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 237, 68 S. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201106095249>.
- FRÜH, B., BECKER, P., DEUTSCHLÄNDER, T., HESSEL, J.-D., KOBMANN, M., MIESKES, I., NAMYSLO, J., ROOS, M., SIEVERS, U., STEIGERWALD, T., TURAU, H., WIENERT, U., 2011b: Estimation of climate change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate projections. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 50, No. 1, 167-184.
- GEIGER, R., ARON, R. H., TODHUNTER, P., 1995: The Climate near the Ground. Cambridge: *Harvard University Press*.
- GRAF, M., 2014: Identifizierung und Klimatologie des Alpen Pumpens aus seiner regionalen Klimasimulation. Bachelorarbeit, Lehrstuhl Physische Geographie, Katholische Universität Eichstätt, 67 S., DOI: 10.13140/RG.2.1.4263.1209.
- GRAF, M., KOSSMANN, M., TRUSILOVA, T., MÜHLBACHER, G., 2016: Identification and climatology of Alpine pumping from a regional climate simulation. *Front. Earth Sci.* 4:5, doi: 10.3389/feart.2016.00005.
- GROSS, G., 1989: Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. *Beitr. Phys. Atmosph.* 62, S. 57-72.
- HAFNER, T.A., REINHARD, M.E., WEISEL, E.L., FIMPEL, H.P., 1987: Boundary layer aspects and elevated heat source effects of the Alps. *Meteorol. Atmos. Phys.* 36, S. 61-73.

- HOWARD, L., 1833. Climate of London deduced from meteorological observation. *Harvey and Darton*, 1(3).
- IPCC, 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., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR AND H.L. MILLER (Hrsg.). *Cambridge University Press*, 996 S.
- KOSSMANN, M., 2012: Stadtklimasimulationen mit dem Modell MUKLIMO_3 zur Veränderung sommerlicher Temperaturverhältnisse durch Klimawandel und Bebauungsänderungen in Köln - ein Beitrag zum Projekt Köln_21. Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 56 S. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/projekt_koeln/abschlussbericht_tp3.pdf.
- KOSSMANN, M., WHITEMAN, C.D., Bian, X., 2002: Dynamic airflow channelling over the Snake River Plain, Idaho, *Proceedings of the 10th Conference on Mountain Meteorology*, 17-21 June 2002, Park City, Utah. *Amer. Meteor. Soc.* 360-363.
- KOSSMANN, M., BUCHHOLZ, S., NOPPEL, H., FUCHS P., 2018: High resolution urban climate projections of summer heat conditions in German cities. Vortrag, *Cities & Climate Change Science Conference*, 5. bis 7. März 2018 in Edmonton, Alberta, Kanada. <https://citiesipcc.org/wp-content/uploads/2018/04/Meinolf-Kossmann.pdf>.
- KRATZER, A., 1937: Das Stadtklima. Die Wissenschaft, Bd. 90, *Friedr. Vieweg und Sohn*, Braunschweig.
- KUNZ, H., SCHERRER, S.C., LINIGER, M.A., APPENZELLER, C., 2007: The evolution of ERA-40 surface temperatures and total ozone compared to observed Swiss time series. *Meteorologische Zeitschrift*, 16(2), S.171-181.
- KUTTLER, W., 2009: Zum Klima im urbanen Raum. Klimastatusbericht 2008. *Deutscher Wetterdienst* (Hrsg.), Offenbach, S. 6 -12.
- RGU (Landeshauptstadt München, Referat für Gesundheit und Umwelt), 2014: Klimaanpassung – Status quo / Klimafunktionskarte: Beschluss der Vollversammlung des Stadtrats vom 17.12.2014 (Sitzungsvorlage Nr. 14-20 / V 01810).
- RGU (Landeshauptstadt München, Referat für Gesundheit und Umwelt), 2016: Maßnahmenkonzept Anpassung an den Klimawandel in der Landeshauptstadt München: Beschluss der Vollversammlung des Stadtrats vom 15.11.2016 (Sitzungsvorlage Nr. 14-20 / V 06819).
- RGU (Landeshauptstadt München, Referat für Gesundheit und Umwelt), 2019: Projekt „Grüne Stadt der Zukunft – Klimaresiliente Quartiere in einer wachsenden Stadt“, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Sachstand und Ausblick. Beschluss des Umweltausschusses vom 15.10.2019 (Sitzungsvorlage Nr. 14-20 / V 15471).
- LUGAUER, M., BERRESHEIM, H., CORSMEIER, U., DABAS, A., DYCK, W., EMEIS, S., EGGER, J., FEHR, T., FIEDLER, F., FREUER, C. AND GANTNER, L., 2003: An overview of the VERTIKATOR project and results of Alpine pumping. In *International Conference Alpine Meteorology*, Brig, CH.
- LUGAUER, M., WINKLER, P., 2005: Thermal circulation in South Bavaria - climatology and synoptic aspects. *Meteorologische Zeitschrift*. 14, 15-13.
- MAYER, H., 1987: Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben STADTKLIMA BAYERN. *Mitt. Geogr. Gesellsch. München* 72, S. 119-160.

- NAKICENOVIC, N., SWART, R. (Eds.), 2000: Emissions scenarios - Summary for policymakers. *Cambridge Univ. Press*, Cambridge, UK, 20 pp.
- OKE, T. R., MCCAUGHEY, J. H., 1983: Suburban-rural energy balance comparisons for Vancouver, BC: an extreme case?, *Boundary-Layer Meteorology*, 26(4), 337-354.
- ROCKEL, B., WILL, A. AND HENSE, A., 2008: The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift*, 17(4), 347-348.
- SCHAFFER, J.S., SAXENA, V.K., WENNY, B.N., BANARD, W., LUISI J.J., 1996: Observed influence of clouds in ultraviolet-B radiation. *Geophysical Research Letters* 23, 2625-2628.
- 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, S. 1-34.
- 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, S. 58-83.
- 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. *Meteorologische Zeitschrift*, N. F. 4, S. 3-15.
- SIEVERS U., 2012: Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3 Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* Band 240, 142 S., ISBN 978-3-88148-465-7, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-2014081319909> .
- SIEVERS, U., FRÜH, B., 2012: A practical approach to compute short-wave irradiance at the surface of sub-grid scale buildings. *Meteorologische Zeitschrift*. 21, 349-364.
- SIEVERS U., 2016: Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3 Teil 2: Thermodynamische Erweiterungen. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* Band 248, 151 S., ISBN 978-3-88148-490-9, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201606173510> .
- SIEVERS, U., ZDUNKOWSKI, W., 1986: A microscale urban climate model. *Beitr. Phys. Atmosph.* 59, 13-40.
- STEINACKER, R., 1984: Area-height distribution of a valley and its relation to the valley wind. *Contr. Atmos. Phys.* 57, 64-71.
- STEPPELER, J., DOMS, G., SCHÄTTLER, U., BITZER, H. W., GASSMANN, A., DAMRATH, U., GREGORIC, G., 2003: Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM. *Meteorology and atmospheric Physics* 82, no. 1-4, 75-96.
- STEWART, J., WHITEMAN, C.D., STEENBURGH, W.J., BIAN, X., 2002: A Climatological Study of Thermally Driven Wind Systems of the U.S. Intermountain West. *Bulletin of American Meteorological Society* 83, 699-708.
- WILKS, D. S., 2011: Statistical methods in the atmospheric sciences. *Academic press*, Third Edition
- WINKLER, P., LUGAUER, M., REITEBUCH O., 2006: Alpines Pumpen. *Promet*, Jahrg. 32, Nr. 1/2, 34-42

- ZÄNGL, G., 2005: Wintertime cold-air pools in the Bavarian Danube valley basin: Data analysis and idealized numerical simulations. *J. Appl. Meteor.* 44, 1950–1971.
- ZAITCHIK, B. F., EVANS, J. P., SMITH, R. B., 2007: Regional impact of an elevated heat source: the Zagros Plateau of Iran. *Journal of Climate*, 20(16), 4133-4146.
- ZARDI, D., WHITEMAN, C.D., 2013: Diurnal mountain wind systems – In: Chow, F. et al. (Ed.): Mountain weather research and forecasting – Recent progress and current challenges. *Springer Publishing*, 35-120.

Anhang

1. Tabellen

Tabelle A.1 Übersicht der verwendeten Messstationen mit Koordinaten und Höhenangabe des letzten Stationsstandortes. Stationen 1-20 gehören zu dem regulären Messnetz des DWD, weitere Informationen über diese Stationen sowie die Stationshistorie können unter <https://cdc.dwd.de/portal/> unter Angabe der Stationsnummer abgerufen werden. Wenn die Messhöhe bei Windmessungen von 10 m und bei Temperaturmessungen von 2 m abweicht, ist dies unter „Bemerkung“ angegeben. Für die Windauswertungen wurden Stationen 1-16 verwendet. Stationen M1-M5 wurden temporär für drei Jahre 2013-2015 während der Projektlaufzeit aufgestellt.

Nr	Name	Stations-ID	Lat	Lon	Höhe [m]	Bemerkung
1	Zugspitze	5792	47,4209	10,9847	2964	Wind: 16 m Temperatur: 10 m
2	Mittenwald/Obb.	6103	47,4287	11,2617	981	Wind: 12 m
3	Garmisch-Partenkirchen	1550	47,4830	11,0621	719	Wind: 15 m
4	Halblech-Bayerniederhofen	15214	47,6247	10,8076	808	
5	Hohenpeissenberg	2290	47,8009	11,0108	977	Wind: 15 m
6	Altenstadt	125	47,8342	10,8667	756	
7	Attenkam	217	47,8774	11,3642	672	
8	Holzkirchen	2319	47,8823	11,6962	685	
9	Wielenbach	7308	47,8847	11,1540	550	
10	Starnberg-Perchting	6238	47,9946	11,2690	675	
11	München-Stadt *	3379	48,1631	11,5429	515	Wind: 28.5 m
12	München-Flughafen	1262	48,3477	11,8133	446	
13	Weihenstephan-Dürnast	5404	48,4025	11,6946	477	
14	Augsburg	232	48,4254	10,9420	461	
15	Neuburg/Donau (Flugplatz)	3484	48,7086	11,2147	380	
16	Ingolstadt (Flugplatz)	2410	48,7112	11,5362	364	
17	Flugwarte-Riem	3390	48,1369	11,7094	529	
18	Oberhaching-Laufzorn	7431	48,013	11,3324	604	
19	Nymphenburgerpark	3385	48,1660	11,5011	515	
20	Oberschleißheim	3722	48,2443	11,5528	484	
M1	Buchendorf	–	48,0638	11,4071	583	
M2	Großesseloher brücke	–	48,0714	11,5413	528	
M3	Unterhaching	–	48,0539	11,6306	559	
M4	Dingharting	–	47,9748	11,5189	671	
M5	Aying	–	47,9752	11,7695	604	

* Für den Vergleich mit den MUKLIMO_3 Simulationen in Kapitel 6.1 wurden die Koordinaten vor der Stationsverlegung 1997 verwendet, als sich die Station am Bavariaring befand (Lat: 48,1363 / Lon: 11,5508, Höhe: 535m).

Tabelle A.2 Anzahl der Sonnenstunden in Stunden pro Monat, die einer Globalstrahlung von 20 bzw. 10 MJ/m² entspricht (aus LUGAUER und WINKLER, 2005).

Sonnenscheindauer	Jan	Feb	März	April	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
20 MJ/m ²	24,3	15,1	10,1	8,1	7,3	6,7	7,3	8,4	10,5	14,0	18,7	24,7
10 MJ/m ²	10,5	6,1	3,5	2,0	1,7	0,8	1,6	1,9	3,5	5,7	8,2	11,1

2. Trendberechnung

Für die Berechnung von kontinuierlichen Größen (d.h. Temperaturmittel und Niederschlagssummen) wurde eine einfach lineare Regression und der t-Test angewendet. Niederschlag, der nicht normalverteilt ist, wurde vor der Trendberechnung logarithmisch transformiert.

Für die Kenntage wurde eine logistische Regression und der t-Test angewendet mit einer Korrektur für Überdispersion der Ergebnisse.

Trends werden als statistisch signifikant bezeichnet bei einem p-Wert von 0.05.

Für eine detailliertere Erklärung zur Trendberechnung wird auf die Fachliteratur verwiesen (z.B. WILKS, 2011)

Berichte des Deutschen Wetterdienstes

Nr. 251 T. Winterrath

Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie

Nr. 250 C. Hinz

Optische Erscheinungen und andere ungewöhnliche Wetterphänomene auf der Wetterwarte Fichtelberg

Nr. 249 H. Noppel:

Modellbasierte Analyse des Stadtklimas als Grundlage für die Klimaanpassung am Beispiel von Wiesbaden und Mainz: Abschlussbericht zum Arbeitspaket 3 des Projekts KLIMPRAX Wiesbaden/Mainz - Stadtklima in der kommunalen Praxis

Nr. 248 U. Sievers:

Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3. - Teil 2: Thermodynamische Erweiterungen

Nr. 247 K. Trusilova; W. Riecke:

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

Nr. 246 Hänsel, Stephanie; Schucknecht, Anne; Böttcher, Falk; Bernhofer, Christian; Matschullat, Jörg:

Niederschlagsveränderungen in Sachsen von 1901 bis 2100 - Starkniederschlags- und Trockenheitstrends

Nr. 245 P. Winkler:

Untersuchung zu historischen und neuzeitlichen Dampfdruckmessungen am Observatorium Hohenpeißenberg

Nr. 244 Ch. Brendel; E. Brisson; F. Heyner; E. Weigl; B. Ahrens:

Bestimmung des atmosphärischen Konvektionspotentials über Thüringen

Nr. 243 K. Hoffmann; W. Bivour; B. Früh; M. Koßmann; P.-H. Voß:

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

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. Früh, 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

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



Deutscher Wetterdienst

Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes

Bildungszentrum

Am DFS-Campus 4

63225 Langen