

MASTERARBEIT

Zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Validierung des mesoskaligen Transport- und Strömungsmodells 'METRAS' für Berlin anhand der Messkampagne der Freien Universität Berlin vom Sommerhalbjahr 2012

Autorin: Kerstin Schäfer

Erstgutachterin: Prof. Dr. Sahar Sodoudi

Zweitgutachter: Prof. Dr. Ulrich Cubasch

Zusammenfassung

Die Weltbevölkerung und insbesondere die Bevölkerung in Städten wird in den nächsten Jahrzehnten weiter zunehmen. Zusätzlich verändern sich die Lebensbedingungen durch den Klimawandel. Da Städte ihr eigenes spezielles Klima haben, ist es sinnvoll, den Einfluss des Klimawandels auf die Städte zu untersuchen. Dazu wurden bereits verschiedene Modelle entwickelt und diese Modelle wurden mit gemessenen Daten zu validiert. In dieser Arbeit wird das mesoskalige Transport- und Strömungsmodell METRAS von der Universität Hamburg für Berlin untersucht. Hierzu werden die Daten verwendet, die im Rahmen von MILIEU - Centre for Urban Earth System Studies gemessen wurden. Im Jahr 2012 wurden sechs Messkampagnen gestartet, bei denen die Temperatur und die relative Feuchte in 2m Höhe und in 5cm Höhe von Studenten aufgezeichnet wurden. Außerdem wurden die Daten von festen Messstationen in Berlin verwendet. Sie wurden vom Deutschen Wetterdienst, der Firma Meteomedia, der Hochschule für Technik und Wirtschaft, der Technischen Universität Berlin und der Freien Universität Berlin zur Verfügung gestellt.

Bei der Auswertung der Messkampagne hat sich ergeben, dass die Temperaturmesswerte der Messkampagne überwiegend höher als an den festen Messstationen waren. Dies hängt mit den Messgeräten und damit, dass die Messwerte der Messkampagne überwiegend über Asphalt gemessen wurden, zusammen. Außerdem konnte am Beispiel Flughafen Tempelhof gezeigt werden, dass der Temperaturunterschied zwischen 2m und 12m gering ist. Jedoch fällt auf, dass die Temperatur in 12m ausgeglichener als in 2m ist. Dieser Aspekt ist für die Analyse wichtig, da vom Modell METRAS nur 10m und Oberflächen-Temperaturen zur Verfügung stehen. Bei der Auswertung der Modelldaten fällt auf, dass im Modell stets mehr Niederschlag simuliert als gemessen wurde. Dies hängt mit unterschiedlichen Faktoren zusammen; zum einen damit, dass im Modell immer Bodenfeuchte angenommen wird, zum anderen mit dem verwendeten Niederschlagsschema. Außerdem zeigt sich beim Vergleich der METRAS-Daten mit den MODIS-Satellitendaten, dass im Tagesmittel die Oberflächentemperaturen mit 12% mittlerer prozentualer absoluter Fehler gut wiedergegeben werden.

Abstract

The world's population and especially the population in urban areas will increase over the next decades. In addition, the living conditions change due to climate change. As cities develop their own special climate, it is important to analyse the impact of climate change on cities. Different climate models have been developed. These models have to be validated with measured data. In this work the Mesoscale Transport and Fluid Model METRAS from the University of Hamburg is analysed for Berlin.

In the year 2012 six measuring campaigns were started within the framework of MILIEU - Centre for Urban Earth System Studies. The students measured the temperature and the relative humidity in 2m and 5cm height above ground. These data and data of permanent measurement stations in Berlin are used for the validation. The Deutscher Wetterdienst, the company Meteomedia, the Freie Universität Berlin, the Technische Universität Berlin and the Hochschule für Technik und Wirtschaft provided the data.

The evaluation of the measurement campaign revealed that the students measured predominately higher temperatures and lower relative humidities. This is connected with the measuring instruments and the fact that the students measured mainly over asphalt. Additionally, Tempelhof Airport could be shown as an example, that the temperature difference between 2m and 12m is low. The temperature fluctuations in 12m were smaller than in 2m. This aspect is important for the analysis, because from the model METRAS only 10m temperature and surface temperature were available.

At the evaluation of the model data it stands out, that in the model everyday more precipitation simulated than in reality is measured. This depends on different factors; on the one hand with the fact that there is always more soil moisture and on the other hand with the used precipitation scheme.

Furthermore, when comparing METRAS-data with MODIS satellite data show that the daily mean surface temperature are well reproduced with 12% mean percentage absolute error.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xiv
1. Einleitung	1
2. Stadtklima	4
2.1. Relevante Faktoren für das Stadtklima	4
2.2. Einfluss der Bodenbeschaffenheit	6
2.3. Städtische Wärmeinsel	7
2.4. Wetterlagen	8
2.5. Relative Feuchte in der Stadt	9
2.6. Klimatologie von Berlin	9
3. Messdaten	14
3.1. Messgeräte	17
3.2. Messstationen in Berlin	19
3.3. Messkampagne und Wetterlage	22
3.3.1. 1. Messtag am 21. April 2012	23
3.3.2. 2. Messtag am 2. Juni 2012	25
3.3.3. 3. Messtag am 4. August 2012	27
3.3.4. 4. Messtag am 18. August 2012	29
3.3.5. 5. Messtag am 20./21. August 2012 (Nachtmessung)	31
3.3.6. 6. Messtag am 1. September 2012	32
3.3.7. Weitere Bearbeitung der Messkampagne und Auswahl der Tage	34
3.4. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)	35
4. Statistische Auswertungsverfahren	36
5. Auswertung der Messkampagne der Freien Universität Berlin	38
5.1. Analyse der 5cm-Temperaturdaten	38
5.1.1. Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf die relative Feuchte	38
5.1.2. Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf die Temperatur	39
5.1.3. Fallbeispiel Route Wuhlheide und Rummelsburg vom 18. August 2012	40
5.1.4. Schlussfolgerung	42

5.2.	Analyse der 2m-Daten	42
5.2.1.	2m-Temperatur	42
5.2.2.	2m-relative Feuchte	47
5.2.3.	21. April 2012	48
5.2.4.	04. August 2012	50
5.2.5.	Nachtmessung vom 20. auf den 21. August 2012	53
5.2.6.	Stadt-Umland-Vergleich	54
5.2.7.	Schlussfolgerung	55
6.	Mesoskaliges Transport- und Strömungsmodell (METRAS)	56
6.1.	Eingangsdaten von mesoskalige Transport- und Strömungsmodell (METRAS) . . .	58
6.1.1.	Landnutzungsdaten und Topographiedaten	59
6.1.2.	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)-Daten und Nestingverfahren	62
6.2.	Anleitung zur Verwendung von METRAS	63
7.	Vergleich simulierter Daten von METRAS mit den Daten der Messkampagne	66
7.1.	Vergleich der 2m- mit den 12m-Temperaturdaten am Flughafen Tempelhof	67
7.2.	Vergleich der Gitterpunkte mit den Lagepunkten aller Messwerte	70
7.3.	2. Juni 2012	71
7.3.1.	Auswertung der gemessenen Daten	71
7.3.2.	Betrachtung der METRAS-Ergebnisse	72
7.3.3.	Vergleich der gemessenen Daten mit den METRAS-Daten	75
7.3.4.	Statistische Analyse der gemessenen Daten und der METRAS-Daten	75
7.4.	18. August 2012	78
7.4.1.	Auswertung der gemessenen Daten	78
7.4.2.	Betrachtung der METRAS-Ergebnisse	79
7.4.3.	Vergleich der gemessenen Daten mit den METRAS-Daten	80
7.4.4.	Statistische Analyse der gemessenen Daten und der METRAS-Daten	83
7.5.	1. September 2012	83
7.5.1.	Auswertung der gemessenen Daten	83
7.5.2.	Betrachtung der METRAS-Ergebnisse	86
7.5.3.	Vergleich der gemessenen Daten mit den METRAS-Daten	87
7.5.4.	Statistische Analyse der gemessenen Daten und der METRAS-Daten	88
7.6.	Untersuchung der simulierten Oberflächentemperatur	90
7.6.1.	Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf die Oberflächentemperatur	90
7.6.2.	Vergleich der simulierten Oberflächentemperatur mit den Satellitendaten	92
8.	Fazit und Ausblick	95
A.	Anhang	A-1

Abbildungsverzeichnis

1.1. Heat Index Tabelle	2
2.1. Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf die Oberflächentemperatur	7
2.2. Mittlere Temperaturabweichung der einzelnen Stationen vom Mittelwert über alle Temperaturen aller Stationen für die Jahre 2006 bis 2011 [Gdowska, in Arbeit] . . .	10
2.3. Langjährige Mitteltemperatur (1961 - 1990) für Berlin [Umweltatlas, 2001]	11
2.4. Versiegelungsgrad von Berlin aus dem Umweltatlas in % [Umweltatlas, 2012] . . .	13
2.5. Langjährige mittlere Verdunstung in mm/a für Berlin [Umweltatlas, 2007]	13
3.1. Verteilung der Messpunkte mit zugeordneten Nummern	15
3.2. Messpunkte vom Deutschen Wetterdienst (DWD) in türkis und von der Firma Me- teomedia in rot	19
3.3. Messstandorte vom Stadtmessnetz der Freie Universität Berlin (FU)	20
3.4. Messstandorte der Technischen Universität Berlin	21
3.5. Alle Messpunkte am 21. April 2012	23
3.6. Niederschlagsradar om 21. April 2012	24
3.7. Verlauf der a) Temperatur und der b) relativen Feuchte am 21. April 2012	25
3.8. Alle Messpunkte der Messkampagne am 2. Juni 2012	26
3.9. Radarbild vom 2. Juni 2012 um 14 Uhr Mitteleuropäische Sommerzeit (MESZ) . . .	26
3.10. Verlauf der a) Temperatur und der b) relativen Feuchte am 2. Juni 2012	27
3.11. Alle Messpunkte der Messkampagne am 4. August 2012	28
3.12. Radarbild vom 2. Juni 2012 um 14 Uhr MESZ	28
3.13. Verlauf der a) Temperatur und der b) relativen Feuchte am 4. August 2012	29
3.14. Alle Messpunkte der Messkampagne am 18. August 2012	30
3.15. Verlauf der a) Temperatur und der b) relativen Feuchte am 18. August 2012	30
3.16. Alle Messpunkte der Messkampagne von 16 Uhr MESZ am 20. August bis 16 Uhr MESZ am 21. August 2012	31
3.17. Verlauf der Temperatur am 20./21. August 2012	32
3.18. Alle Messpunkte der Messkampagne am 1. September 2012	33
3.19. Verlauf der a) Temperatur und der b) relativen Feuchte am 1. September 2012 . . .	33
3.20. Student beim Messen	34

5.1. Abweichung der 5cm relativen Feuchte aufgrund der Bodenbeschaffenheit	39
5.2. Abweichung der 5cm-Temperatur aufgrund der Bodenbeschaffenheit	40
5.3. Fallbeispiel Route Wuhlheide und Rummelsburg vom 18. August 2012	41
5.4. Abweichungen der 2m-Temperatur vom zeitlichen Mittelwert	43
5.5. Über die Jahre 2011 und 2012 gemittelter Tagesgang der Messstationen Botanischer Garten, Tegel-Forstamt, Müggelsee und Fasanenstraße vom Stadtmessnetz der Freien Universität Berlin	45
5.6. Verteilung der gemittelten Abweichungen vom zeitlichen Mittelwert der Mess- punkte und der Messkampagne mit Ausnahme der Nachtmessungen	46
5.7. Abweichung der Messwerte der 2m relativen Feuchte vom zeitlichen Mittelwert .	47
5.8. Verteilung der gemittelten Abweichungen der 2m-Temperatur am 21. April 2012 für Berlin	49
5.9. Verteilung der gemittelten Abweichungen der 2m-relativen Feuchte am 21. April 2012 von 9 bis 15 Uhr (MESZ) für Berlin	50
5.10. Verlauf der Temperatur am 4. August 2012 je Uhrzeit gemittelt über alle Stationen der jeweiligen Institution	51
5.11. Gemittelte Verteilung der 2m relativen Feuchte vom 4. August 2012	52
5.12. Abweichungen der 2m relativen Feuchte vom 4. August 2012	52
5.13. Nachtmessung vom 20. auf den 21.08.2012	53
5.14. Stadt-Umland-Vergleich im August	55
6.1. Bodenfolgende Koordinaten. Die linke Achse zeigt die Höhe in Meter und die rechte Achse die bodenfolgenden Höhenlinien [Dierer, 1997].	58
6.2. CORINE-Landnutzungsclassen	60
6.3. Landnutzungsclassen von der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt	61
6.4. Topographie von Deutschland [m]	62
6.5. Größe der Gebiete mit einem Gitterpunktabstand von 4km, 1km und 200m	62
7.1. Über die Jahre 2006 bis 2010 täglich und stündlich gemittelter Temperaturverlauf am Flughafen Tempelhof für die 2m und die 12m-Temperatur	67
7.2. Gemittelter Temperaturtagesgang in MEZ für die Jahre 2006 bis 2010 am Flughafen Tempelhof. In rot sind die 2m und in schwarz die 12m-Temperaturen eingetragen	67
7.3. Verteilung der Temperaturmesswerte in 2m Höhe und 12m Höhe am Flughafen Tempelhof	67
7.4. Vergleich der 2m mit den 12m-Temperaturen in °C am Flughafen Tempelhof	68
7.5. Vergleich der 2m mit den 12m-Temperaturen für das Winterhalbjahr und das Som- merhalbjahr am Flughafen Tempelhof	69
7.6. Vergleich der 2m mit den 12m-Temperaturen am Flughafen Tempelhof für den heißesten Tag und den kältesten Tag im Zeitraum von 2006 bis 2012.	69
7.7. Vergleich der Lagepunkte der Messungen und den METRAS-Gitterpunkten am 2. Juni 2012	70
7.8. Verteilung der gemittelten Abweichungen vom zeitlichen Mittelwert der 2m-Temperaturen am 2. Juni 2012 für Berlin	71

7.9. Verteilung der gemittelten Abweichungen der 2m-relativen Feuchte am 2. Juni 2012 für Berlin	72
7.10. Temperaturentwicklung am 2. Juni 2012 im Modell METRAS für die Uhrzeiten a) 0 Uhr, b) 3 Uhr, c) 6 Uhr, d) 9 Uhr, e) 12 Uhr, f) 15 Uhr, g) 18 Uhr und h) 21 Uhr (Local Sun Time (LST))	74
7.11. Verlauf aller gemessenen Werte in blau und der Modellwerte der nächstgelegenen Gitterpunkte in schwarz je Stunde für den 2. Juni 2012	75
7.12. Verteilung der gemittelten absoluten Differenzen (mittlerer absoluter Fehler (MAE)) zwischen gemessenen Werten und simulierten Werten für den 2. Juni 2012	77
7.13. Verteilung des gemittelten Biasfehlers zwischen gemessenen Werten und simulierten Werten für den 2. Juni 2012	77
7.14. Verteilung der Abweichungen der 2m-Temperaturen am 18. August 2012 von 9 bis 16 Uhr MESZ für Berlin	78
7.15. Von METRAS simulierte Temperatur und Wind in 10m Höhe am 18. August 2012 um 18 Uhr LST	79
7.16. Simulierte 10m-Temperatur am 18. August 2012 um 17 und 19 Uhr LST	80
7.17. Verlauf der Temperatur am 18. August von 0 bis 23 Uhr Mitteleuropäische Zeit (MEZ). Gemessen am Boden und in 2m Höhe als auch simuliert an der Oberfläche und in 10m Höhe.	81
7.18. Der Tagesgang der Temperaturen an den Stationen Fasanenstraße, Botanischer Garten, Flughafen Schönefeld und Flughafen Tegel für a) die festen Messstationen und b) für die METRAS-Vergleichspunkte am 18. August 2012	82
7.19. Verteilung des gemittelten absoluten Fehlers bzw. Differenz zwischen den gemessenen und den simulierten Werten für den 18. August 2012	84
7.20. Verteilung des gemittelten Biasfehlers zwischen den gemessenen und den simulierten Werten für den 18. August 2012	84
7.21. Verteilung der Abweichungen der 2m-Temperatur vom zeitlichen Mittelwert	85
7.22. Die simulierte Temperaturverteilung am 1. September 2012 um 0 Uhr LST.	86
7.23. Simulierte Temperatur und Regenwassergehalt in 10m Höhe am 1. September um 15 Uhr LST	86
7.24. Temperaturverlauf der gemessenen Temperaturen in blau und der simulierten Temperaturen in schwarz vom 1. September 2012	87
7.25. Verteilung des gemittelten absoluten Fehlers bzw. Differenz zwischen den gemessenen Werten und den simulierten Werten für den 1. September 2012	89
7.26. Verteilung des gemittelten Biasfehlers zwischen den gemessenen Werten und den simulierten Werten für den 1. September 2012	89
7.27. Oberflächentemperaturentwicklung am 18. August 2012 im Modell METRAS	91
7.28. Oberflächentemperaturverteilung der METRAS-Daten am 18. August 2012 um 21 Uhr LST	93
7.29. Oberflächentemperaturverteilung der MODIS-Daten am 18. August 2012 um 20:20 Uhr UTC	93

7.30. Verteilung der Oberflächentemperaturdifferenzen zwischen METRAS und MODIS am 18. August 2012 um 20 Uhr UTC. Zusätzlich wurden die Fehler der MODIS-Daten mit unterschiedlichen Symbolen eingetragen.	94
A.1. Verteilung der gemittelten Abweichungen der relativen Feuchte in Berlin von allen Messwerten	A-1
A.2. Abweichungen der Temperatur vom zeitlichen Mittelwert für alle Messwerte am 21. April 2012	A-2
A.3. Abweichungen der Temperatur vom zeitlichen Mittelwert am 21. April 2012 ohne die Werte zwischen 14:30 und 15:30 Uhr MESZ.	A-2
A.4. Abweichungen der 2m relativen Feuchte vom zeitlichen Mittelwert für alle Messwerte am 21. April 2012	A-3
A.5. Abweichungen der 2m relativen Feuchte vom zeitlichen Mittelwert am 21. April 2012 ohne die Werte zwischen 14:30 und 15:30 Uhr MESZ	A-3
A.6. Gemittelte Verteilung der 2m-Temperatur vom 4. August 2012	A-4
A.7. Abweichungen der 2m-Temperatur vom 4. August 2012	A-4
A.8. Abweichungen der 2m-Temperatur vom zeitlichen Mittelwert am 21. April 2012 bis 13 Uhr MESZ	A-5
A.9. Abweichungen der 2m relativen Feuchte vom zeitlichen Mittelwert am 21. April 2012 bis 13 Uhr MESZ	A-5
A.10. Vergleich zwischen den Lagepunkten der Messungen und den METRAS-Gitterpunkten am 18. August 2012	A-6
A.11. Vergleich zwischen den Lagepunkten der Messungen und den METRAS-Gitterpunkten am 1. September 2012	A-6
A.12. Topographie von Berlin	A-7
A.13. Fehler der Oberflächentemperaturen von MODIS am 18. August 2012 um 20:20 Uhr UTC	A-7

Tabellenverzeichnis

2.1. Temperaturdifferenzen zwischen Stadt und Land für Berlin [Kratzer, 1959]	10
3.1. Zuordnung der Routennummern zu den jeweiligen Messstandorten	17
3.2. BC20 Thermo Hygrometer von TROTEC	17
3.3. Hygro-Thermometer von THIES	17
3.4. Feuchte-Temperatur-Sensor von Lambrecht	18
3.5. CS215 von Campell Scientific	18
3.6. HMP45A von VAISALA	18
3.7. Messstationen der Technischen Universität Berlin	21
3.8. Übersicht der Messrouten pro Messtag	22

Abkürzungsverzeichnis

CLC	CORINE Land Cover
CORINE	Coordination of Information on the Environment
CS	Campbell Scientific
DWD	Deutscher Wetterdienst
DKRZ	Deutsches Klimarechenzentrum
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
FU	Freie Universität Berlin
GCM	Global Climate Modell
HNz	Hoch Nordmeer, zyklonal
HTW	Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
K	Kelvin
LST	Local Sun Time
MAE	mittlerer absoluter Fehler
MBE	mittlerer Biasfehler
METRAS	mesoskalige Transport- und Strömungsmodell
MEZ	Mitteleuropäische Zeit
MESZ	Mitteleuropäische Sommerzeit
MM5	Mesoskalige Modell 5
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MAPE	mittlerer absoluter prozentualer Fehler
RCM	regionales Klimamodell
RMSE	Root Mean Square Error
SWz	Südwestlage zyklonal
TDL	Thies Datenlogger
TU	Technische Universität Berlin
UME	Urban Moisture Excess
UTC	Coordinated Universal Time
WRF	Weather Research and Forecasting Modell

Kapitel 1

Einleitung

Die Weltbevölkerung wird zwischen 2007 und 2050 um 2,5 Milliarden Menschen zunehmen [United Nations, 2008]. Je mehr Menschen auf der Erde leben, desto mehr Energie wird benötigt. Bei der Energieerzeugung wird viel Kohlendioxid freigesetzt. Durch die Freisetzung von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen wird mehr langewellige Strahlung vom Erdboden in der Atmosphäre absorbiert und zurückgestrahlt. Dies führt zu einer globalen Erwärmung. Durch den Treibhauseffekt steht mehr Energie zur Verfügung in der Atmosphäre und extreme Wetterereignisse treten öfter auf. Diese haben einen starken Einfluss auf die Gesundheit der Menschen. So starben im Extremsommer 2003 allein in Deutschland 9.355 Menschen wegen der Hitze [International Disaster Database, 2013].

Auch wirtschaftliche Bereiche wie der Tourismus sind vom Klimawandel betroffen. In den Alpenregionen macht sich die Erhöhung der globalen Temperatur besonders stark bemerkbar. Aufgrund des Klimawandels nehmen die Niederschläge im Sommer und Winter ab. Als Folge dessen wird sich die Anzahl der schneesicheren Skigebiete in Zukunft verkleinern [Abegg, 2011].

Die Bevölkerungszunahme macht sich allerdings nicht nur durch erhöhten Energieverbrauch bemerkbar, sondern auch durch eine Vergrößerung der Städte. Obwohl die gesamte Weltbevölkerung bereits um 2,5 Milliarden Menschen zunehmen soll, nimmt die Bevölkerung in Städten vorraussichtlich sogar um 3,3 Milliarden Menschen zu. Dies liegt daran, dass die Stadtbevölkerung besonders in Entwicklungsländern auf Kosten der Landbevölkerung weiter wachsen wird. Bereits heute lebt über 50% der Weltbevölkerung in Städten [United Nations, 2008].

Berlin ist das dicht-besiedelste Bundesland Deutschlands mit 55% Siedlungsfläche und 15% Verkehrsfläche im Jahr 2009. Innerhalb der nächsten 15 Jahre wird jedoch die Bevölkerung in Berlin vorraussichtlich um mehrere 100.000 Menschen zunehmen [Lüschner, 2012]. Wegen dieser Zunahme muss neuer Wohnraum in der Stadt gebaut werden. Dabei waren bereits im Jahr 2009 in Berlin 70% der gesamten Fläche versiegelt [Statistische Ämter der Länder, 2011].

Bereits 1833 hat Howard festgestellt, dass die Stadt durch ihre versiegelten Flächen und ihre im

Vergleich zum Land geringere Vegetation ein eigenes Klima entwickelt [Howard, 1833]. Dieses Stadtklima wird durch den Klimawandel zusätzlich verstärkt, so dass gerade in Städten besonders hohe Extremwerte der Temperatur gemessen werden.

Es gibt verschiedene Indizes, mit denen das Wohlbefinden der Menschen in den Städten gemessen werden kann. Der Heat Index beschreibt den Zusammenhang zwischen dem menschlichen Befinden und hohen Temperaturen und hohen relativen Feuchtigkeiten. Die Abbildung 1.1 zeigt die Temperatur und relative Feuchte Tabelle des Heat Index. Es gibt sechs Stufen. Die erste Stufe (hellblau) wirkt sich noch nicht auf das Wohlbefinden des Mensch aus. Erst ab der zweiten Stufe (creme), die bis zu einer Temperatur von 33 °C verbunden mit einer relativen Feuchte von 25% reicht, ist es unangenehm für den Menschen. Ab der dritten Stufe (gelb) ist Vorsicht geboten. Es wird empfohlen keine großen Anstrengungen zu unternehmen. Diese dritte Stufe stellt sich bereits bei 33 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 30% ein. Ab der vierten Stufe (ocker) sind bereits Sonnenstiche, Hitzekrämpfe und Hitzekollapse möglich. Sie beginnt bei 33 °C und 45%. Bei einer relativen Feuchte von 65% und einer Temperatur von 33 °C ist die fünfte Stufe (orange) erreicht. Bei dieser Stufe ist ein Sonnenstich wahrscheinlich und es können schon Hitzeschläge auftreten. Erhöhte Gefahr droht bei Stufe 6 (rot). Diese stellt sich bei einer relativen Feuchte von 95% und einer Temperatur von 33 °C ein. Da bei diesem Heat Index Sonnenstiche oder Hitzeschläge sehr wahrscheinlich sind, sollte man sich bei diesen Werten in klimatisierten Gebäuden aufhalten.

	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
42°	48	50	52	55	57	59	62	64	66	68	71	73	75	77	80	82
41°	46	48	51	53	55	57	59	61	64	66	68	70	72	74	76	79
40°	45	47	49	51	53	55	57	59	61	63	65	67	69	71	73	75
39°	43	45	47	49	51	53	55	57	59	61	63	65	66	68	70	72
38°	42	44	45	47	49	51	53	55	56	58	60	62	64	66	67	69
37°	40	42	44	45	47	49	51	52	54	56	58	59	61	63	65	66
36°	39	40	42	44	45	47	49	50	52	54	55	57	59	60	62	63
35°	37	39	40	42	44	45	47	48	50	51	53	54	56	58	59	61
34°	36	37	39	40	42	43	45	46	48	49	51	52	54	55	57	58
33°	34	36	37	39	40	41	43	44	46	47	48	50	51	53	54	55
32°	33	34	36	37	38	40	41	42	44	45	46	48	49	50	52	53
31°	32	33	34	35	37	38	39	40	42	43	44	45	47	48	49	50
30°	30	32	33	34	35	36	37	39	40	41	42	43	45	46	47	48
29°	29	30	31	32	33	35	36	37	38	39	40	41	42	43	45	46
28°	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
27°	27	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
26°	26	26	27	28	29	30	31	32	33	34	34	35	36	37	38	39
25°	25	25	26	27	27	28	29	30	31	32	33	34	34	35	36	37
24°	24	24	24	25	26	27	28	28	29	30	31	32	33	33	34	35
23°	23	23	23	24	25	25	26	27	28	28	29	30	31	32	32	33
22°	22	22	22	22	23	24	25	25	26	27	27	28	29	30	30	31

Abbildung 1.1.: Heat Index Tabelle¹ Stand 15.11.2013

¹http://www.eurometeo.com/english/read/doc_heat

Die Temperatur und die relative Luftfeuchte ist in Städten sehr vom Standort abhängig. Mit den Modellen können Luftströmungen innerhalb der Stadt dargestellt werden, so dass bereits vorzeitig vor Gefahren, wie Windböen, Windstille, Hitzestress oder einer hohen Konzentration an Verschmutzungen gewarnt werden kann, bevor sie zu gesundheitlichen Folgen führen [Nakamura und Oke, 1988]. Deswegen ist es wichtig, dass Modelle entwickelt werden, mit denen die Erhaltung der Lebensqualität des Menschen gewährleistet werden kann.

Viele verschiedene mesoskaligen Modelle wurden in den letzten Jahren entwickelt, wie das Mesoskalige Modell 5 (MM5) und das Weather Research and Forecasting Modell (WRF). Diese wurden bereits für verschiedene Städte angewendet. Mit dem Weather Research and Forecasting Modell WRF wurde die simulierte und gemessene Kohlendioxidbelastung in Salt Lake City verglichen [Nehrkorn et al., 2013]. Mit dem mesoskaligen Modell MM5 wurde die städtische Wärmeinsel in Tokio untersucht [Kawamoto und Ooka, 2009]. In dieser Arbeit wird nun das mesoskalige Transport- und Strömungsmodell (METRAS) [Schlünzen et al., 1996a] für Berlin validiert. Da es bisher überwiegend nur in Hamburg verwendet wurde, gibt es nur wenige Arbeiten, die sich mit dem METRAS-Modell und dem Stadtklima beschäftigen haben. Für den Vergleich mit METRAS wurden die Daten der Messstationen der Freien Universität Berlin (FU), der Technischen Universität Berlin (TU) und der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW), des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der Firma Meteomedia genutzt.

Zusätzlich fand zwischen 2009 und 2012 das Projekt MILIEU - Centre for Urban Earth System Studies in Berlin statt [Cubasch (Ed.), 2012]. Es gab sieben verschiedene Module, die als Forschungsketten bezeichnet wurden. Im Rahmen der siebenten Forschungskette wurden sechs Messkampagnen durchgeführt. Die Daten dieser Messkampagnen werden sowohl separat ausgewertet, als auch dazu verwendet, das METRAS zu validieren.

Zur Validierung der Stadteffekte ist eine sehr gute Abdeckung der Stadt mit Messwerten wichtig, die für Berlin in dieser Arbeit gegeben ist.

In Kapitel 2 wird zunächst das Stadtklima allgemein und speziell auch das Stadtklima von Berlin näher betrachtet. Danach wird in Kapitel 3 auf die gemessenen Daten eingegangen. Kapitel 4 beschäftigt sich mit den in dieser Arbeit verwendeten statistischen Auswerteverfahren. Anschließend werden in Kapitel 5 die Werte aus den Messkampagnen mit den Werten der festen Messstationen verglichen. Das Kapitel 6 beschreibt das Modell METRAS und die benötigten Eingangsdaten. Zum Abschluss wird im Kapitel 7 METRAS mit Hilfe der gemessenen Daten und mit den Satellitendaten validiert.

Kapitel 2

Stadtklima

Das Klima einer Stadt ist aufgrund der kleinräumigen Strukturen innerhalb des Stadtgebietes sehr komplex. Dies liegt an den unterschiedlichen thermischen und mechanischen Eigenschaften des Untergrundes. Im Folgenden soll nun der Einfluss von Straßenschluchten, versiegelten Flächen, Grünflächen, Bäumen und Sträuchern, Wasserflächen, der Lage der Stadt und der Luftverschmutzung näher erklärt werden. Anschließend wird die städtische Wärmeinsel beschrieben. Im Weiteren wird der Einfluss von Wetterlagen und Feuchte auf das Stadtklima erörtert. Im Anschluss wird die Klimatologie von Berlin beschrieben.

2.1. Relevante Faktoren für das Stadtklima

Straßenschluchten In der Arbeit von [Nakamura und Oke, 1988] wurde der Wind und die Temperatur in einer Straßenschlucht, die eine Ost-West-Ausrichtung hatte, untersucht. Dabei zeigten sich große Temperaturunterschiede zwischen der Südwand und der Nordwand.

Im Weiteren ist die Höhe der Häuser in einer Straßenschlucht und die Breite der Straße von Bedeutung, denn daraus und aus der Höhe und Anzahl der Bäume lässt sich ein sky-view-factor berechnen. Dieser hat Einfluss darauf, wie viel Strahlung den Erdboden erreicht. Bei geringem sky-view-factor, also hoher Abschattung, wird die Stadt am Tage gekühlt [Arnfield, 2002]. Dies zeigt sich auch im Bankenviertel von Frankfurt am Main. [Elfattah, 2013] fand heraus, dass Bäume einen verstärkenden Effekt haben. Durch die Abschattung hat eine Straßenschlucht mit Bäumen eine höhere Temperatur am Abend und in der Nacht als eine Straßenschlucht ohne Bäume, da durch die Bäume die Austrahlung der langwelligen Strahlung vom Boden noch stärker verhindert wird.

Versiegelte Fläche Die Größe der versiegelten Flächen einer Stadt ist für das Klima sehr relevant, denn durch diese Flächen werden Niederschläge sehr schnell abgeleitet und stehen zur

2.1 Relevante Faktoren für das Stadtklima

Verdunstung nicht zur Verfügung. Außerdem ist nach [Kratzer, 1959] die Wärmekapazität von Stein größer als die von Gras oder Erde. Dies hat zur Folge, dass sich die versiegelten Flächen tagsüber stärker erwärmen und diese Wärme nachts über einen längeren Zeitraum wieder abgeben [Oke, 1978].

Grünflächen Anzahl und Größe der Grünflächen innerhalb einer Stadt haben große Auswirkung auf das Stadtklima. Da die Vegetation Feuchtigkeit durch Evapotranspiration zur Verfügung stellt, kühlt sie die angrenzenden Straßen mit ab. Jedoch reicht der Einfluss nicht sehr weit. So konnten [Saito et al., 1990] zeigen, dass bereits kleine Grünflächen von 60m x 40m zu einer Abkühlung bis zu 3K zwischen Grünfläche und deren Umgebung führen kann. Dabei ist besonders wichtig, ob die Grünflächen bewässert sind; denn durch die Bewässerung steht immer Wasser zur Verdunstung zur Verfügung. Für größere Grünflächen konnte [Wilmers, 1990] sogar Temperaturdifferenzen bis zu 20K messen.

Bäume und Sträucher Bäume und Sträucher beeinflussen durch ihre abschattende Wirkung und ihre Evapotranspiration das kleinräumige Klima einer Stadt. Für Gaborone in Botswana konnte in der Arbeit von [Jonsson, 2004] gezeigt werden, dass in Stadtgebieten mit hohem Vegetationsanteil die Temperatur am Tag um 2K kühler als auf dem Land ist. Es zeigte sich, dass dieser Effekt abnimmt oder sogar negativ werden kann, wenn nur wenig Vegetation in dem städtischen Gebiet vorhanden ist.

Wasserflächen Ozeane, Seen und Flüsse haben einen großen Einfluss auf das Klima einer Stadt [Ackerman, 1985]. Aufgrund der Wärmekapazität brauchen große Wasserflächen im Frühjahr länger zum Erwärmen und kühlen deswegen ihre Umgebung ab. Im Herbst hingegen besitzen sie noch lange gespeicherte Wärme und geben diese allmählich ab.

Lage der Stadt Das Klima einer Stadt ist auch stark von der geographischen Lage der Stadt abhängig, da die Sonneneinstrahlung ortsbedingt unterschiedlich stark. Des Weiteren hat auch die Topographie Einfluss auf das Stadtklima. Eine Stadt im Tal eines Gebirges wird durch die umschließenden Berge abgeschattet und die Temperatur innerhalb der Stadt bleibt geringer. Zusätzlich bilden sich eigene Windzirkulationen innerhalb dieses Tales aus [Oke, 1978].

In nördlichen Städten wird im Winter durch die Heizungsperiode viel zusätzliche Wärme erzeugt. Entsprechend produzieren Städte in wärmeren Regionen im Sommer Wärme durch Klimaanlage [Oke, 1988].

Luftverschmutzung Durch die Luftverschmutzung innerhalb einer Stadt reduziert sich der Anteil der kurzwelligen Einstrahlung, der den Erdboden erreicht [Arnfield, 2002]. In Hong Kong hat der Anteil der kurzwelligen Einstrahlung aufgrund der Industrialisierung zwischen 1958 und 1992 um 33% abgenommen [Stanhill und Kalma, 1995]. Innerhalb dieser 35 Jahre verdoppelte sich die Bevölkerung. Beides zusammen führte zu einer Abnahme der maximalen Temperatur

im Vergleich zum Umland. Die minimale Temperatur nahm dabei jedoch im Vergleich zum Umland zu. Dies liegt daran, dass nicht nur die kurzwellige Einstrahlung sondern vor allem auch die langwellige Ausstrahlung abnahm. Deswegen konnte sich die Wärme länger in einer Stadt halten [Kratzer, 1959].

[Papanastasiou und Kittas, 2011] zeigten, dass in Volos in Griechenland die maximale Differenz zwischen der Temperatur in der Stadt und auf dem Land im Winter durch die Luftverschmutzung zugenommen und im Sommerhalbjahr abgenommen hat. Im Winter überwiegt der Einfluss durch die Abnahme der Ausstrahlung und im Sommer der Einfluss durch die Abschirmung der solaren Einstrahlung.

2.2. Einfluss der Bodenbeschaffenheit

Der Einfluss des Bodens auf die Temperatur ist von der Albedo der jeweiligen Bodenbedeckung abhängig. Die Albedo besagt, wieviel der eingehenden Strahlung absorbiert und wieviel reflektiert wird. Bei einer Albedo mit dem Wert 1 wird die gesamte Sonnenstrahlung reflektiert und der Boden kann nichts in Wärmeenergie umwandeln. Im Gegensatz dazu absorbiert der Boden die gesamte Strahlung bei einer Albedo von 0 und erwärmt sich dabei.

Frischer weißer Schnee hat eine sehr hohe Albedo von bis zu 0,95 und dunkle nasse Erde einen niedrigen von 0,05 [Oke, 1978]. Wenn die Erde sandiger und trockener wird, wächst die Albedo auf bis zu 0,4 an. Die Albedo von Gras liegt hingegen zwischen 0,16 (für langes Gras) und 0,26 (für kurzes Gras). Asphalt hat eine Albedo von 0,05 bis 0,20 [Oke, 1978].

Des Weiteren hat der Wasserhaushalt des Bodens Einfluss auf die Temperatur. Mit dem Bowen-Verhältnis $\beta = H/E$ lässt sich dieser darstellen. H steht für die sensiblen Wärmeflüsse und E für die latenten Wärmeflüsse. β kann Werte von kleiner als 0,1 für nasse Oberflächen und größer als 10 für trockene Oberflächen annehmen [Wilmers, 1990]. Die Temperatur über Gras ist somit deswegen kälter, weil die Einstrahlungsenergie durch den Bewuchs in Verdunstungsenergie umgewandelt wird. Dies bewirkt, dass der sensible Wärmefluss geringer ist.

[Asaeda und Vu Thanh Ca, 1993] zeigten in einem Vergleich von gemessenen Daten mit einem numerischen Modell, dass aufgrund des Wärme- und Feuchtetransportes innerhalb der Bodenschicht nackter Boden niedrigere Temperaturen als Asphalt hat. Je stärker die isolierende Schicht ist, desto weniger Wasser steht zum Verdunsten bereit und umso wärmer wird die Oberfläche.

In Abbildung 2.1 ist der Einfluss der Bodenoberfläche auf die Lufttemperatur dargestellt. Es wird gezeigt, dass sich die Temperatur der Wasseroberfläche wegen der Wärmespeicherkapazität von Wasser im Tagesverlauf kaum ändert, und dass Sand und Asphalt ähnliche Eigenschaften aufweisen. Asphalt erwärmt sich am Morgen schneller und kühlt in der Nacht stärker ab. Die morgendlichen Temperaturdifferenzen ergeben sich dadurch, dass die Albedo von Asphalt niedriger als von Sand und somit die Erwärmung über Asphalt schneller ist. Die Rasenoberfläche hat in der Nacht die kälteste Temperatur. Am Tag nimmt die Temperatur zu, erreicht jedoch nicht die Temperatur von Sand oder Asphalt. Dies zeigt sich auch in der Untersuchung von Erzurum in der Türkei [Yilmaz et al, 2008].

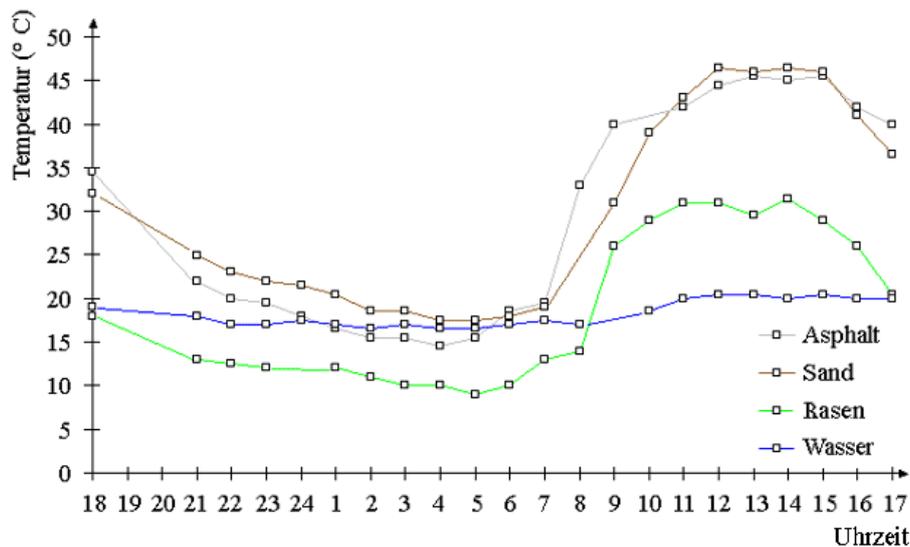


Abbildung 2.1.: Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf die Oberflächentemperatur ¹

¹http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/dc102_01.htm

2.3. Städtische Wärmeinsel

Durch die unterschiedlich starke Ausstrahlung der Oberfläche während der Nacht, entsteht der bekannte Effekt des Stadtklimas, die städtische Wärmeinsel. Die städtische Wärmeinsel wird bestimmt durch die Temperaturdifferenz zwischen einer Messstation in der Stadt und einer Messstation auf dem Land. Wie unter anderem in den Arbeiten von [Miao et al., 2008] und [Oke, 1981] beschrieben, ist der stärkste Einfluss des Stadtklimas in der Nacht zu verzeichnen. In windstillen, klaren Nächten können sich Temperaturdifferenzen zwischen Stadt und Land von bis zu 12K entwickeln [Oke, 1978]. In Chicago wurde eine maximale städtische Wärmeinsel mit 9,3K für die Jahre 1950 bis 1970 gefunden [Ackerman, 1985].

Beeinflusst wird die städtische Wärmeinsel durch die Wolkenbedeckung. Je stärker die Bewölkung ist, desto weniger solare Einstrahlung erreicht den Boden. Durch die fehlende unterschiedliche Erwärmung des Bodenmaterials bilden sich nur geringe Temperaturdifferenzen zwischen Stadt und Land [Kuttler, 2008]. Im Gegensatz wird die städtische Wärmeinsel durch geringe Windgeschwindigkeiten gestärkt, da sich hier der Einfluss der Bodenbeschaffenheit insbesondere bemerkbar macht [Ackerman, 1985].

Verstärkt wird die Wärmebildung auch durch die Anzahl der Menschen, die in der Stadt wohnen und durch die von ihnen verursachte anthropogene Wärme [Kuttler, 2008]. [Oke, 1981] konnte zeigen, dass die Stärke der städtischen Wärmeinsel bei höherer Bebauung größer ist als bei niedriger. Zusätzlich nehmen die Temperaturdifferenzen zu, wenn die Städte sich ausdehnen [Jonsson, 2004]. Dies ist allgemein auch mit einer Verdichtung der Stadt verbunden. Je dichter eine Stadt ist, desto stärker ist auch der Wärmeinseleffekt [Oke, 1978]. Zusätzlich hängt die Stärke der städtischen Wärmeinsel auch von den Temperaturdifferenzen zwischen Land und Stadt des

Vortages ab. Wurde bereits am Vortag eine städtische Wärmeinsel verzeichnet, so verstärkt sich diese am darauffolgenden Tag [Papanastasiou und Kittas, 2011].

In welcher Jahreszeit sich die städtische Wärmeinsel am stärksten ausbildet, ist von der geographischen Lage der Stadt abhängig. In den mittleren Breiten passiert dies im Sommer oder in der entsprechend warmen Jahreszeit. [Ackerman, 1985] konnte für Chicago zeigen, dass die mittlere städtische Wärmeinsel im Juli, August und September mit 2K am stärksten ist und im April mit 1,3K am geringsten. In subtropischen Ländern wie Botswana ist die städtische Wärmeinsel im Winter am stärksten ausgeprägt [Jonsson, 2004].

Auch der Zeitpunkt für die stärkste Ausprägung einer städtischen Wärmeinsel ist unterschiedlich. In der Arbeit von [Jonsson, 2004] wurden die größten Temperaturdifferenzen um 6 Uhr (Ortszeit) morgens kurz vor Sonnenaufgang gemessen. Meistens jedoch sind die Temperaturdifferenzen in der Zeit von 3 bis 5 Stunden nach Sonnenuntergang am größten [Oke, 1981].

städtische Kälteinsel Am Tag ist der Einfluss der städtischen Wärmeinsel schwächer und kann sogar negativ werden [Miao et al., 2008]. Dieser Effekt wird dann als städtische Kälteinsel bezeichnet. In Trento in den Alpen konnte eine städtische Kälteinsel von 1.5 °C gemessen werden [Giovannini et al, 2011]. Im Gegensatz zur städtischen Wärmeinsel ist die städtische Kälteinsel viel schwächer ausgeprägt und entsteht überwiegend durch die Straßenschluchten, die am morgen noch keine Sonnenstrahlung erhalten [Johansson, 2006].

2.4. Wetterlagen

Überprägt wird das Stadtklima durch die aktuelle Wetterlage. Sie hat unter anderem Einfluss auf die Bewölkung, den Wind und die Temperatur. [Morris und Simmonds, 2000] konnten zeigen, dass sich städtische Wärmeinseln bei antizyklonalen Wetterlagen stärker als bei zyklonalen ausbilden. Dies liegt daran, dass sich wolkenlose Tage besonders während Hochdruckwetterlagen einstellen. Bei starker Sonneneinstrahlung können sich die Oberflächen stärker erhitzen als bei bewölktem Wetter. Dies führt dazu, dass Wolken und Regen die Ausbildung von städtischen Wärmeinseln sogar verhindern [Jonsson, 2004]. Jedoch ist es auch von der Art der Bewölkung abhängig, so dass dünne Cirren keinen so großen Einfluss haben wie hochreichende Stratuswolken [Oke, 1978].

Bei hohen Windgeschwindigkeiten ist der Austausch der Luft innerhalb der Stadt so groß, dass sich keine Unterschiede zwischen den einzelnen Bereichen ausbilden können [Kratzer, 1959]. An windstillen Tagen hingegen wird kaum Luft transportiert und der Einfluss des Untergrundes nimmt zu, so dass sich Wärmeinseln bilden [Ackerman, 1985]. Zusätzlich bestimmt die Wetterlage auch die Windrichtung, die unter anderem dafür wichtig ist, in welche Richtung sich der Einfluss von Grünflächen und Wasserflächen auswirkt [Saito et al., 1990].

Umgekehrt hat auch eine Stadt Auswirkungen auf das Wetter. [Belger, 1940] konnte für Berlin zeigen, dass durch die Stadt nichtstationäre Regenfronten verlangsamt werden. Dies liegt daran,

dass aufgrund der Rauigkeit der Stadt die Windgeschwindigkeiten reduziert werden. Diese reduzierten Windgeschwindigkeiten wirken sich allerdings auch auf die Stadt selbst aus, so dass sich die Wärme länger in der Stadt hält [Dandou et al., 2005]. [Chen und Ng, 2011] haben gezeigt, dass eine Abnahme der Windgeschwindigkeit von 0,4 m/s eine Temperaturzunahme von 1K bewirkt.

Speziell im Hinblick auf den Klimawandel haben die Wetterlagen einen wichtigen Einfluss. So besteht die Hypothese, dass sich in Zukunft in Nordamerika, Europa und Asien mehr Wetterlagen mit windstillen und sonnenscheinreichen Tagen einstellen werden [Jacob und Winner, 2009]. Somit wird sich auch die Anzahl der Tage mit einer starken städtischen Wärmeinsel erhöhen.

2.5. Relative Feuchte in der Stadt

Die relative Feuchte hat einen großen Einfluss auf das Stadtklima. Durch die Kanalisation und die versiegelten Fläche in der Stadt wird das Niederschlagswasser sofort abgeleitet und steht somit nicht mehr zum Verdunsten zur Verfügung. Deswegen ist die relative Feuchte in der Stadt meist gering und die Städte werden oft als „Betonwüsten“ bezeichnet. Zusätzlich wird beim Verdunstungsprozess Energie der Umgebung entzogen, wodurch sich die Temperatur abkühlt. Wie stark der Einfluss von verfügbarer Feuchte für das Stadtklima ist, zeigen die Auswirkungen von bewässerten Parks innerhalb einer Stadt. Jedoch ist auch die relative Feuchte von der Temperatur abhängig. Denn Luft mit höherer Temperatur kann mehr Wasserdampf aufnehmen als bei niedriger Temperatur.

Es gibt jedoch auch den umgekehrten Fall, dass die Stadt eine höhere relative Luftfeuchte aufweist als das Umland. Dies wird als Urban Moisture Excess (UME) bezeichnet. Er tritt ein, wenn in der Stadt der Schnee schneller als auf dem Land schmilzt. Außerdem setzt aufgrund der höheren Temperaturen in der Stadt die Taubildung erst später oder zum Teil gar nicht ein. Es konnte gezeigt werden, dass mit ausgeprägter städtischer Wärmeinsel auch die Stärke des UME zunimmt [Kuttler et al., 2007]. Zusammenfassend fanden [Kuttler et al., 2007] heraus, dass der UME überwiegend bei windstillen Wetterlagen auftritt. Die Dauer und die Intensität des städtischen Feuchteüberflusses ist relativ gering und tritt erst in der zweiten Nachthälfte auf.

2.6. Klimatologie von Berlin

Im Jahr 1927 untersuchte A. Treibich die Temperaturen von Berlin und dessen Umland für die Jahre 1911 und 1912 [Kratzer, 1959]. Dabei stellte er fest, dass an bewölkten Tagen die Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Umland bei 0,7K liegt. Nur an bewölkten Tagen im Sommer wird ein leichter Tagesgang verzeichnet, so dass sich um 21 Uhr Temperaturdifferenzen von bis zu 1,3K einstellen.

In Tabelle 2.1 sind die Temperaturdifferenzen an Strahlungstagen eingetragen. Wie erwartet, zeigt sich hier ein stärkerer Tagesgang. Der Einfluss der Albedo ist im Winter zu sehen. Da

Schnee eine sehr hohe Albedo hat, wird fast die gesamte Sonnenstrahlung reflektiert und die Erde erwärmt sich langsamer. Da im Umland mehr Schnee liegt, bleibt es dort im Vergleich zur Stadt kälter. Im Sommer hingegen können sogar negative Werte kurz nach Sonnenaufgang eintreten, da sich die Umgebung durch die ersten Sonnenstrahlen schneller als in der Stadt erwärmt [Kratzer, 1959].

Differenz Stadt-Land			
	7 Uhr	14 Uhr	21 Uhr
Winter, ohne Schnee	1,7	0,4	1,0 °C
Winter, mit Schnee	3,9	0,3	2,3 °C
Sommer	-0,9	0,0	0,3 °C

Tabelle 2.1.: Temperaturdifferenzen zwischen Stadt und Land für Berlin [Kratzer, 1959, Seite 72]

In Abbildung 2.2 ist die mittlere Temperaturabweichung für zwölf Berliner Messstationen für die Jahre 2006 bis 2011 dargestellt [Gdowska, in Arbeit]. Es zeigt sich, dass es in der Dessauer Straße mit einer mittleren Abweichung von 1K am wärmsten ist. Dies liegt daran, dass die Messstation an einer Hauswand angebracht wurde. Die Messstation, die auf dem Dahlemer Feld steht, misst im Mittel die niedrigsten Temperaturen. Die beiden Stadtstationen Fasanenstraße und Steglitzer Kreisel sind die beiden zweitwärmsten Stationen. Auch die beiden innerhalb des S-Bahn-Ringes liegenden Stationen Tiergarten und Flughafen Tempelhof liegen über der Mitteltemperatur.

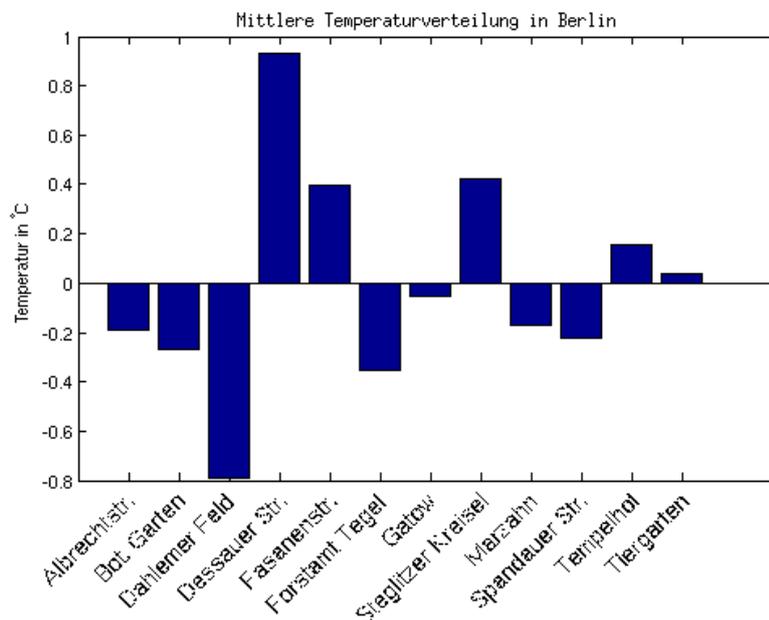


Abbildung 2.2.: Mittlere Temperaturabweichung der einzelnen Stationen vom Mittelwert über alle Temperaturen aller Stationen für die Jahre 2006 bis 2011 [Gdowska, in Arbeit]

In Abbildung 2.3 [Umweltatlas, 2001] wurde die langjährige Mitteltemperatur von Berlin dargestellt. Für diese Grafik wurden viele verschiedene Daten verwendet. So gab es in Dahlem und Tempelhof lange Temperaturreihen, aus denen Mittelwerte berechnet werden konnten. In den

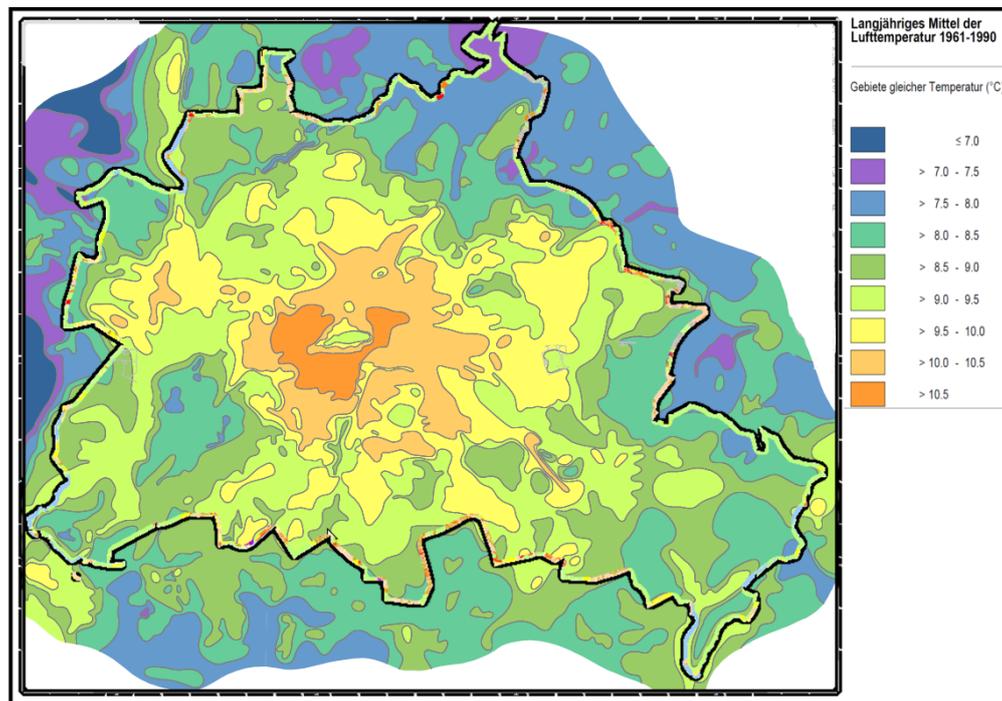


Abbildung 2.3.: Langjährige Mitteltemperatur (1961 - 1990) für Berlin [Umweltatlas, 2001]

Jahren 1981 - 1983 wurden zusätzlich 60 Tages- und Nachtmessfahrten in West-Berlin unternommen. Diese 60 Fahrten wurden auf 24 verschiedenen Routen mit insgesamt 1000 Messpunkten durchgeführt. Außerdem wurden die Daten von weiteren 24 festen Klimastationen eingearbeitet.

Nach der Maueröffnung wurden von Juni 1991 bis Mai 1992 weitere 20 Tages- und 40 Nachtmessfahrten unternommen. Die 500 Messpunkte lagen überwiegend im Osten von Berlin. Um den Stadteffekt möglichst gut messen zu können, wurden zusätzlich 20 Nacht- und 10 Tagesfahrten durchgeführt, bei denen auf vier verschiedenen Routen zwischen Innenstadt und Umland die 2m-Temperatur gemessen wurde. Im Jahr 1991 gab es nur noch 14 Klimastationen in Berlin, deren Daten zusätzlich verwendet wurden.

Ergänzt und überarbeitet wurden diese Messwerte mit Daten, die von September bis November 1999 erfasst wurden. Um den Effekt der nach der Wende gebauten Bauwerke zu messen, wurden 12 Nachtfahrten speziell in diesen Gebieten unternommen. Zusätzlich wurden die Daten von den 12 Messstationen der Technische Universität Berlin (TU) und die Berliner Wetterkarten der Freien Universität Berlin (FU) verwendet.

Um aus diesen vielen verschiedenen Daten langjährige Mittelwerte zu erhalten, wurde zunächst jedem Messpunkt eine repräsentative Klimastation zugeordnet. Anschließend wurden die Differenzen zwischen der Klimastation und dem Messpunkt berechnet. Diese Differenzen wurden auf das langjährige Mittel der Klimastationen addiert. Es wurde davon ausgegangen, dass sich die Temperatur am Messpunkt wie die Temperatur an der Klimastation verhält.

Die langjährige Mitteltemperatur ist in Abbildung 2.3 dargestellt und zeigt, dass es in der Berliner Innenstadt wärmer als im Umland ist. Im Umland werden Werte von ungefähr 7°C gemessen, wohingegen in der Innenstadt Werte von $10,5^{\circ}\text{C}$ erreicht werden. Somit ergibt sich eine Temperaturdifferenz der Mitteltemperatur für den Normalzeitraum von 1961 bis 1990 von $3,5\text{K}$.

Die wärmsten Bereiche in Berlin liegen in Mitte, Schöneberg, Wilmersdorf, Charlottenburg und Moabit. Der dazwischen liegende Tiergarten ist eine Kälteinsel mit im Mittel 1K niedrigeren Temperaturen. Auch der Flughafen Tempelhof fällt durch niedrigeren Temperaturen auf.

Weitere warme Gebiete sind die Potsdamer und Spandauer Innenstädte sowie Schöneweide und Adlershof. Ansonsten nimmt die langjährige Mitteltemperatur umso mehr ab, je weiter man sich von der Innenstadt entfernt.

Besonders kalte Flächen sind die Wälder in Berlin. Sowohl der Tegeler Forst als auch der Grunewald weisen Temperaturen von 8°C auf.

Außerdem wird im Umweltatlas darauf hingewiesen, dass die Zahl der Frosttage von der Mitteltemperatur abhängt. Als Frosttag wird ein Tag definiert, an dem die maximale Temperatur nicht über 0°C steigt. Bei einer Zunahme der langjährigen Mitteltemperatur um $0,5\text{K}$, gibt es ca. zehn Frosttage weniger pro Jahr. Dies bedeutet für Berlin, dass es in der Innenstadt 55 bis 120 Frosttage weniger als im Umland gibt [Umweltatlas, 2001]. Die Messstation Botanischer Garten in Berlin hat im Mittel 80 Frosttage.

Versiegelung und Verdunstung In den Abbildungen 2.4 und 2.5 ist die Versiegelung und die Verdunstung für Berlin dargestellt. Es bestätigt sich, dass die Flächen mit einer höheren Versiegelung eine niedrigere Verdunstung aufweisen und umgekehrt.

2.6 Klimatologie von Berlin

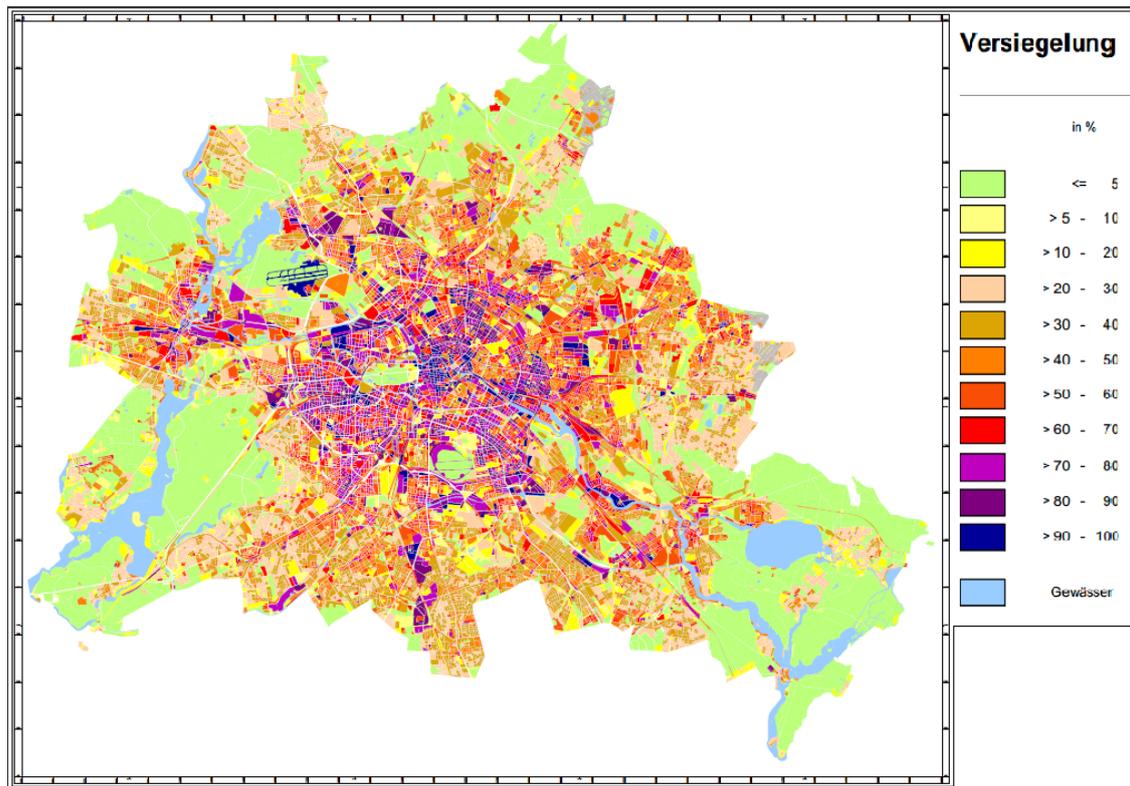


Abbildung 2.4.: Versiegelungsgrad von Berlin aus dem Umweltatlas in % [Umweltatlas, 2012]

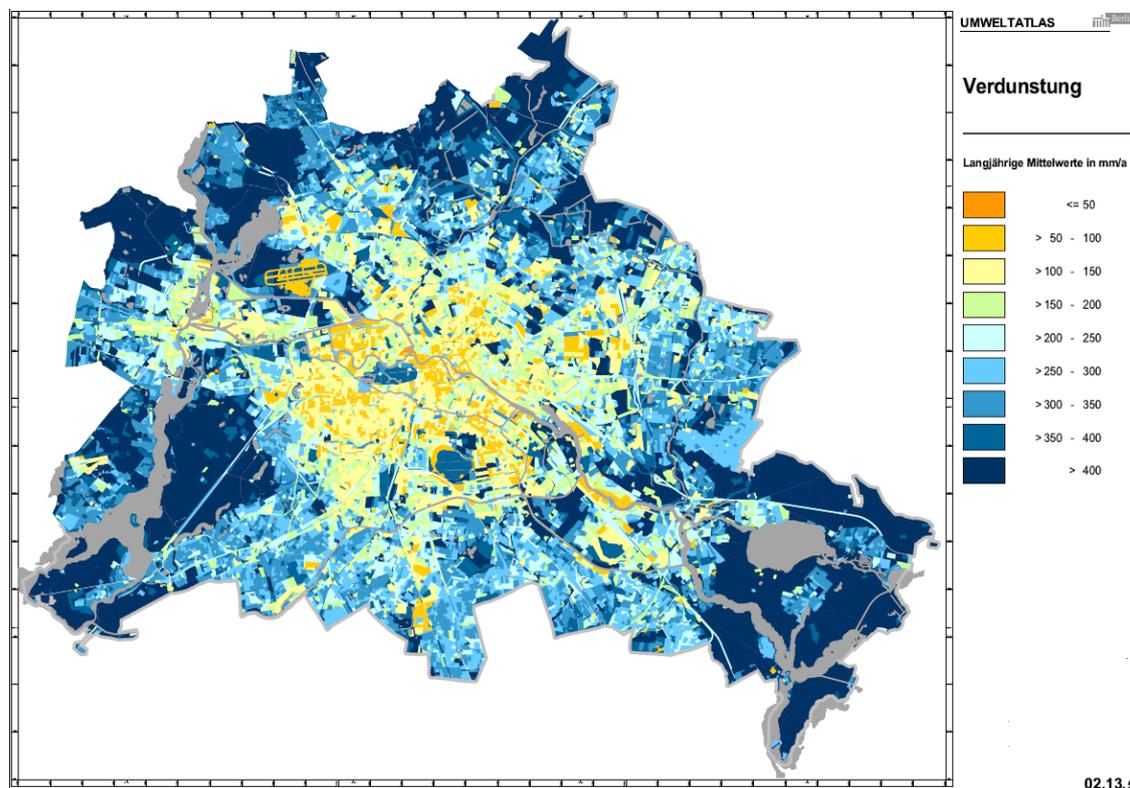


Abbildung 2.5.: Langjährige mittlere Verdunstung in mm/a für Berlin [Umweltatlas, 2007]

Kapitel 3

Messdaten

Nachdem im vorherigen Kapitel das Stadtklima generell und im Speziellen das Klima von Berlin erörtert wurde, soll es in diesem Kapitel um die gemessenen Daten gehen. Im Rahmen des Projektes MILIEU - Centre for Urban Earth System Studies wurden im Jahre 2012 vom Berliner Senat sechs Messkampagnen finanziert. Diese Messkampagnentage waren der 21. April 2012, der 2. Juni 2012, der 4. August 2012, der 18. August 2012, die Nacht vom 20. auf den 21. August 2012 und der 1. September 2012. An diesen Tagen haben bis zu 31 Studenten die Temperatur und die relative Feuchte in 2m und 5cm Höhe durchschnittlich alle 15 Minuten gemessen.

Vergleich der einzelnen Messkampagnen mit Hilfe der festen Messstationen in Berlin. Zum Einen wurden die Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der Firma Meteomedia und zum Anderen die Daten der Freien Universität Berlin (FU), der Technischen Universität Berlin (TU) und der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW) verwendet. Des Weiteren wird das MESoskaligen TRANsport- und Strömungsmodell (METRAS) mit den Daten der 2m-Temperatur validiert. Außerdem wird die simulierte Oberflächentemperatur mit den Satellitendaten von Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) verglichen. Deswegen werden zum Abschluss dieses Kapitels auch die MODIS-Daten beschrieben.

Zunächst sollen die Messgeräte und die einzelnen Institutionen und Messkampagnentage näher erläutert werden. Dazu wurden in Abbildung 3.1 alle festen Messstationen und die gemittelten Routenpunkte eingetragen. Als Route wird die Strecke bezeichnet, die ein Student an einem Messtag zurückgelegt hat. Diese Routen wurden vorher festgelegt, um eine möglichst gute Abdeckung von Berlin zu erhalten. Die einzelnen Messungen wurden als Routenpunkte definiert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde in Abbildung 3.1 über alle Routenpunkte einer Route gemittelt. Die Zuordnung der jeweiligen Punkte erfolgte über Nummern und Farben. Dabei sind alle Routenmittelpunkte in blau eingetragen, die Messstationen des DWD in rot, die der FU in gelb und die der Firma Meteomedia in orange. Außerdem wurde die Messstation der HTW zu den Messstandorten der TU hinzugezählt und in grün dargestellt. In Tabelle 3.1 sind alle Nummern mit Institution und Messstandort bzw. Routengebiet eingetragen.

Verteilung der Messpunkte mit zugeordneten Nummern

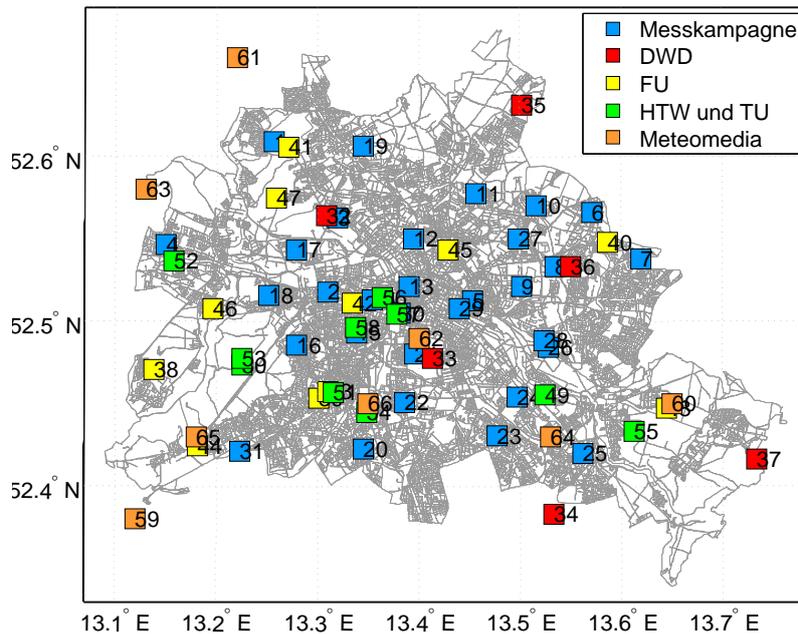


Abbildung 3.1.: Alle Messpunkte vom DWD (rot), FU (gelb), HTW und TU (grün) und Meteomedia (orange). Außerdem sind die gemittelten Routenpunkte der Messkampagnen in blau eingezeichnet.

Routennummer	Institution	Messstandort / Routengebiet
1	Messkampagne	Heiligensee bis Tegeler Forst
2	Messkampagne	Charlottenburger Schloss
3	Messkampagne	Schäfersee bis Lindauer Allee
4	Messkampagne	Falkensee bis Spandau
5	Messkampagne	S-Warschauer Straße bis S-Greifswalderstraße
6	Messkampagne	S-Mehrower Allee bis Ahrensfelde
7	Messkampagne	U-Hönow bis Kaulsdorf
8	Messkampagne	S-Springpfuhl bis Allee der Kosmonauten
9	Messkampagne	U-Samariter Straße bis Friedrichsfelde Ost
10	Messkampagne	S-Wartenberg bis Höhenschönhausen
11	Messkampagne	U-Pankow bis Blankenburger Pflasterweg
12	Messkampagne	U-Bernauer Straße bis Badstraße
13	Messkampagne	Mitte (Brandenburger Tor)
14	Messkampagne	S-Zoologischer Garten bis S-Tiergarten
15	Messkampagne	U-Bülowstraße bis Kleistpark
16	Messkampagne	S-Halensee bis S-Hohenzollerndamm
17	Messkampagne	U-Halemweg bis Saatwinkler Damm
18	Messkampagne	Olympia Station bis Theodor Heuss Platz
19	Messkampagne	Lübars bis Märkisches Viertel
20	Messkampagne	Lichterfelde Süd bis Osdorfer Straße
21	Messkampagne	Kreuzberg (Mehringdamm)

Routennummer	Institution	Messstandort / Routengebiet
22	Messkampagne	Alt-Mariendorf
23	Messkampagne	Blaschkowallee bis Rudow
24	Messkampagne	Schöneweide
25	Messkampagne	S-Grünau bis Adlershof
26	Messkampagne	Rummelsburg bis Biesdorf Süd
27	Messkampagne	Gehrenseestraße bis Orankesee
28	Messkampagne	Busfahrt 1
29	Messkampagne	Busfahrt 2
30	Messkampagne	Potsdamer Platz
31	Messkampagne	Schlachtensee bis Meteorologisches Institut
32	DWD	Tegel Flughafen
33	DWD	Tempelhof Flughafen (ehem.)
34	DWD	Schönefeld Flughafen
35	DWD	Buch
36	DWD	Marzahn
37	DWD	Kaniswall
38	FU	Gatow
39	FU	Botanischer Garten
40	FU	Marzahn
41	FU	Tegel-Forstamt
42	FU	Fasanenstraße
43	FU	FB-Fichtenberg
44	FU	Wannsee
45	FU	Planetarium (Prenzlauer Berg)
46	FU	Pichelsdorf
47	FU	Tegeler See
48	FU	Müggelsee
49	HTW	Schöneweide
50	TU	Jagen91
51	TU	Rothenburgstraße
52	TU	Spandauer Straße
53	TU	Dahlemer Feld
54	TU	Albrechtstraße
55	TU	Köpenick
56	TU	Tiergarten
57	TU	Dessauer Straße
58	TU	Bambergerstraße
59	Meteoedia	Potsdam-RBB
60	Meteoedia	Berlin-Müggelsee
61	Meteoedia	Hennigsdorf-Nord
62	Meteoedia	Berlin-Kreuzberg

3.1 Messgeräte

Routennummer	Institution	Messstandort / Routengebiet
63	Meteoedia	Berlin-Eiskeller
64	Meteoedia	Berlin-Adlershof
65	Meteoedia	Berlin-Wannsee
66	Meteoedia	Berlin-Insulaner

Tabelle 3.1.: Zuordnung der Routennummern zu den jeweiligen Messstandorten

3.1. Messgeräte

Nach der Auflistung der einzelnen Routen und der Standorte der festen Messstationen werden nun die verwendeten Messgeräte beschrieben, um die Güte der Messungen abzuschätzen. Danach werden die Institutionen und die Messkampagnentage genauer beschrieben.

Die Studenten verwendeten für ihre Messungen das BC20 Thermo Hygrometer von Trotec. Es ist ein Handmessgerät, mit dem die Temperatur, die relative Feuchte, die Feuchttemperatur und der Taupunkt gemessen werden können. In Tabelle 3.2 sind die Messbereiche, Auflösungen und Genauigkeiten der einzelnen Messgrößen eingetragen.

Messgröße	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
Temperatur	-30 °C bis +100 °C	+0,1 °C	1K
relative Feuchte	0 bis 100%	0,1%	± 2%
Feuchttemperatur	0 °C bis 80 °C	+0,1 °C	± 1K
Taupunkt	-30 °C bis +100 °C	+0,1 °C	± 1K

Tabelle 3.2.: BC20 Thermo Hygrometer von TROTEC] ¹

¹<http://www.trotec.de/en/product-catalog/measuring-instruments/climate/bc20-thermo-hygrometer/>
Stand 15. August 2013

Neben den mobilen Messgeräten wurden auch eine Vielzahl von festmontierten Messstationen verwendet. So bietet die Firma Thies Wetterstationen mit integrierem Datenlogger, wie zum Beispiel die Wetterstation Thies Datenlogger (TDL)-14 die von der Firma Meteoedia und der HTW verwendet wird. Die Lufttemperatur und relative Feuchte wird von einem Hygro-Thermo-geber gemessen [Schlegel, 2013], dessen Messbereich und Genauigkeit in Tabelle 3.3 eingetragen wurden. Ein möglicher Aufbau der Wetterstation TDL-14 findet sich auf der Internetseite von Meteoedia (<http://wetterstationen.meteoedia.de/map=Mitmachen> Stand 16.08.2012). Auch die FU verwendet zum Teil dieses Hygro-Thermometer.

Messgröße	Messbereich	Genauigkeit
Temperatur	-30 °C bis +70 °C	0,1 °C + 0,005 * t
relative Feuchte	0 bis 100%	± 2%

Tabelle 3.3.: Hygro-Thermometer von THIES ²

²<http://www.thiesclima.com/hygro-thermogeber.html> Stand 15.08.2013

Bei den anderen Stationen wird der Feuchte-Temperatur-Sensor der Firma Lambrecht verwendet. In der Tabelle 3.4 sind die Messbereiche und Genauigkeiten eingetragen.

Messgröße	Messbereich	Genauigkeit
Temperatur	-30 °C bis +70 °C	0,1K
relative Feuchte	5 bis 100%	± 2,5%

Tabelle 3.4.: Feuchte-Temperatur-Sensor von Lambrecht ³

³<http://www.lambrecht.net/index.php?id=68> Stand 22.08.2013

Neben deutschen Unternehmen wie der Firma Thies und der Firma Lambrecht gibt es weltweit noch viele andere Unternehmen für meteorologische Messgeräte. In Amerika ist das Unternehmen Campbell Scientific ansässig. Das Modell Campbell Scientific (CS)215 wird von der Technischen Universität verwendet. In der Tabelle 3.5 sind der Messbereich, die Auflösungen und die Genauigkeiten dieses Messgerätes eingetragen.

Messgröße	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
Temperatur	-40 °C bis +70 °C	0,01 °C	± 0,3 °C
relative Feuchte	0 bis 100%	0,03%	± 2% (10% bis 90%) ± 4% (0% bis 100%)

Tabelle 3.5.: CS215 von Campell Scientific ⁴

⁴<http://www.campbellsci.com/cs215-specifications> Stand 16.08.2013

Außerdem verwendet die Technische Universität Berlin auch drei verschiedene Messgeräte von dem finnischen Unternehmen VAISALA; zum Einen das Messgerät HMP45A, dessen Messbereich und Genauigkeit in der Tabelle 3.6 festgehalten sind; und zum Anderen HMP35A und HMP35D, die sich nur in der Messgenauigkeit der Temperatur vom HMP45A unterscheiden [Vaisala]. Diese ist wie beim CS215 vom Campell Scientific als 1/3 Klasse B angegeben.

Messgröße	Messbereich	Genauigkeit
Temperatur	-39,2 °C bis +60 °C	± 0,2K
relative Feuchte	0,8 bis 100%	± 2% (10% bis 90%) ± 3% (0% bis 100%)

Tabelle 3.6.: HMP45A von VAISALA ⁵

⁵www.hobeco.net/pdf/hmp45ad.pdf Stand 16.08.2013

Das Messgerät HMP45D von VAISALA wird vom Deutschen Wetterdienst zur Messung der relativen Luftfeuchte verwendet. Es hat die gleichen Messbereiche und Genauigkeiten wie die Messgeräte HMP35A und HMP35D. Für die Temperaturmessung wird das PT-100 Widerstandsthermometer der Firma Th. Friedrich eingesetzt.

3.2. Messstationen in Berlin

Deutscher Wetterdienst Die Standorte der eben beschriebenen Messgeräte (Kapitel 3.1) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sind in der Abbildung 3.2 als türkise Dreiecke dargestellt. Aufgezeichnet werden die Daten stündlich in koordinierter Weltzeit (Coordinated Universal Time (UTC)). Am Flughafen Tegel und Tempelhof standen die Messungen halbstündlich zur Verfügung. Außerdem werden die Temperaturen von 2006 bis 2011 vom Flughafen Tempelhof in 2m und 12m Höhe ausgewertet.

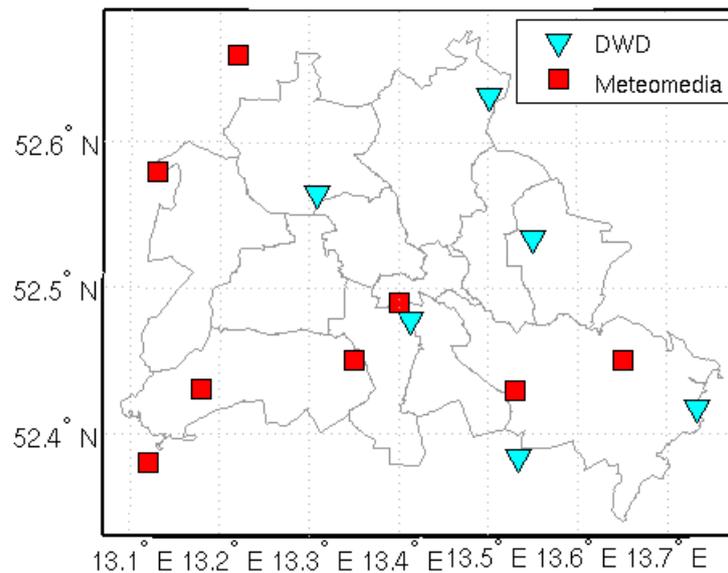


Abbildung 3.2.: Messpunkte vom DWD in türkise und von der Firma Meteomedia in rot

Firma Meteomedia In Abbildung 3.2 wurden neben den Messstationen des Deutschen Wetterdienstes auch die Messstandorte der Firma Meteomedia (<http://wetterstationen.meteomedia.de/>) als rote Vierecke eingezeichnet. Die Aufzeichnung der Daten erfolgt ebenfalls stündlich in der koordinierter Weltzeit (UTC). Bei den Daten fehlt an der Messstation am Müggelsee die relative Feuchte.

Stadtmessnetz der Freien Universität Berlin Im Gegensatz zur Firma Meteomedia und dem Deutschen Wetterdienst werden die Daten des Stadtmessnetzes der Freien Universität Berlin in Mitteleuropäischer Zeit (MEZ) aufgezeichnet. Die Aufzeichnung erfolgt minütlich. Es wurden die Messstationen des Stadtmessnetzes verwendet, die in Abbildung 3.3 in rot dargestellt sind (<http://www.geo.fu-berlin.de/met/service/wetterdaten/>). Das Messgerät von THIES wird am Tegeler See, Pichensee, Wannsee und Planetarium (Prenzlauer Berg) eingesetzt, hierbei sind Tegeler See und Planetarium (Prenzlauer Berg) nicht künstlich belüftet. An den Stationen Tegel Forstamt, Gatow, Fasanenstraße, Fichtenberg, Botanischer Garten, Marzahn und Müggelsee wird das Messgerät der Firma Lambrecht verwendet. Überlicherweise wird die Lufttemperatur in 2m

über Grund gemessen. Im Stadtmessnetz gibt es allerdings zwei Ausnahmen. Die Messstation am Tegeler See ist in 3m Höhe und die am Planetarium (Prenzlauer Berg) 6m angebracht. Am 2. Juni fehlen die Daten von Gatow, da das Messgerät an dem Tag ausgefallen war. Zusätzlich wurden für den Vergleich von 2m- mit 12m-Temperaturen die Werte von 2006 bis 2011 von der mittlerweile eingestellten Station Tempelhof verwendet.

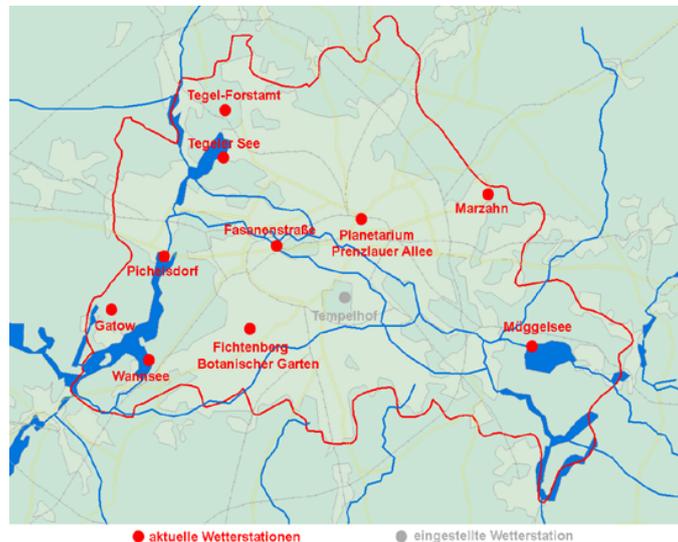


Abbildung 3.3.: Messstandorte vom Stadtmessnetz der FU⁶

⁶<http://www.geo.fu-berlin.de/met/service/wetterdaten/>

Messstation der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW) Wie die Messstation am Planetarium ist auch das Messgerät der HTW nicht in 2m Höhe angebracht, sondern befindet sich 3m über dem Dach der Hochschule in Schöneweide (<http://wetter.htw-berlin.de/index.php>). Die Spree fließt direkt an dem Gebäude, auf dem das Messgerät montiert ist vorbei. Die Daten der Messgeräte werden in Mitteleuropäischer Zeit (MEZ) aufgenommen und in eine Datenbank abgespeichert, die über das Internet aus erreichbar ist. So ist es möglich, die Daten im 1-Min-Takt von der Webseite abzurufen.

Messnetz der Technischen Universität Berlin(TU) Auch die Technische Universität Berlin zeichnet ihre Daten in MEZ auf. Sie liegen für fast alle Stationen in 5 Minuten-Intervallen vor. Ausgenommen ist die Messstation in der Bambergerstraße. Dort wurden die Daten nur alle 60 Minuten gemessen. Die TU besitzt zehn Messstationen. Die Station am Steglitzer Kreisel konnte nicht verwendet werden, da sie sich in 120m Höhe befindet (http://www.klima.tu-berlin.de/index.php?show=forschung_dch_messnetz&lan=de). In Abbildung 3.4 sind alle Messstationen der Technischen Universität dargestellt. In der Tabelle 3.7 ist eingetragen, wo sich die Messstationen befinden, welchen Untergrund die Messstationen haben und welche Parameter sie messen.

Fehlende Werte Die Daten von August und September fehlen von Dahlemer Feld, Tiergarten und Dessauer Straße. Im Tiergarten fehlen zusätzlich noch die Daten vom Juni und in der Dessauer Straße die Daten vom April. In der Albrechtstraße fehlen die Daten vom April und September.

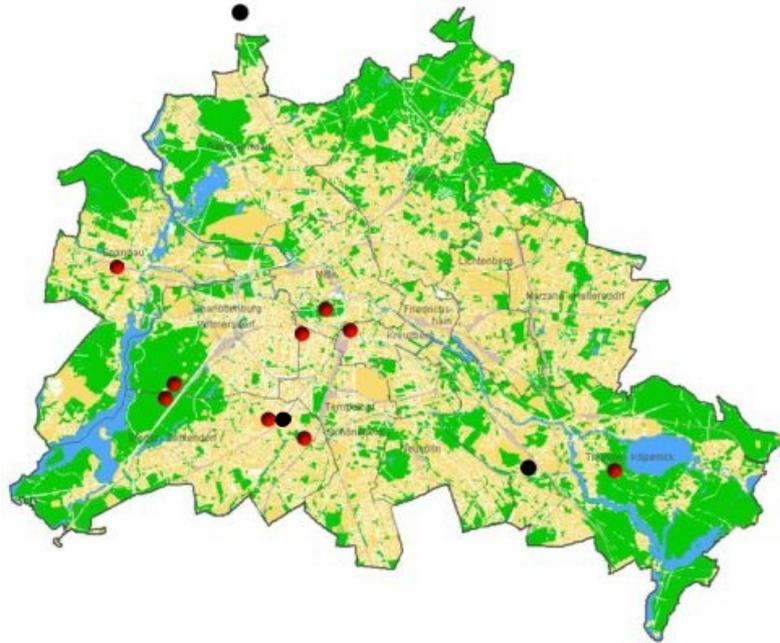


Abbildung 3.4.: Messstandorte von der Technischen Universität Berlin⁷

⁷http://www.klima.tu-berlin.de/index.php?show=forschung_dch_mesnetz&lan=de

Ort	Lat.	Lon.	Untergrund	Messdaten
Rothenburgstraße	52.46 N	13.32 E	gemähte Wiese	2m-Temp., 2m-rel. Luftfeuchte,
Spandauer Straße	52.54 N	13.16 E	Rasen	2m-Temp., 2m-rel. Luftfeuchte
Dahlemer Feld	52.48 N	13.23 E	Magerrasen, sandige Böden	2m-Temp., 2m-rel. Luftfeuchte
Jagen	52.473 N	13.225 E	Moos, Laub	2m-Temp., 2m-rel. Luftfeuchte,
Albrechtstraße	52.44 N	13.35 E	Rasen	2m-Temp., 2m-rel. Luftfeuchte
Bambergerstraße	52.50 N	13.34 E	Rasen	2,5m-Temp., 2,5m-rel. Luftfeuchte
Tiergarten	52.51 N	13.36 E	Erde, Wiese, Granitplatten	2m-Temp., 2m-rel. Luftfeuchte
Dessauer Straße	52.50 N	13.38 E	Betonstein	3,5m-Temp., 3,5m-rel. Luftfeuchte
Köpenik	52.43 N	13.53 E	Moos, Laub	2m-Temp., 2m-rel. Luftfeuchte

Tabelle 3.7.: Messstationen der Technischen Universität Berlin

3.3. Messkampagne und Wetterlage

Neben den festen Messstationen werden in dieser Arbeit auch die Ergebnisse der Messkampagne der Freien Universität Berlin ausgewertet. Im Rahmen des Projektes Milieu (<http://www.milieu.fu-berlin.de/>) wurden sechs Messrunden gestartet. An den einzelnen Messtagen (21. April 2012, 2. Juni 2012, 4. August 2012, 18. August 2012, 20./21. August 2012 und 1. September 2012) sind Studenten auf vorher festgelegten Routen durch Berlin gelaufen. Sie haben ihre Messungen ungefähr alle 15 Minuten in MESZ aufgeschrieben. Da nicht an jedem Messkampagnentag alle Routen gelaufen wurden, werden die sechs Messtage einzeln betrachtet. In Tabelle 3.8 wurde eingetragen, an welchem Tag welche Routen gelaufen wurden. Dabei steht ein X für gelaufene Route und ein / für nicht gelaufen. Die Nachtmessung vom 20. auf den 21. August 2012 wird separat betrachtet, da bei der Nachtmessung zu unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedliche Routen gelaufen wurden.

Messtag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
21.04.12	X	X	X	X	/	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
02.06.12	X	X	X	/	X	X	/	/	X	X	/	/	X	/	X	
04.08.12	X	/	X	X	X	/	/	X	/	/	/	/	X	X	X	
18.08.12	/	/	X	X	/	/	/	/	/	/	/	X	X	X	/	
01.09.12	X	X	X	X	/	/	/	X	/	X	/	/	X	X	X	
Messtag	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
21.04.12	X	X	X	X	X	X	/	X	X	X	X	X	X	X	X	X
02.06.12	X	/	/	/	X	X	X	X	X	/	/	X	/	/	/	/
04.08.12	X	/	X	X	/	X	X	/	/	/	/	x	/	/	/	/
18.08.12	X	/	X	/	X	X	X	/	/	X	X	X	/	X	X	/
01.09.12	X	X	X	X	X	X	/	/	X	/	/	X	/	/	X	/

Tabelle 3.8.: Übersicht der Messrouten pro Messtag

Zusätzlich zu den Messrouten wird noch die Wetterlage an den Messtagen beschrieben. Diese wurde mit Hilfe der [Berliner Wetterkarte], des Witterungsreportes vom Deutschen Wetterdienst ([WitterungsReport Express]) und dem Katalog der Großwetterlagen Europas nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky bestimmt [Gerstengarbe und Werner, 1999]. Aufgrund der längerfristigen Planung der einzelnen Messkampagnentage, konnte nicht immer bei sonnigem, windstillem Wetter gemessen werden. Im Anschluss wird noch auf die Probleme und die Bearbeitung der Daten eingegangen. Außerdem wird noch auf die Auswahl der Tage zur Validierung von METRAS eingegangen.

3.3.1. 1. Messtag am 21. April 2012

Bei der Festlegung der Routen wurde darauf geachtet, Berlin möglichst gut abzudecken. In Abbildung 3.5 wurden alle Messpunkte eingezeichnet, an denen am 21. April 2012 Messungen gemacht wurden. Insgesamt waren 29 Studenten unterwegs. Zwischen 9 und 16 Uhr (MESZ) haben sie alle 10 Minuten gemessen.

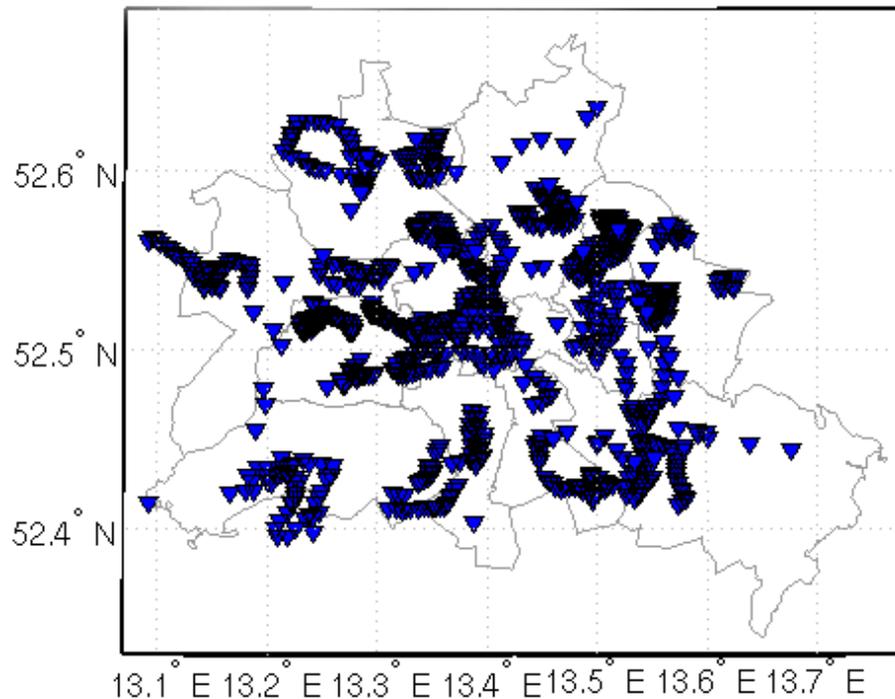


Abbildung 3.5.: Alle Messpunkte am 21. April 2012

Die Wetterlage am 21. April 2012 wurde durch ein Tiefdruckgebiet über Großbritannien (TB) beherrscht. Dies bedeutet, dass die Temperaturwerte über den klimatologischen Mittelwerten liegen und es auch mehr regnet [Gerstengarbe und Werner, 1999]. Laut [Berliner Wetterkarte] stieg die Temperatur an diesem Tag in Berlin auf 18 °C. Die Tiefsttemperatur lag bei 5 °C. Beeinflusst wurde das Wetter laut [WitterungsReport Express] durch subpolare Meeresluft. Dies bedeutete typisches Aprilwetter mit abwechselnd Sonne und Schauern. In Berlin herrschte schwacher Wind und es war bis 13 Uhr (MESZ) überwiegend sonnig. Danach nahm die Bewölkung zu und am Nachmittag wurden mehrere kurze Schauer über Berlin beobachtet. In den Abbildungen 3.6 wurden die Radarbilder vom DWD dargestellt. Es zeigt wie ein Schauer zwischen 14:40 und 15:30 Uhr (MESZ) Berlin von Südwest nach Nordost überquert. Zusätzlich ist zu sehen, dass die Schauerintensität gering war und das Schauerereignis sich über Berlin aufgelöst hat.

Dargestellt ist in Abbildung 3.7a der Temperaturverlauf und in Abbildung 3.7b der Verlauf der relativen Feuchte am 21. April 2012. Die schwarze Linie zeigt dabei den Mittelwert an. Die maximal gemessenen Werte je Uhrzeit wurden rot und die minimalen Messwerte blau dargestellt. Der



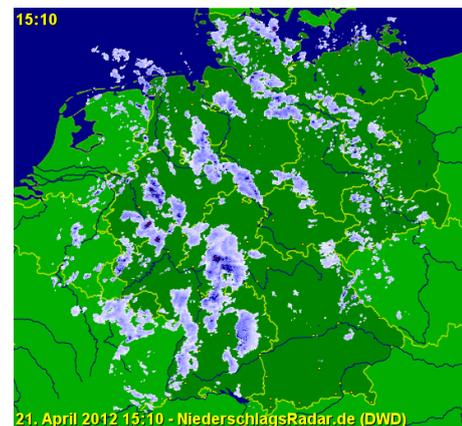
(a) 14:40 Uhr



(b) 14:50 Uhr



(c) 15:00 Uhr



(d) 15:10 Uhr



(e) 15:20 Uhr



(f) 15:30 Uhr

Abbildung 3.6.: Niederschlagsradar vom DWD vom 21. April 2012 von Deutschland von a) 14:40 Uhr, b) 14:50 Uhr, c) 15:00 Uhr, d) 15:10 Uhr, e) 15:20 Uhr und f) 15:30 Uhr (MESZ)

8

⁸<http://www.niederschlagsradar.de/hist.aspx> Stand 2.12.2012

3.3 Messkampagne und Wetterlage

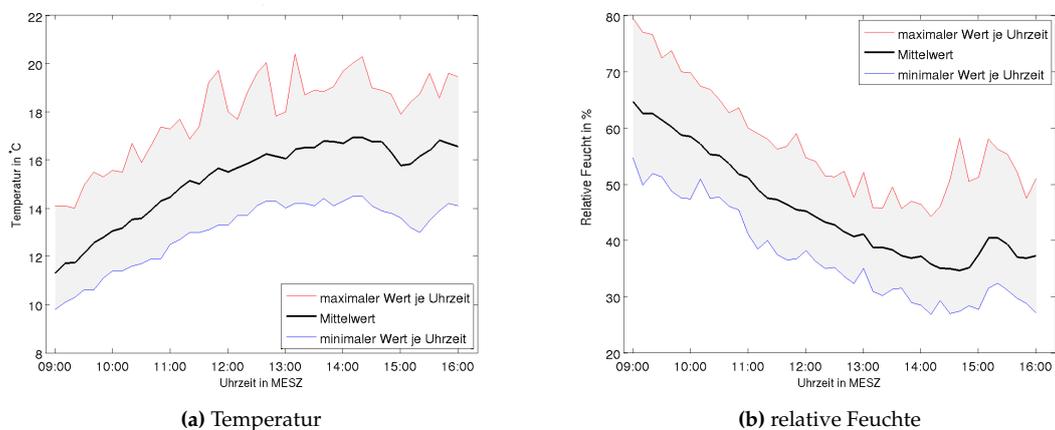


Abbildung 3.7.: Verlauf der a) Temperatur und b) relativen Feuchte von allen Routen am 21. April 2012. Schwarz ist der Mittelwert, rot sind die maximal und blau die minimal gemessenen Werte abgebildet.

Datensatz beinhaltet sowohl die Messkampagne als auch die festen Messstationen. Die Beschreibung gilt auch für die folgenden Graphen der anderen Messkampagnentage. Die Abbildung 3.7a zeigt das sonnige Wetter am Vormittag mit konstanten Temperaturanstieg. Am Nachmittag wurde zwischen 14:30 und 15:30 Uhr (MESZ) örtlich Niederschlag gemessen, der sich in Abbildung 3.7a durch eine Temperaturabnahme widerspiegelt. Das gleiche Bild zeigt sich bei der relativen Feuchte in Abbildung 3.7b. Zunächst nimmt die relative Feuchte konstant ab und am Nachmittag gibt es durch den Schauer bedingt eine Zunahme der relativen Feuchte.

3.3.2. 2. Messtag am 2. Juni 2012

Die zweite Messrunde fand am 02.06.2012 statt. Wie bei der ersten und auch bei den folgenden Messrunden waren die Studenten von 9 bis 16 Uhr (MESZ) unterwegs. Ab diesem Messtag wurde alle 15 Minuten gemessen, um mehr Zeit für die einzelnen Messungen zu haben. Die Messpunkte vom zweiten Messtag sind in Abbildung 3.8 dargestellt. Es wurden 17 Messrouten gelaufen.

Am 2. Juni 2012 wurde die Wetterlage durch ein Hochdruckgebiet (Hoch Nordmeer, zyklonal (HNz)) beherrscht. Laut [WitterungsReport Express] erstreckte sich das Hochdruckgebiet von der Ostseeküste Grönlands bis hin zum nördlichen Nordmeer. Ein tiefer Druck lag über der Ostsee, so dass auch das Wetter in Berlin zyklonal bestimmt war. Dies bedeutet für den Sommer, dass es kälter als im klimatologischen Mittel ist [Gerstengarbe und Werner, 1999]. Dies zeigte sich auch bei der Höchsttemperatur für Berlin. Laut [Berliner Wetterkarte] wurde maximal nur 15°C gemessen. Die Minimaltemperatur lag bei 7°C. Es gab in Dahlem nicht messbaren Niederschlag und die Sonne hat 8 Stunden geschienen. Der Wind war mäßig. Im Radarbild (Abb. 3.9) zeigt sich allerdings, dass es um Berlin herum viele Schauerereignisse gegeben hat.

In den in dieser Arbeit verwendeten Daten zeigt sich auch, dass es ein kalter Sommertag mit einer

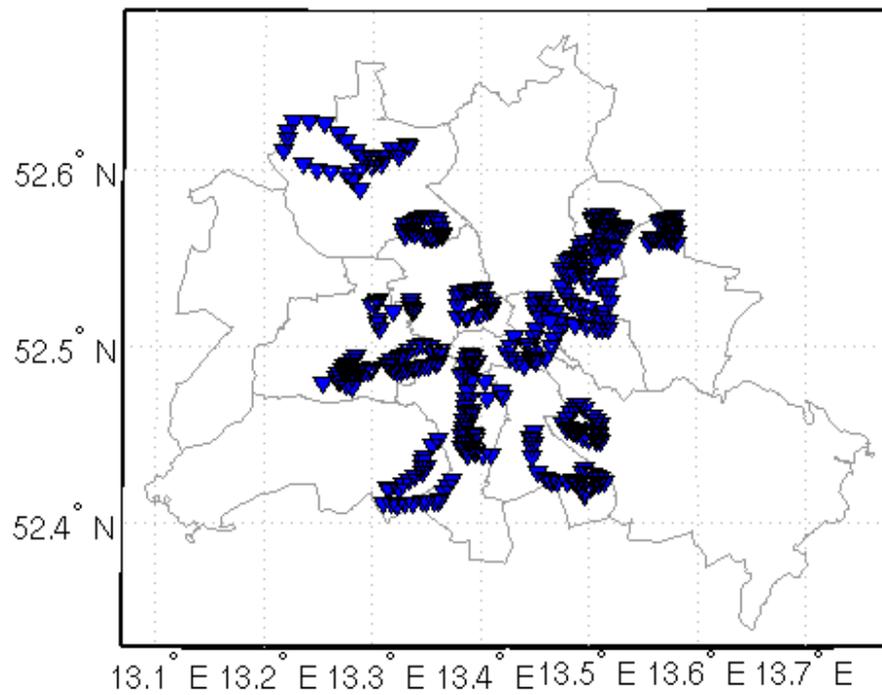


Abbildung 3.8.: Alle Messpunkte der Messkampagne am 2. Juni 2012

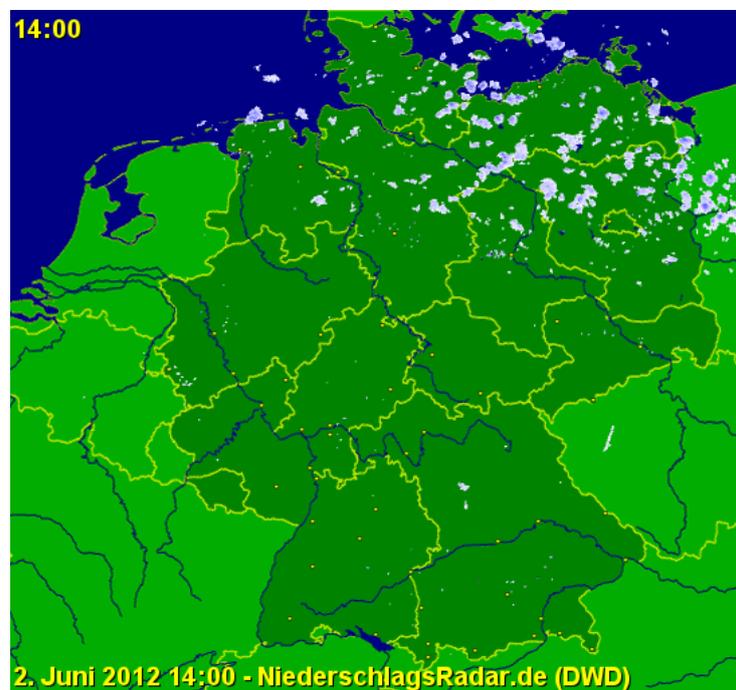


Abbildung 3.9.: Niederschlagsradar vom DWD vom 2. Juni 2012 von Deutschland von 14:00 Uhr (MESZ)⁹

⁹<http://www.niederschlagsradar.de/hist.aspx> Stand 2.12.2012

3.3 Messkampagne und Wetterlage

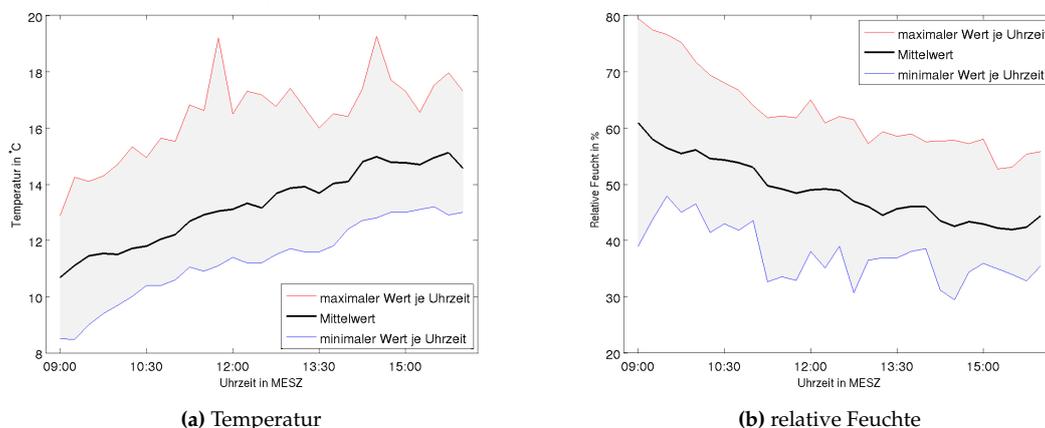


Abbildung 3.10.: Verlauf der a) Temperatur und b) relativen Feuchte von allen Routen am 2. Juni 2012. In schwarz ist der Mittelwert, in rot sind die maximal in blau die minimal gemessenen Werte abgebildet.

höchsten Mitteltemperatur von 15°C war (Abb. 3.10a, Beschreibung 3.3.1). Es wurden allerdings auch Temperaturspitzen von über 19°C gemessen. Die relative Feuchte (Abb. 3.10b, Beschreibung 3.3.1) nahm auch, wie bei trockenen Tagen üblich ist, im Tagesverlauf solange ab, wie die Temperatur zunahm.

3.3.3. 3. Messtag am 4. August 2012

Wie beim 2. Messtag wurde am 4. August von 9 bis 16 Uhr (MESZ) alle 15 Minuten gemessen. In Abbildung 3.11 wurden alle Messpunkte der Messkampagne vom dritten Messtag eingetragen. Es wurden 14 Messrouten gelaufen.

Am 4. August 2012 wurde die Großwetterlage von Europa durch eine zyklonale Südwestlage SWz bestimmt. Laut Katalog der Großwetterlagen [Gerstengarbe und Werner, 1999] bedeutet dies, dass es in Deutschland wärmer als im Mittel ist und dass es zu starken Niederschlägen kommen kann. Die wärmeren Temperaturen in Berlin, wurden dadurch verursacht, dass warme Luft an der Trogvorderseite nach Mitteleuropa transportiert wurde. In Berlin stieg die Temperatur laut [Berliner Wetterkarte] deswegen auch auf 26°C . Die Tiefsttemperatur am 4. August 2012 betrug 15°C . Der Wind war schwach und am Vormittag schien die Sonne. Um 12 Uhr MEZ wurde bereits an der Station in Dahlem Wetterleuchten registriert. Dies bedeutet, dass es in der Ferne gewittert hat. Am Nachmittag folgten gewittrig verstärkte Schauer. In Abbildung 3.12 wurde das Radarbild vom DWD vom 4. August 2012 um 14 Uhr MESZ dargestellt. Anhand der dunkelblauen Farbe des Niederschlagsereignisses über Berlin liegt, zeigt sich, dass der Schauer eine hohe Intensität hatte. Außerdem fällt auf, dass sich das Schauergebiet nur über den Nordwesten von Berlin erstreckt.

Die Abbildung 3.13a (Beschreibung siehe 3.3.1) zeigt den Temperaturverlauf am 4. August 2012. Beim Mittelwert (schwarze Linie) zeigt sich eine Temperaturzunahme am Vormittag. Dies ist auf

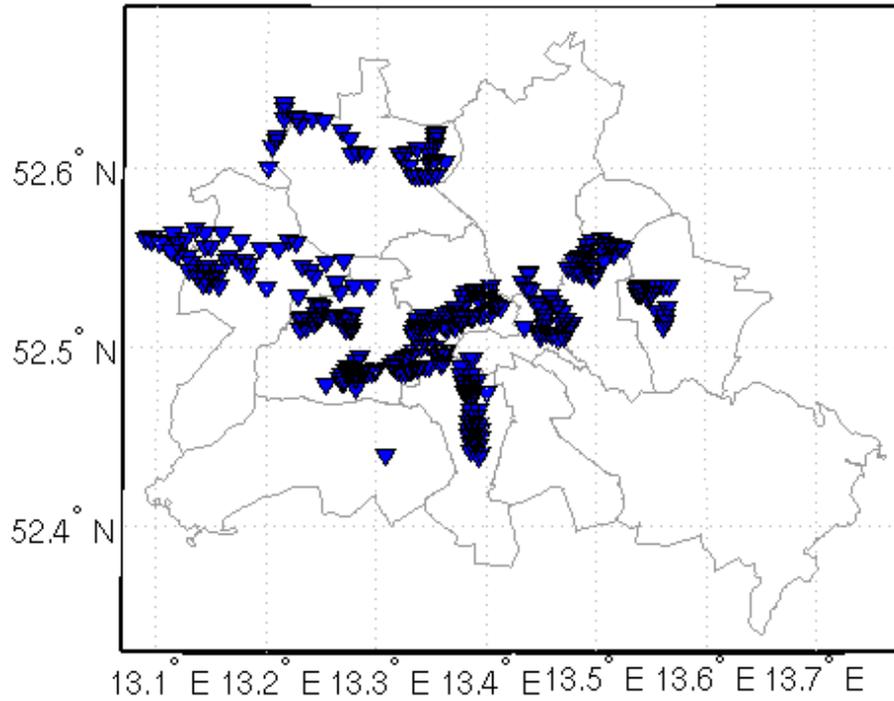


Abbildung 3.11.: Alle Messpunkte der Messkampagne am 4. August 2012



Abbildung 3.12.: Niederschlagsradar vom DWD vom 2. Juni 2012 von Deutschland von 14:00 Uhr (MESZ).¹⁰

¹⁰<http://www.niederschlagsradar.de/hist.aspx> Stand 2.12.2012

3.3 Messkampagne und Wetterlage

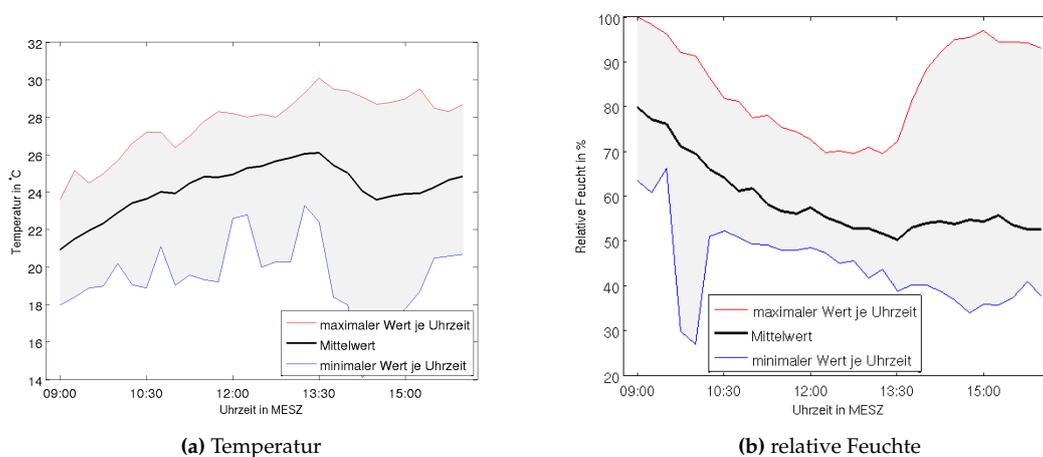


Abbildung 3.13.: Verlauf der a) Temperatur und b) relativen Feuchte von allen Routen am 4. August 2012. Schwarz ist der Mittelwert, rot sind die maximal und blau die minimal gemessenen Werte abgebildet.

die solare Einstrahlung am Vormittag zurückzuführen. Am Nachmittag kühlte die Luft aufgrund des Niederschlages merklich ab. Der schauerartige Charakter der Niederschläge zeigt sich an den Spitzen in den Minimumtemperaturen. Bei der relativen Feuchte (Abb. 3.13b Beschreibung 3.3.1) zeigt sich typischerweise ein gegenläufiges Bild. Durch die Erwärmung am Vormittag nimmt die relative Feuchte ab und aufgrund des Schauers nimmt die relative Feuchte wieder bis über 90% zu. Daran, dass der Mittelwert kaum zunimmt, zeigt sich, dass das Regengebiet nicht über ganz Berlin lag.

3.3.4. 4. Messtag am 18. August 2012

Die Messungen erfolgten wie an den beiden vorherigen Terminen alle 15 Minuten von 9 bis 16 Uhr (MESZ). Es wurde auf 15 Messrouten gemessen. In Abbildung 3.14 wurden alle Messpunkte der Messkampagne vom vierten Messtag eingetragen.

Auch am 18. August 2012 wurde die Großwetterlage durch ein Hochdruckgebiet beeinflusst. Das Hochdruckgebiet "Achim" lag dieses Mal über Mitteleuropa, so dass es den ganzen Tag über sonnig war und die Temperatur auf 27 °C anstieg ([Berliner Wetterkarte]). Der Wind wehte schwach und für so eine Wetterlage typisch wurde kein Niederschlag registriert. Am Häufigsten kommt diese Wetterlage im September vor [Gerstengarbe und Werner, 1999]. In den Abbildungen 3.15a und 3.15b (Beschreibung siehe 3.3.1) zeigt sich das typische Bild eines sommerlichen Tages. Die Temperatur nimmt im Tagesverlauf immer weiter zu und die relative Feuchte ab.

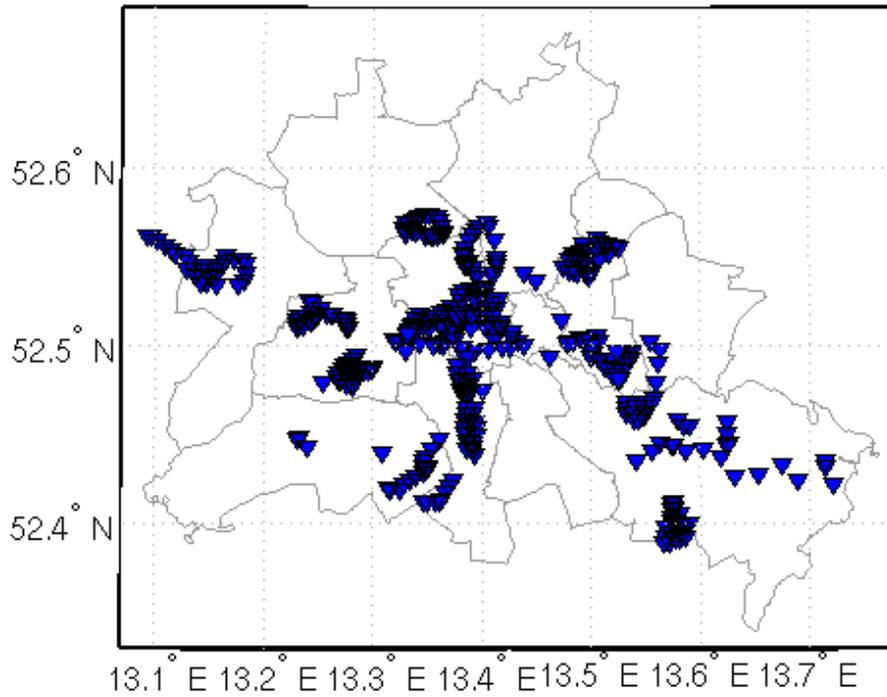


Abbildung 3.14.: Alle Messpunkte der Messkampagne am 18. August 2012

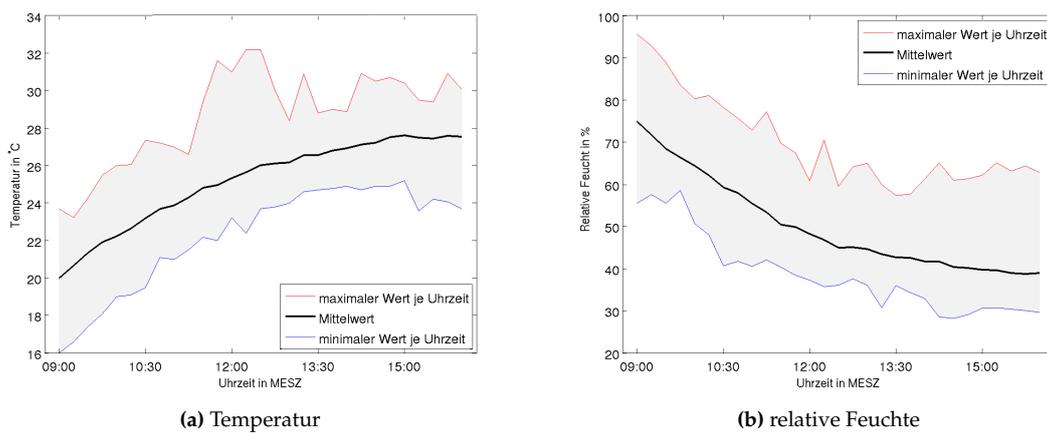


Abbildung 3.15.: Verlauf der a) Temperatur und b) relativen Feuchte von allen Routen am 18. August 2012. Schwarz ist der Mittelwert, in rot sind die maximal und in blau die minimal gemessenen Werte abgebildet.

3.3.5. 5. Messtag am 20./21. August 2012 (Nachtmessung)

Wie bereits erwähnt, stellt die Nachtmessung eine Ausnahme dar. Insgesamt gab es 36 Messblöcke mit jeweils 4-stündigen Messungen. Die Messpunkte wurden in die Abbildung 3.16 eingetragen. Da der Tiergarten eine Kältequelle in der Nacht darstellt, wurden die Messungen hier besonders stark fokussiert.

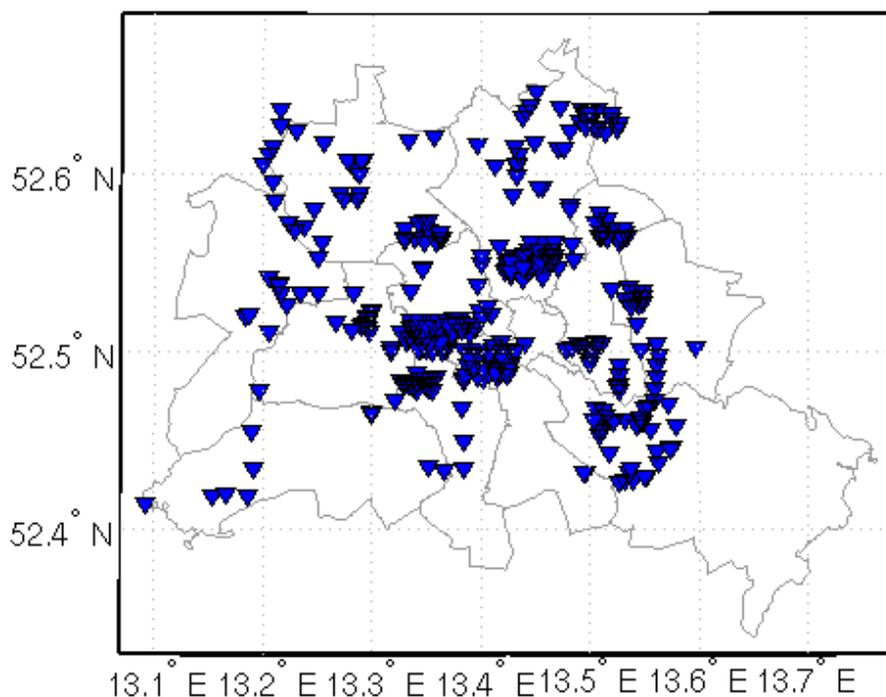


Abbildung 3.16.: Alle Messpunkte der Messkampagne von 16 Uhr MESZ am 20. August bis 16 Uhr MESZ am 21. August 2012

Das Hochdruckgebiet über Mitteleuropa vom 18. August 2012 zog am 19. August langsam nach Osten. Die Großwetterlage über Europa wurde am 20. und 21. August durch eine zyklonale Westlage (Wz) bestimmt. Es herrschte immer noch hochsommerliches Wetter mit Temperaturen von 34 °C am 20. und von 26 °C am 21. August ([Berliner Wetterkarte]). In der Nacht kühlte es sich auf 17 °C ab. Dabei gab es immer wieder kurze Schauer. Der Wind wehte schwach und die Sonne schien 7 bis 8 Stunden. Damit war die Wetterlage geeignet, um eine städtische Wärmeinsel messen zu können.

Bei der Nachtmessung wurde von einem Teil der Studenten alle 10 Minuten und von den anderen alle 15 Minuten gemessen, so dass bei der Auswertung ein 5-Minuten Intervall angenommen wurde. Der Messzeitraum war von 16 Uhr (MESZ) am 20. bis 16 Uhr (MESZ) am 21. August. Im Schnitt gab es in Berlin vier Messungen gleichzeitig pro Stunde. Aufgrund der zum Teil wenigen Messungen ergaben sich starke Schwankungen besonders bei den Maximal- und Minimalwerten. Deswegen wurde in Abbildung 3.17 das 5-minütige gleitende Mittel gebildet. Beim mittleren Temperaturverlauf (Abb. 3.17) stellt sich die erwartete Temperaturabnahme in der Nacht

und die darauffolgende Temperaturzunahme nach Sonnenaufgang ein. Geringe Temperatureinbrüche gegen Mitternacht und um 11 Uhr (MESZ) Vormittag zeigen die Schaueraktivität.

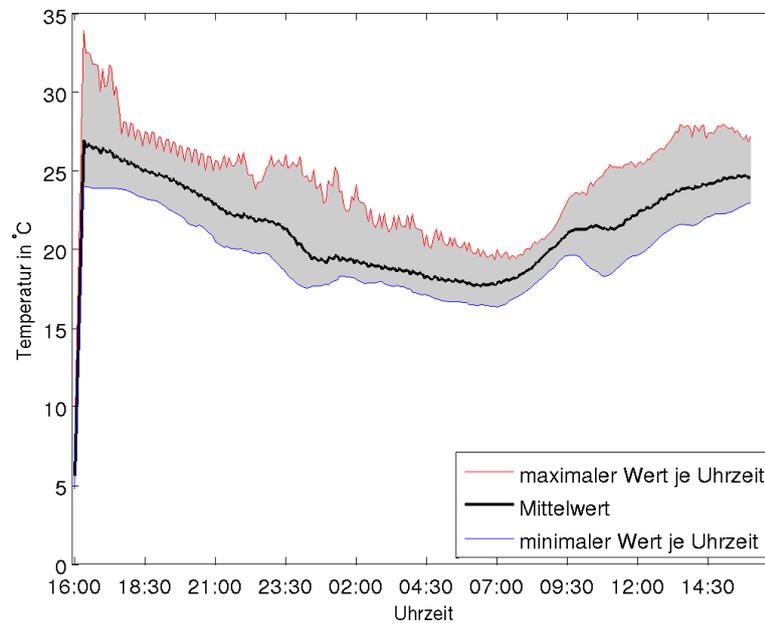


Abbildung 3.17.: Verlauf der gefilterten Temperatur aller Routen am 20. August 2012 16 Uhr (MESZ) bis am 21. August 2012 16 Uhr (MESZ). In schwarz ist die Mitteltemperatur, in rot sind die maximal gemessenen Werte und in blau die minimal Temperatur abgebildet. Aufgrund der wenigen Daten pro Uhrzeit wurde ein 5-minütiges gleitendes Mittel gebildet.

3.3.6. 6. Messtag am 1. September 2012

Auch am letzten Messtag wurde alle 15 Minuten von 9 bis 16 Uhr (MESZ) gemessen. In Abbildung 3.18 wurden alle Messpunkte der Messkampagne vom sechsten Messtag eingetragen. Es wurden 18 Messrouten gelaufen.

Am 1. September entwickelte sich eine Hochdruckbrücke über Mitteleuropa (BM). Sie erstreckte sich vom Azorenhoch bis zu einem Hochdruckgebiet über Ost- und Nordosteuropa. Obwohl es bei dieser Wetterlage üblicherweise wärmer als im Mittel ist [Gerstengarbe und Werner, 1999], stieg die Temperatur laut [Berliner Wetterkarte] nur auf 19 °C. Dies lag daran, dass am Vortag eine Kaltfront Deutschland überquerte und kühle Meeresluft einfluss. Für diese Wetterlage typisch gab es keinen Niederschlag und die Sonne schien 10 Stunden lang. Der Wind wehte schwach. Die Minimumtemperatur lag bei 7 °C.

Der Temperatur- und der relative Feuchteverlauf waren typisch für die Bedingungen einer Hochdruckbrücke. Wie in den Abbildungen 3.19a und 3.19b (Beschreibung 3.3.1) zu sehen, stieg die Temperatur im Tagesverlauf an und die relative Feuchte nahm ab.

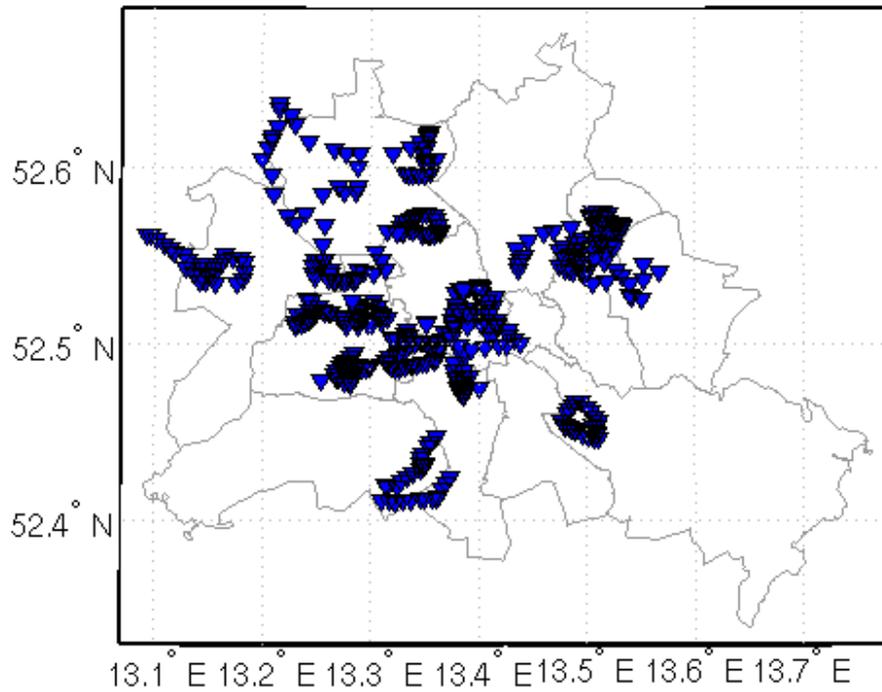


Abbildung 3.18.: Alle Messpunkte der Messkampagne am 1. September 2012

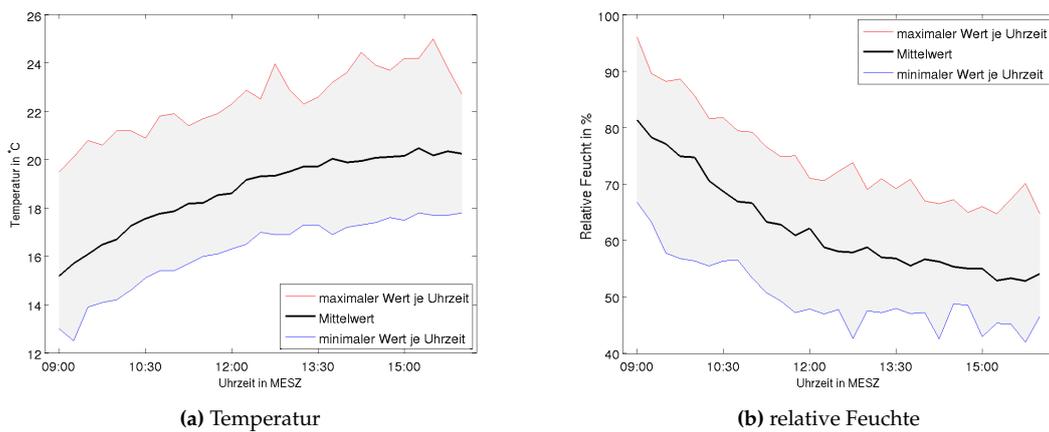


Abbildung 3.19.: Verlauf der a) Temperatur und b) der relativen Feuchte von allen Routen am 1. September 2012. Schwarz ist der Mittelwert, in rot sind die maximal und in blau die minimal gemessenen Werte abgebildet.

3.3.7. Weitere Bearbeitung der Messkampagne und Auswahl der Tage

Nachdem die einzelnen Messkampagnentage beschrieben wurden, wird nun auf die Messvorschriften eingegangen. Außerdem wird erwähnt welche Probleme es bei den Messungen gab und wie die Daten deswegen bearbeitet wurden. Anschließend wird auf die Auswahl der Tage für die Validierung eingegangen und danach MODIS beschrieben.

Messvorschriften Bei der Einweisung wurden die Studenten darauf hingewiesen, die Temperatur im Schatten zu messen. Außerdem mussten sie die Temperatur in 5cm und in 2m Höhe messen. Jochen Werner stellt in Abbildung 3.20 exemplarisch die Messung in 2m Höhe dar. Zusätzlich wurde ihnen ein Plan von der Route mitgegeben, die sie ablaufen sollten.



Abbildung 3.20.: Student beim Messen

Probleme bei den Messungen Als Unsicherheit bei den studentischen Messungen zählt die subjektive Einschätzung von 2m und 5cm-Höhe. Im Weiteren mussten beide Werte aufgezeichnet werden, so dass sich keine genaue Punktmessung war, sondern zwei leicht zeitversetzte. Das Messgerät hatte zur zweiten Messung nur wenig Zeit um sich akklimatisieren.

Es musste sowohl die Temperatur als auch die relative Feuchte aufgezeichnet werden. Die erfassten Werte sind kurzfristige Momentaufnahmen, da die gemessenen Temperaturen und die Feuchte Schwankungen unterliegen.

Auch die geographischen Koordinaten waren ungenau. Zum Teil verwendeten die Studenten ihre Mobilfunkgeräte, um mit einer App die GPS-Koordinaten zu ermitteln. Andere wiederum machten auf der Karte Markierungen. Jedoch gab es auch Studenten, die nur aufschrieben, in welcher Straße oder an welcher Straßenecke sie sich gerade befanden. Aufgrund der Auflösung des mesoskaligen Modells ist die Genauigkeit der Koordinaten im Rahmen dieser Arbeit nicht besonders relevant. Allerdings zeigt die Arbeit von [Shashua-Bar und Hoffman, 1999], dass bereits geringe Entfernungen von 20 Meter große Auswirkungen auf die Temperatur haben. Dies muss bei höher aufgelösten Modellen berücksichtigt werden.

Viele Werte fehlen aufgrund von Regen, fehlendem Schatten und anderen Hindernissen, wodurch die Studenten an der Messung gehindert wurden. Durch Wind und Messungen in der

3.4 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

Sonne wurden die Messwerte zum Teil sehr stark verfälscht. Besonders Messungen in der direkten Sonne haben einen negativen Einfluss auf die Messgenauigkeit der Messgeräte.

Die Aufzeichnung der Beschaffenheit des Untergrundes fehlte auch sehr oft.

Bearbeitung der Messkampagnendaten Messungen unter direkter Sonneneinstrahlung und nicht konsistente Ausreißer wurden dabei aussortiert. Bei Messungen der Feuchttemperatur wurden die Messwerte mit Hilfe der Psychrometertabelle überarbeitet. Fehlende Koordinaten wurden mit Hilfe von Google-Earth ergänzt.

Auswahl der Tage für die Validierung von METRAS Zur Validierung von METRAS werden die Tage verwendet, an denen von den Studenten kein Niederschlag in Berlin aufgezeichnet worden ist. Somit werden nur die Tage 2. Juni 2012, 18. August 2012 und 1. September 2012 analysiert. Grund dafür ist, dass Schauergebiete im Modell nicht zur exakten Zeit und am exakten Ort simuliert werden können. Somit würden die Schauer im Modell die Stadt anders kühlen als in Realität, wodurch die Differenzen vergrößert werden würden. Der 2. Juni 2012 wurde gewählt, obwohl es im Umkreis von Berlin Schauer gegeben hat, um zu zeigen, dass Niederschlag im Modell problematisch ist.

3.4. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

Zusätzlich wurden neben den Messwerten von den Messkampagnen der Freien Universität Berlin und von den festen Messstationen in Berlin noch die Daten von MODIS verwendet, um die simulierten Oberflächentemperaturen von METRAS mit den gemessenen Oberflächentemperaturen von MODIS zu vergleichen. MODIS ist ein Instrument, das auf den Satelliten Terra und Aqua montiert ist. Terra und Aqua liegen auf einem Orbit von 705km und scannen deswegen die gesamte Erde in ein bis zwei Tagen ab. Sie sind so eingestellt, dass Terra den Äquator jeden Morgen um 10:30 UTC überquert, wohingegen Aqua den Äquator immer nachmittags um 13:30 UTC kreuzt. Deswegen gibt es von Berlin jeden Tag zwei Bilder.

Der Satellit Terra wurde am 18. Dezember 1999 gestartet und der Satellit Aqua folgte 2 Jahre später am 4. Mai 2002. Ursprünglich wurden sie für eine Lebensdauer von 6 Jahren gebaut. Das Instrument MODIS wurde entwickelt, um die Atmosphäre, das Land und den Ozean zu untersuchen. Es misst 36 Wellenlängenbänder zwischen 0.4 und 14.4 μm . Die Auflösung ist von der Wellenlänge abhängig und liegt zwischen 250m und 1km. Die NASA stellt auf ihrer Webseite (<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>) sowohl die direkten als auch weiterverarbeitete Daten von MODIS bereit. Die weiterverarbeiteten Daten werden Level2-Produkte genannt. In dieser Arbeit wurden die Oberflächentemperaturen verwendet, diese stehen als Level2-Produkte in einer Auflösung von 1km zur Verfügung. Da es am Vormittag bewölkt war, können nur die Daten vom Nachmittag ausgewertet werden.

Kapitel 4

Statistische Auswertungsverfahren

Die im vorherigen Kapitel beschriebenen Daten werden mit verschiedenen Verfahren ausgewertet.

Zum Einen wird die Verteilung der Daten mit Boxplots dargestellt. Bei einer Boxplotdarstellung können der Median, das obere und untere Quartil sowie die Extremwerte abgelesen werden. Für die Whiskerslänge wird in Matlab bei der Defaultversion maximal die 1,5 fache Länge des Abstandes zwischen den zwei Quartilen verwendet (www.mathworks.de/help/stats/boxplot.html, Stand 25.09.13).

Neben dem Boxplot gibt es noch die Scatterplotdarstellung. Hier werden zwei Variablen gegenüber gestellt. Mit Hilfe der Ausgleichsgerade zeigt sich, wie gut die Werte übereinstimmen. Der lineare Zusammenhang der Daten lässt sich mit der Formel darstellen:

$$y = c \cdot x + t \tag{4.1}$$

Dabei ist c die Geradensteigung. Wenn c gleich 1 ist, dann stimmen die Werte perfekt überein. Bei 0 gibt es keinen Zusammenhang zwischen den Werten. Das t steht für den Achsenabschnitt. Bei t gleich Null und c gleich 1 sind die Werte identisch. Zusätzlich kann auch der Korrelationskoeffizient berechnet werden. Dieser zeigt den Grad der Korrelation an. Es können Werte zwischen -1 und 1 angenommen werden. Bei +1 gibt es einen direkten und bei -1 einen indirekten perfekten linearen Zusammenhang zwischen den Werten. Wenn der Korrelationskoeffizienten gleich Null ist, besteht keine Korrelation zwischen den Werten. [Schönwiese, 2006]

Als nächstes gibt es noch verschiedene Kenngrößen, um den Zusammenhang zwischen zwei Datensätzen zu untersuchen. In dieser Arbeit wird der Root Mean Square Error (RMSE), der mittlere absolute Fehler MAE und der mittlere Biasfehler MBE angewendet. Im Folgenden steht x immer für die Werte und y für den Vergleichswerte.

RMSE bedeutet Root Mean Square Error und berechnet sich mit folgender Formel:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(x - y)^2}{n}} \quad (4.2)$$

Wobei n die Anzahl der Werte ist. Durch das Quadrat und die Wurzel werden größere Fehler stärker betont und die Werte sind größer als beim MAE und beim mittlerer Biasfehler (MBE).

Der mittlere absolute Fehler (MAE) wird berechnet indem der absolute Fehler zwischen den Werten aufsummiert und durch die Anzahl der Vergleichspaare geteilt wird.

$$MAE = \frac{\sum(|x - y|)}{n} \quad (4.3)$$

Beim MAE werden im Gegensatz zum RMSE nicht die größeren Fehler verstärkt, sondern alle Fehler gehen zu gleichen Teilen ein. Da sowohl der RMSE als auch der MAE nur positive Abweichungen berechnen, gibt es eine dritte Form, die in dieser Arbeit verwendet wird.

Der mittlere Biasfehler berechnet sich mit der Formel:

$$MBE = \frac{\sum(x - y)}{n} \quad (4.4)$$

Er kann sowohl negative als auch positive Werte annehmen. Wenn die Werte von MAE und MBE gleich sind, dann gibt es nur positive Fehler, somit kann der Wert von MBE nur kleiner oder gleich dem MAE-Wert sein.

Für alle drei Werte gilt, je näher sie an der Null liegen, desto besser ist die Übereinstimmung der Daten. [Wilks, 2006]

Zur Auswertung der Satellitendaten wird zusätzlich noch der mittlere prozentuale absolute Fehler MAPE verwendet. Er wird mit folgender Formel berechnet.

$$MAPE = \frac{\sum(|\frac{x-y}{x}|)}{n} * 100^1 \quad (4.5)$$

Der Vorteil des prozentualen Fehlers besteht darin, dass nicht nur der mittlere Fehler berechnet wird, sondern darüberhinaus eine Aussage über den Fehler selbst gemacht werden kann.

¹http://www.inf.tu-dresden.de/content/institutes/iai/tis-neu/lehre/archiv/folien.ss_2008/Belegverteidigung_Qiao.pdf Stand 7.12.2013

Kapitel 5

Auswertung der Messkampagne der Freien Universität Berlin

Im Jahr 2012 wurde von der Freien Universität Berlin (FU) eine Messkampagne durchgeführt. Die Routen und Wetterlagen der einzelnen Messkampagentage wurden in Kapitel 3.3 beschrieben. Die Daten aus dieser Messkampagne werden im Folgenden mit den Daten von festen Messstationen der Freien Universität Berlin (FU), der Technischen Universität Berlin (TU), der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW), den Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und den Daten der Firma Meteomedia verglichen. Diese Daten wurden im Kapitel 3 näher beschrieben.

Im Folgenden wird zunächst der Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf die relative Feuchte und auf die Temperatur in 5cm Höhe untersucht. Auf die Route Wuhlheide/Rummelsburg am 18. August 2012 wird konkret eingegangen. Im Weiteren werden die 2m-Daten der Tage 21. April und 4. August sowie der Nachtmessung 20./21. August analysiert. Auf die anderen Tage der Messkampagne wird bei der Validierung der METRAS-Werte eingegangen. Abschließend wird noch einen Stadt-Land-Vergleich gegeben.

5.1. Analyse der 5cm-Temperaturdaten

5.1.1. Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf die relative Feuchte

Um den Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf die relative Feuchte in 5cm Höhe abzuschätzen, wurden die verschiedenen Bodenbedeckungen in drei Klassen eingeteilt. Die erste Klasse ist Asphalt. Hierzu zählen unter anderem Asphalt, Beton, kleine Steine und Steinplatten. Gras ist die zweite und Sand die dritte Klasse, wobei in die Kategorie Sand auch Erde und Feldwege hinzuzählen. In Abbildung 5.1 ist der Einfluss der Bodenbedeckung auf die relative Feuchte dargestellt.

5.1 Analyse der 5cm-Temperaturdaten

Dazu wurde von jedem Wert der Messkampagne der zeitliche Mittelwert der Messkampagne abgezogen. Zusätzlich wurde noch der Anteil der jeweiligen Klasse berechnet. Für Asphalt sind die Abweichung der relativen Feuchte negativ. Dies liegt daran, dass über Asphalt im Gegensatz zu den anderen beiden Klassen keine Feuchtigkeit zur Verdunstung zur Verfügung steht. Über Gras ist die relative Feuchte am Höchsten, da ein Grasboden durch Evapotranspiration viel Feuchtigkeit an die Umgebung abgibt. Die mittleren Abweichungen von Sandboden liegt zwischen Grasboden und Asphalt, da keine Vegetation vorhanden ist. Feuchtigkeit kann nur aus dem Sand evaporieren, da die Oberfläche nicht versiegelt ist. Zusätzlich wurde in Abbildung 5.1 der jeweilige Anteil der Bodenbedeckungsart eingetragen. Die meisten Daten wurden über Asphalt gemessen (70,6%). Am seltensten wurde über Sand gemessen, so dass nur 11,4% aller Daten über Sand aufgenommen wurden. Dies liegt daran, dass die Stadt überwiegend versiegelt ist.

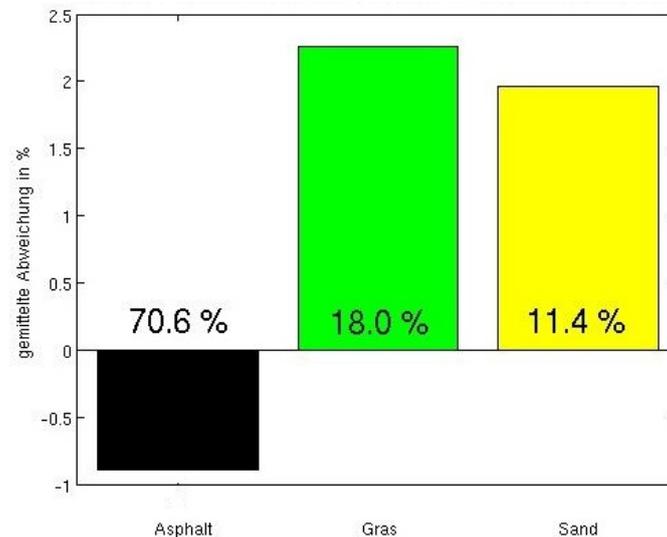


Abbildung 5.1.: Mittel über die Abweichungen der 5cm-relativen Feuchte Messwerte der Messkampagne vom zeitlichen Mittelwert in Abhängigkeit von der Bodenbeschaffenheit. Außerdem wurden die Prozente der jeweiligen Klasse eingetragen.

5.1.2. Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf die Temperatur

Für die Abbildung 5.2 wurden die gleichen Klassen wie im vorherigen Kapitel gewählt. Wie bei der relativen Feuchte wurden die Abweichungen vom Mittelwert und die Anteile an der jeweiligen Klasse in die Abbildung 5.2 eingetragen.

Beim Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf die Temperatur muss beachtet werden, dass die Messzeit nur von 9 bis 16 Uhr (MESZ) war. Dies bedeutet, dass die Abweichungen überwiegend durch die Sonnenstrahlung verursacht werden. Da sich Asphalt durch die Einstrahlung schnell erwärmt, zeigt die Abbildung 5.2, dass über Asphalt die höchsten Temperaturen gemessen wurden. Zur Berechnung des Mittelwertes gingen ca 70% Daten von asphaltierten Flächen ein. Dies

hat zur Folge, dass der Mittelwert höher ist, als wenn mehr Grasflächen in die Berechnung eingegangen wären. Deswegen beträgt die gemittelte Abweichung über Asphalt nur 0,06K. Durch die Evapotranspiration und die damit verbundene Verdunstungskälte, ist es über Gras kälter als über Asphalt. Die kältesten Temperaturen wurden über Sand gemessen. Dies liegt an der hohen Albedo von Sand, was dazu führt, dass die meiste Strahlung direkt reflektiert wird und nicht zur Erwärmung der unteren Bodenschichten beiträgt. Die besonders hohe Abweichung vom Mittelwert hängt damit zusammen, dass nur 11,4% aller Werte über Sand gemessen wurden.

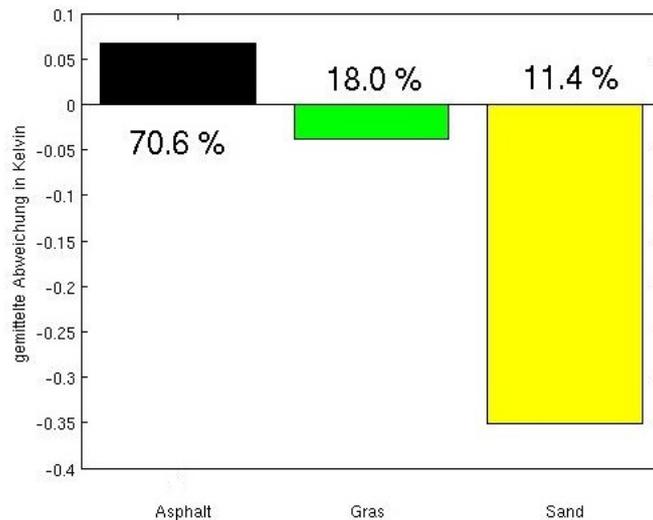


Abbildung 5.2.: Mittel über die Abweichungen der 5cm-Temperatur Messwerte der Messkampagne vom zeitlichen Mittelwert in Abhängigkeit von der Bodenbeschaffenheit. Außerdem wurden die Prozente der jeweiligen Klasse eingetragen.

5.1.3. Fallbeispiel Route Wuhlheide und Rummelsburg vom 18. August 2012

Am 18. August 2012 wurde bei den Messungen in der Wuhlheide und in Rummelsburg die unterschiedliche Bodenbeschaffenheit berücksichtigt. In Abbildung 5.3 sind die Abweichungen vom Mittelwert der 5cm-Lufttemperatur dargestellt. Für den Mittelwert wurden die Daten für jede Uhrzeit gemittelt, um den Tagesgang herauszufiltern. Zusätzlich ist noch die mittlere 2m-Temperatur eingetragen. Die im Folgenden erwähnten Windeigenschaften wurden während den Messungen vermerkt.

Der erste Messwert wurde am Bahnhof Karlshorst aufgenommen; der zweite am Bahnhof Wuhlheide, d.h. etwas weiter am Rand von Berlin. Die Wuhlheide stellt durch ihren hohen Baumanteil im Sommer eine Kältequelle im Bereich der Stadt dar. Deswegen ist es hier über Asphalt kälter als über Sand. Wie bereits im vorherigen Kapitel 5.1.2 gezeigt, ist die Temperatur normalerweise über Sand kälter als über Gras und Asphalt. Asphalt ist aufgrund seiner Eigenschaften die wärmste Oberfläche innerhalb einer Stadt. Dies zeigen die nächsten fünf Messwerte.

Die beiden nächsten Punkte liegen zentraler in der Wuhlheide und sind somit kälter. Der letzte in der Wuhlheide aufgezeichnete Wert (um 11 Uhr MESZ) liegt wieder in der Nähe des Bahnhofes am Rand der Wuhlheide.

5.1 Analyse der 5cm-Temperaturdaten

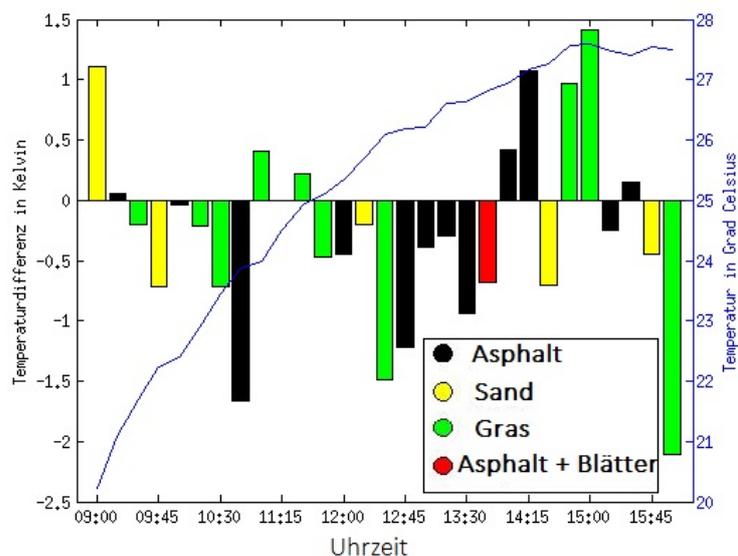


Abbildung 5.3.: Die blaue Linie zeigt den 2m-Temperaturverlauf aller Routen am 18. August 2012. Außerdem sind die Abweichungen der 5cm-Lufttemperatur von einer Route in Wuhlheide und Rummelsberg eingetragen. Die Balken wurden nach der Bodenbeschaffenheit farblich markiert, dabei steht grün für Gras, schwarz für Asphalt, gelb für Sand und rot für Asphalt und Blätter.

Der nächste Wert wurde neben dem Bahnhof Rummelsburg auf einer feuchten Wiese aufgenommen. Die nächste Messung erfolgte 5cm über einer sehr trockenen Wiese. Es ist zu erwarten, dass aufgrund von fehlender Transpiration, die Temperaturdifferenz zunimmt. Allerdings hat wohl der Einfluss von Gebäuden eine große Auswirkung auf die 5cm-Lufttemperatur; denn wie in Abbildung 5.3 zu sehen ist, wird die Temperaturdifferenz zwischen 11:30 und 11:45 (MESZ) geringer. Die feuchte Wiese lag in einer Gegend mit wenig Wind und die trockene auf einem großen Platz mit viel Wind.

Im Weiteren nimmt die Temperaturdifferenz um 12:00 Uhr (MESZ) geringfügig ab. Die Zunahme der Temperaturdifferenz zum nächsten Zeitschritt liegt daran, dass diese über Sand in einem Park aufgezeichnet wurde, in dem es sehr windstill war. Anschließend nimmt die Temperaturdifferenz wieder sehr stark ab. Dies liegt daran, dass der Messplatz neben einem Hochhaus lag und somit wenig Sonne im Tagesverlauf abbekommt und sich deswegen nicht so gut erwärmen kann. Unweit vom vorherigen Messpunkt wurde nun in einem kleinen Waldstück gemessen. Da die Bäume nicht die gesamte solare Einstrahlung abgehalten haben, war es etwas wärmer.

Bei der nächsten Messung um 12:45 (MESZ) wurde auf einem Parkplatz neben dem Wald gemessen. Hier war es ziemlich windig, sodass auch hier die Temperaturdifferenz negativ ist. Auch die Messung um 13:15 (MESZ) ist durch ein gut belüftetes, jedoch zum Messzeitpunkt windstillen, Gebiet geprägt.

Die nächsten beiden Werte wurden in einem Wohngebiet gemessen. Hier lag die Temperaturdifferenz wieder etwas niedriger, bevor sie auf der anderen Straßenseite der Treskowallee stark zunahm.

Auffällig ist die Abnahme zum nächsten Messpunkt. Dies liegt daran, dass nun auf einem Friedhof gemessen wurde. Dadurch, dass hier sehr viele Bäume stehen, konnte die Sonne den Boden nicht besonders gut erwärmen. Außerdem werden Friedhöfe im Allgemeinen sehr gut gewässert, so dass auch dadurch eine Abkühlung der Lufttemperatur stattfindet.

Die folgenden Messplätze waren beide sehr trockene Wiesen, die in der Sonne lagen. Wie stark der Einfluss der Sonneneinstrahlung ist, zeigt sich bei den nächsten beiden Temperaturmesspunkten. Obwohl hier über Asphalt gemessen wurde, nimmt die Temperaturdifferenz keine positiven Werte an. Dies liegt daran, dass sich die beiden Messplätze auf einer Straße befanden, die die meiste Zeit des Tages im Schatten liegt. Im Weiteren nimmt die Temperatur weiter ab. Der letzte Messplatz war wieder eine feuchte Wiese neben einem Hochhaus, die zu fast keiner Tageszeit von der Sonne beschienen wird.

Somit zeigte sich, dass der Boden nicht alleine ausschlaggebend für die Temperatur ist. Der Einfluss, wie lange auf ein Gebiet direkt Sonne pro Tag scheint, ist erheblich wichtiger. Außerdem ist es entscheidender, ob das Gebiet windstill oder windig ist.

5.1.4. Schlussfolgerung

In diesem Abschnitt wurde der Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf die 5cm-Daten hin untersucht. Es zeigte sich, dass die 5cm-Temperaturen über Asphalt am höchsten und über Sand am niedrigsten sind. Im Weiteren ist die 5cm-relative Feuchte über Asphalt am geringsten und über Gras am höchsten. Im Fallbeispiel Wuhlheide / Rummelsburg ist jedoch auch aufgefallen, dass die 5cm-Temperaturen nicht nur von der Bodenbeschaffenheit sondern, vor allem auch von den Abschattungseffekten und dem Wind abhängt.

5.2. Analyse der 2m-Daten

Nachdem die 5cm-Daten im Hinblick auf die Bodenbeschaffenheit ausgewertet wurden, werden in diesem Abschnitt die 2m-Werte näher betrachtet. Zunächst wird für eine allgemeine Einordnung der Messkampagnendaten die Temperatur und die relative Feuchte von allen Tagen der Messkampagne zusammen untersucht. Danach wird auf die beiden Tage eingegangen, an denen es geregnet hat, um den Einfluss von Niederschlag und Wetterlage zu verdeutlichen. Anschließend werden die Nachtmessungen der Studenten ausgewertet und ein Vergleich zwischen städtisch und ländlich geprägten Messstationen betrachtet.

5.2.1. 2m-Temperatur

Für die Abbildung 5.4 wurden die Messwerte von allen Tagen der Messkampagne außer den Daten der Nachtmessungen verwendet, da in der Nacht auf anderen Routen gemessen wurde. Für den Vergleich wurde die Abweichungen der Messungen zum Mittelwert je Uhrzeit berechnet. Um nur städtische Effekte aufzuzeigen, wurden die Werte ausgeschlossen, an denen es geregnet

5.2 Analyse der 2m-Daten

hat. Die Abbildung 5.4 zeigt einen Boxplot, in dem sämtliche Abweichungen vom Mittelwert pro Station eingetragen wurden. Die einzelnen Institutionen sind voneinander durch senkrechte Striche getrennt. Der erste Bereich zeigt die Abweichungen der Messkampagne. Rechts daneben liegen sind die Daten vom DWD eingetragen. Danach folgen die Abweichungen für die Messungen der FU. Im Anschluss sind die Messstation der HTW und die der TU dargestellt. Zum Schluss sind die Abweichungen vom zeitlichen Mittelwert für die Messungen der Firma Meteomedia eingetragen.

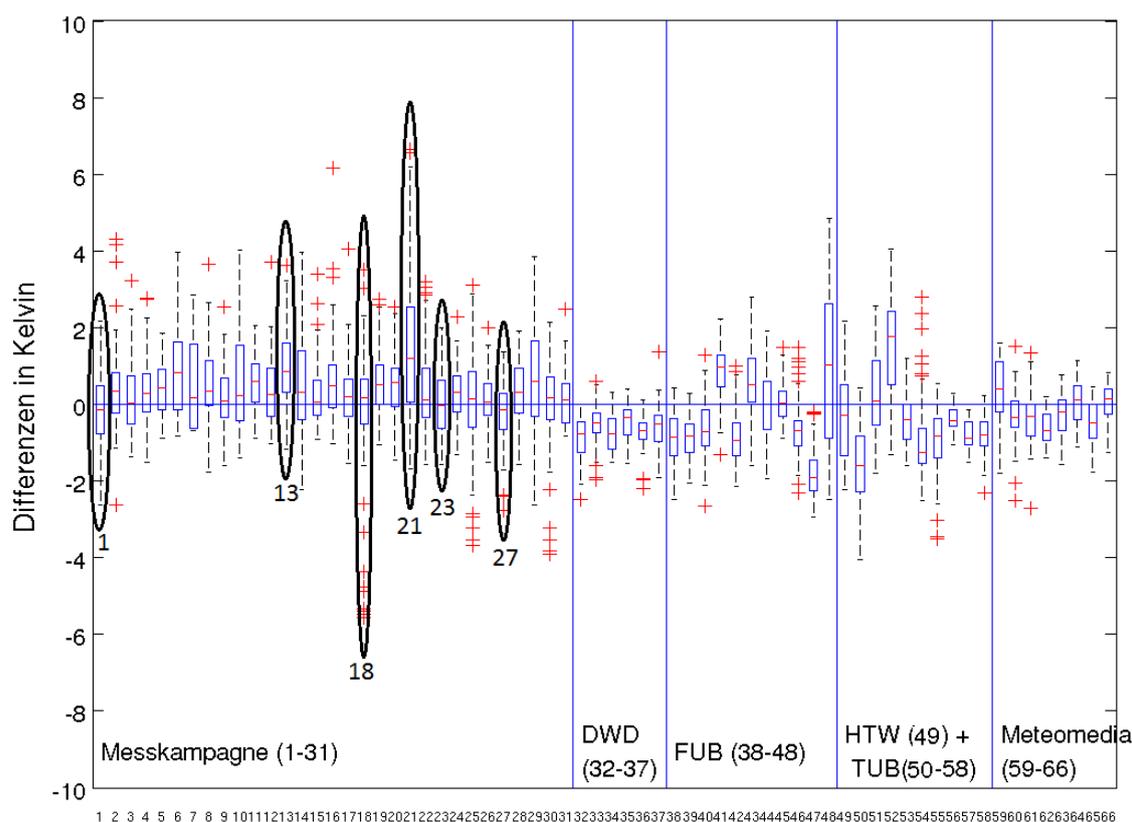


Abbildung 5.4.: Boxplotdarstellung der Abweichungen der 2m-Temperatur-Messwerte zum zeitlichen Mittelwert für alle Messpunkte der Messkampagne mit Ausnahme der Nachtmessungen. Die einzelnen Institutionen sind durch senkrechte Striche von einander getrennt.

Es zeigt sich, dass die Messkampagnendaten überwiegend stärker positive Abweichungen aufweisen als die Daten der festen Messstationen. Wie bereits in Kapitel 3.3.7 beschrieben, hatten die Messgeräte kaum Zeit sich zu akklimatisieren. Deswegen ist auch der Range der Abweichungen viel größer als bei den festen Instrumenten. Jedoch ist die Range auch größer, da die Messungen an unterschiedlichen Messstandorten und somit unter unterschiedlichen Bedingungen vorgenommen wurden. Auch die Messgenauigkeit des TROTEC (siehe Tabelle 3.2) ist mit 1 °C 10 mal schlechter als die der festen Messstationen. Die höheren Abweichungen bei der 2m-Temperatur lassen sich auch darauf zurückführen, dass die Studenten überwiegend über Asphalt gemessen haben. Eine Ausnahme bildet die Route 1, die von Heiligensee bis in den Tegeler Forst verlief

und somit wurde hier überwiegend im Wald gemessen. Da es im Wald an morgendlichen Sommertagen kühler als auf freien Flächen ist, liegt der Median der Abweichungen dieser Route im negativen Bereich. Auch die anderen Routen, die einen negativen Median haben, lagen am Rand der Stadt. Die Route 23 führt von der Blaschkowallee bis nach Rudow und die Route 27 von der Gehrenseestraße bis zum Orankesee. Andererseits gibt es auch Routen, bei deren Abweichungen der Messungen selbst das untere Quartil im positiven Bereich liegt. Es haben somit über 75% aller Messwerte positive Abweichungen. Diese Routen sind Route 21 in Kreuzberg und die Route 13 in Mitte. Beide Routen lagen im Stadtzentrum. Dies könnte auf den Effekt der städtischen Wärmeinsel zurückzuführen sein. Auffällig ist zusätzlich noch die Route 18, die in der Nähe vom Olympiastadion verlief. Sie weist mehrere negative Extremwerte auf. Dies hängt mit den Messungen am 4. August zusammen. An diesem Tag war es unter den Bäumen am Olympiastadion besonders kalt. Möglicherweise war auch das Messgerät nicht richtig kalibriert.

Im Gegensatz zu den Studentendaten ist der Range beim DWD (Nr. 32 - 37) kleiner. Auch der Median der Abweichungen liegt für alle Stationen unterhalb im negativen Bereich. Dies liegt daran, dass die Messgeräte fest montiert sind. Dadurch müssen sie sich nicht zu jeder Messung neu einstellen und auch die Messgenauigkeit der Messgeräte ist höher. Außerdem wird immer am gleichen Ort gemessen und die Wetterstationen werden zu keiner Tageszeit von Häusern oder Bäumen abgeschattet. Große Unterschiede zwischen den Messstationen des DWD sind nicht zu erkennen, da alle die gleichen Voraussetzungen haben und es keine typische städtische Messstation gibt. Außerdem wurde nur ein kleiner Datensatz und nur Messwerte zwischen 9 und 16 Uhr (MESZ) untersucht.

Die Abweichungen bei der Firma Meteomedia (Nr. 59 - 66) sind wie die Abweichungen vom DWD sehr einheitlich und haben einen geringen Range.

Obwohl sich die Messstation der HTW mit der Nummer 49 in drei Meter Höhe auf dem Dach des Hochschulgebäudes befindet, werden hier weder besonders hohe noch besonders niedrige Temperaturen gemessen.

Die Nummer 50 gehört zur Messstation Jagen91 der TU. Diese fällt mit besonders kalten Temperaturen auf. Dies liegt daran, dass sie sich mitten im Grunewald befindet. Abgeschattet von Bäumen ist es im Sommer kälter als in der Stadt. Die höchsten Temperaturen werden von der Messstation Spandauer Straße (Nr. 52) gemessen. Diese Station etwas außerhalb und westlich von Berlin. Bei der Analyse der Maximalwerte fällt auf, dass sie sich besonders vormittags sehr schnell erwärmt und somit hohe positive Abweichungen hat. Am Nachmittag nimmt die Temperatur sehr schnell ab, sodass bereits ab 14 Uhr (MESZ) negative Abweichungen gemessen werden. Dies erklärt die große Range der Daten. Auffällig ist auch, dass die Messstationen im Tiergarten (Nr. 56), in der Dessauer Straße (Nr. 57) und in der Bambergerstraße (Nr. 58), obwohl sie mitten in Berlin liegen, überwiegend niedrigere Abweichungen haben. Dies liegt daran, dass für diese Betrachtung nur Messwerte zwischen 9 und 16 Uhr (MESZ) ausgewertet wurden. Die stärkste städtische Wärmeinsel bildet sich erst nach Sonnenuntergang aus [Oke, 1981]. Tagsüber kann es sogar zu einem städtischen Kälteinselseffekt kommen, zum Beispiel wurde für Trento in den Alpen eine städtische Kälteinsel von bis zu 1.5 °C zwischen 10 und 13 Uhr (MEZ) gefunden [Giovannini et al, 2011].

5.2 Analyse der 2m-Daten

Auch bei der Stadtstation der FU in der Fasanenstraße (Nr. 42) zeigen sich diese negativen Abweichungen. Weitere kältere Gebiete innerhalb von Berlin sind zum Beispiel die Messstationen im Botanischen Garten (Nr. 39), in Gatow (Nr. 38) und vor allem auch am Tegeler See (Nr. 47). Beim Tegeler See liegt dies daran, dass sich das Messgerät in 3m Höhe über dem See befindet. Dies führt dazu, dass immer Wasser zur Verdunstung zur Verfügung steht. Außerdem haben Seen im Sommer einen kühlenden Effekt auf die Lufttemperatur. Da die Messstation am Tegeler-Forstamt (Nr. 41) durch besonders positive Abweichungen auffällt, wurde in Abbildung 5.5 der Tagesgang der Messwerte im Botanischen Garten (grün), am Tegeler-Forstamt (blau), am Müggelsee (rot) und an der Fasanenstraße in lila dargestellt. Hier zeigt sich auch, dass die Messungen

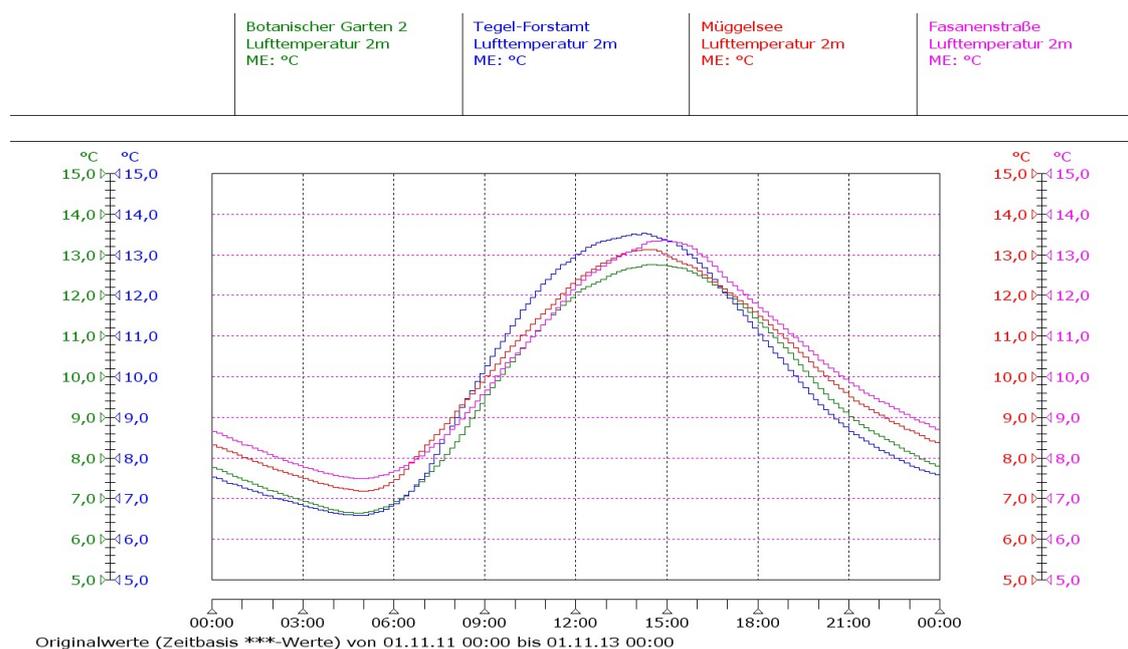


Abbildung 5.5: Über die Jahre 2011 und 2012 gemittelter Tagesgang der Messstationen Botanischer Garten, Tegeler-Forstamt, Müggelsee und Fasanenstraße vom Stadtmessnetz der Freien Universität Berlin

am Tegeler-Forstamt zwischen 9 und 15 Uhr (MEZ) die höchsten Temperaturen aufweisen. Typisch für die städtische Wärmeinsel misst das Messgerät am Tegeler-Forstamt nachts die kältesten Temperaturen und an der Fasanenstraße werden die höchsten Temperaturen aufgezeichnet. Die städtische Kälteinsel hängt mit der Bodenbeschaffenheit und dem sky-view-Faktor zusammen. Da die Wiese am Messstandort Tegeler-Forstamt zwar eine genormte Größe hat, also die Station im Tagesgang nicht durch Bäume oder Häuser abgeschattet wird, jedoch der Untergrund durch ein Sand-Gras-Gemisch ersetzt wurde, erwärmt sich die Station am Vormittag sehr schnell und kühlt nach Sonnenuntergang sehr schnell ab. Im Gegensatz dazu bleibt es im Botanischen Garten den ganzen Tag über kälter, da hier durch Bewässerung immer Wasser zur Verdunstung zur Verfügung steht. Als vierte Station wurde noch die Messstation Müggelsee dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass sie am Vormittag höhere Temperaturen als die Messstation in der Fasanenstraße hat. Dies zeigt sich auch in Abbildung 5.4 (Nr. 48). Im Weiteren fällt sie auch durch einen sehr großen Range auf. Dies lässt darauf schließen, dass sie nicht immer höhere Temperaturen als im Mittel misst. Auch die Messstation auf dem FB-Fichtenberg (Nr. 43) misst höhere Temperaturen.

Dies hängt damit zusammen, dass sich die Station auf einem Berg befindet und die warme Luft nach oben steigt. Außerdem wird die Messwiese im Gegensatz zum Botanischen Garten nicht bewässert.

Neben der Analyse der Boxplotdarstellung wurden die Werte auch auf mögliche Stadteffekte (z.B. städtische Kälteinsel oder kalte Waldgebiete) hin untersucht. Dazu wurden die für die Boxplotdarstellung berechneten Abweichungen gemittelt und in die Karte in Abbildung 5.6 eingetragen. Bei der Messkampagne wurde über die Lagepunkte aller Messungen einer Route gemittelt und dieser gemittelte Routenpunkt in die Abbildung eingetragen. Es zeigte sich, dass die Temperaturen im Mittel Abweichungen von -2 bis +2K haben, deswegen wurden zur Vergleichbarkeit der einzelnen Tage feste Grenzen gesetzt. In dunkelblau wurden die Messstandorte dargestellt, die mittlere Abweichungen von kleiner als -1.2K aufzeigen. Der nächste Bereich liegt zwischen -0.4 und -1.2K und ist in hellblau markiert. Der mittlere Bereich ist gelb und liegt zwischen -0.4 und 0.4K. Danach folgt der orangene Bereich zwischen 0.4 und 1.2K und zum Schluss wurden die höchsten positiven Abweichungen, die größer als 1.2K waren mit rot dargestellt. Auch hier sieht man, dass es am Tegeler See und im Grunewald (Jagen91) besonders kalt ist. Sehr hohe Abweichungen weist im Gegensatz die Messstation in der Spandauer Straße von der TU auf. Wie bereits festgestellt, liegen auch die meisten Messungen der Messkampagne über dem Mittelwert. Im Bereich des Mittelwertes und etwas darunter befinden sich die Messungen der Firma Meteomedia und des DWD.

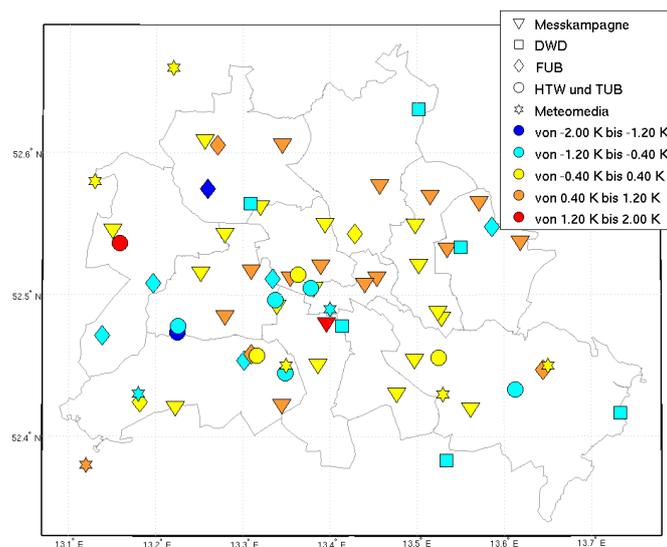


Abbildung 5.6.: Verteilung der gemittelten Abweichungen vom zeitlichen Mittelwert der Messpunkte und der Messkampagne mit Ausnahme der Nachtmessungen

5.2.2. 2m-relative Feuchte

Neben der Temperatur wurde auch die relative Feuchte in 2m Höhe gemessen. Berechnet wurden wieder die Abweichungen vom Mittelwert je Uhrzeit, um den Tagesgang herauszufiltern. In Abbildung 5.7 zeigt sich, dass die Studenten aufgrund des Asphalts niedrigere relative Feuchten gemessen haben, als die festen Messstationen, die überwiegend Gras als Untergrund haben. Asphalt versiegelt die Oberfläche, so dass kein Wasser zur Verdunstung zur Verfügung steht. Bei einer Rasenfläche transpiriert auf der einen Seite das Gras Feuchtigkeit und zum anderen wird vom Erdboden Wasser evaporiert. Ausnahmen sind die Route 1, die sich im Tegeler Forst befindet und die Route 25, die in Adlershof liegt. Auch Route 27 (Orankesee) und Route 31 (Schlachtensee) verlaufen in Gebieten mit vielen Grünflächen.

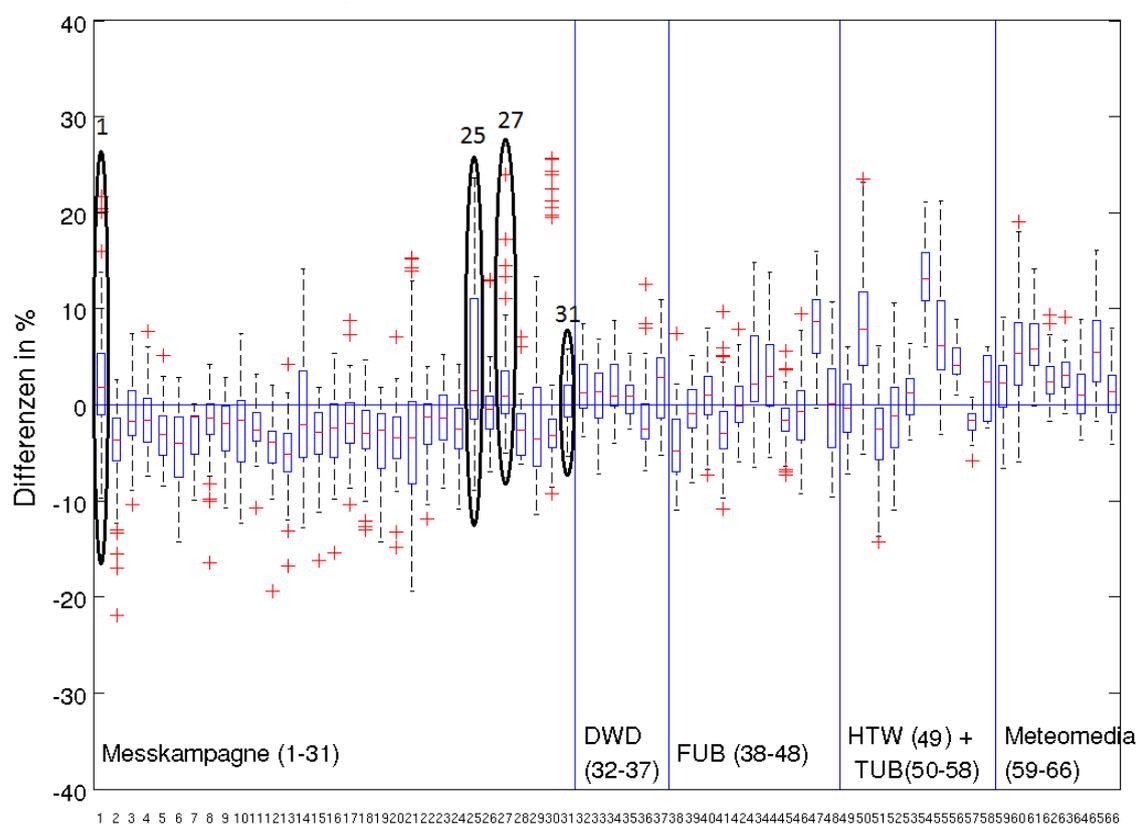


Abbildung 5.7.: Abweichungen der Messwerte der relativen Feuchte in 2m Höhe zum zeitlichen Mittelwert für alle Messpunkte der Messkampagne mit Ausnahme der Nachtmessungen. Die einzelnen Institutionen sind durch senkrechte Striche von einander getrennt.

Die höchsten relativen Feuchten werden an der Messstation der TU in der Albrechtstraße (Nr. 54) gemessen. Das Messgerät befindet sich in der Nähe des Teltowkanal in einer Kleingartenkolonie. Es ist direkt neben einem Baum aufgestellt worden. Kleingärten werden in der Regel im Sommer bewässert. Zusätzlich sorgen auch der Teltowkanal und der Baum für erhöhte relative

Feuchte. Der Einfluss von Bäumen zeigt sich auch in Jagen91 (Nr. 50), wo im Mittel die zweithöchsten relativen Feuchten der TU gemessen werden. Wie bereits erwähnt liegt Jagen91 direkt im Grunewald. Auch die Messstation Köpenick (Nr. 55) befindet sich in einem Wald und zwar im Köpenicker Forst, sodass auch hier hohe relative Feuchten gemessen werden. Der zweithöchste Mittelwert aller Messwerte wird allerdings am Tegeler See (Nr. 47) gemessen, wo ständig Wasser zur Verdunstung zur Verfügung steht. Dies erklärt auch die geringeren Temperaturen in 2m Höhe, da durch die Evaporation Verdunstungskälte freigesetzt wird. Außerdem zeigt sich, dass der Einfluss des Müggelsees auf die Station am Müggelsee (Nr. 48) gering ist, denn die relative Feuchte ist hier nicht höher als im Mittel. Dieser Effekt hängt allerdings sehr stark von der jeweiligen Wetterlage ab. Die Station am Wannsee (Nr. 44) zeigt im Vergleich der Messstationen der Freien Universität Berlin (FU) die zweithöchste Abweichung. Niedrige Messwerte zeigt das Tegeler Forstamt (Nr. 41) auf. Dies liegt an dem Gras/Sand-Gemisch als Untergrund. Durch das fehlende Gras wird weniger Wasser transpiriert, sodass die relative Feuchte abnimmt.

Es zeigt sich in vielen Fällen der Zusammenhang zwischen relativer Feuchte und Temperatur. Da höhere Temperaturen mehr Feuchtigkeit aufnehmen können, ist die relative Feuchte bei gleichem Wasseranteil geringer. Dieser Zusammenhang zeigt sich nicht nur beim Tegeler See, wo die hohe relative Feuchte mit niedrigeren Temperaturen zusammenhängt, sondern auch in der Spandauer Straße, wo die Temperaturen sehr hoch sind und die relativen Feuchten gering. Jedoch gibt es auch andere Zusammenhänge. In der Dessauer Straße ist sowohl die relative Feuchte gering, als auch die Temperatur. Dies liegt an der Lage der Messstation. Sie ist in einer Straßenschlucht an einer Mauer befestigt. Durch den städtischen Kälteineffekt sind die Messwerte im betrachteten Zeitraum gering und durch den asphaltierten Untergrund steht kein Wasser zur Verdunstung und zur Erhöhung der relativen Feuchte zur Verfügung.

Durch die genormten Messstationen beim DWD haben die Messwerte der relativen Feuchte, wie die Messwerte der Temperatur, einen sehr geringen Range und liegen in der Nähe des Mittelwertes. Auch bei den Messwerten der Firma Meteomedia ist der Range überwiegend gering. Ausnahme ist die Messstation am Müggelsee (Nr. 60). Dies weist daraufhin, dass es von der Wetterlage abhängig ist, wie stark der Einfluss des Müggelsees auf die Messwerte ist.

Die Karte mit der Verteilung der gemittelten relativen Feuchteabweichungen befindet sich im Anhang (Abb. A.1).

5.2.3. 21. April 2012

Nachdem die Messdaten von allen Messtagen insgesamt ausgewertet wurden, wird nun auf die Besonderheiten einzelner Tage eingegangen. Speziell werden die beiden Tage mit Niederschlag untersucht. Der erste Messtag der Messkampagne der Freien Universität Berlin (FU) war der 21. April 2012. Wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, war es ein typischer Apriltag mit viel Sonne und einem Schauer am Nachmittag, der über Berlin zog. Die Niederschlagsmenge war über ganz Berlin verteilt und sehr gering, so dass sich der Niederschlag in den Messwerten kaum abzeichnet. Im Anhang wurden die Abbildungen für die Abweichungen der Temperatur vom zeitlichen Mittelwert für alle Messungen in Abbildung A.2 und für die Messzeitpunkte ohne Niederschlag, d.h.

5.2 Analyse der 2m-Daten

ohne die Messwerte zwischen 14:30 und 15:30 (MESZ), in Abbildung A.3 dargestellt. Ebenso wurden die Boxplotdarstellung der relative Feuchte im Anhang dargestellt, da sich der Unterschied zwischen den Abbildungen mit den Messungen bei Niederschlag und ohne diese Messungen überwiegend bei den Extremwerten zeigt (Abb. A.4 und A.5).

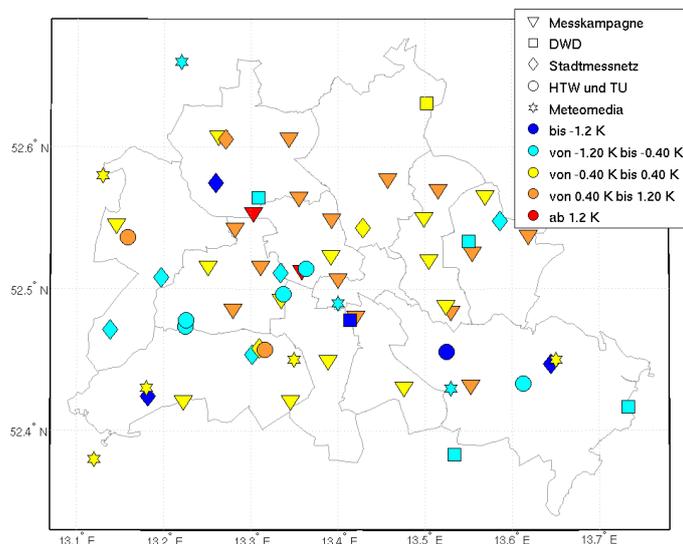


Abbildung 5.8.: Verteilung der gemittelten Abweichungen der 2m-Temperatur am 21. April 2012 für Berlin

In Abbildung 5.8 wurden die gemittelten Abweichungen der 2m-Temperatur von der zeitlichen Mitteltemperatur eingetragen. Wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, wurde die Abweichungen in 5 Klassen eingeteilt. Im Vergleich zur Karte mit allen Messkampagnendaten (Abb. 5.6) zeigt sich, dass die Messstation am Tegeler See wieder mit starken negativen Abweichungen auffällt. Ebenso zeigt sich, dass die Messungen der Messkampagne überwiegend positive Abweichungen aufweisen. Allerdings wurden dieses Mal nicht in Kreuzberg (Nr. 21) die höchsten Abweichungen gemessen, sondern im Tiergarten (Nr. 14) und bei der Busroute, die von Süd nach Nord durch Berlin lief. Bei der Route in Kreuzberg liegt dies daran, dass die Route dieses Mal anders gelaufen wurde, so dass mehr Messungen auf dem Tempelhofer Feld vorgenommen worden waren. Auch die Messstation des DWD misst an diesem Tag höhere negative Abweichungen auf dem Tempelhofer Feld. Dies könnte am Wind gelegen haben, der am 21. April aus südlichen Richtungen kam. Auch die besonders hohen negativen Abweichungen der Messstation der FU am Müggelsee und Wannsee lassen sich mit dem südlichen Wind erklären. Durch den Wind werden die Stationen durch die Seen beeinflusst und die Temperaturen bleiben geringer. Dies zeigt sich besonders auch in Abbildung 5.9. In diese Abbildung wurden die gemittelten Abweichungen der 2m-relativen Feuchte vom 21. April ohne Niederschlag eingetragen. Es zeigt sich, dass am Müggelsee und am Wannsee die Messstationen der FU positive Abweichungen aufweisen. Wie auch bei der Betrachtung von allen Tagen (siehe Abb. A.1), sind die Abweichungen der Messkampagne überwiegend negativ und die Messstation am Tegeler See stark positive. Die Abbildungen unterscheiden sich vor allem beim Messstandort im Grunewald. Es zeigt sich, dass die relative

Feuchte geringer ist und deswegen auch die Temperaturen höher. Dies liegt vermutlich daran, dass an diesem Tag nicht so viel Feuchtigkeit vom Boden zum Verdunsten zur Verfügung stand. Außerdem konnte durch die Bäume nicht so viel Niederschlag den Boden erreichen.

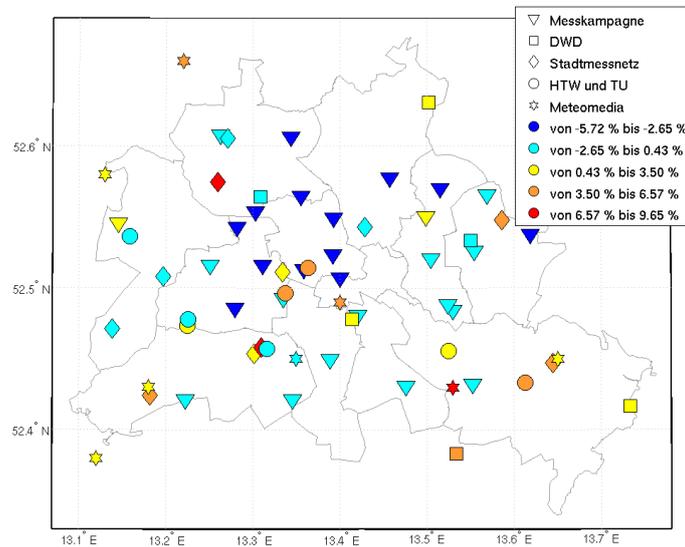


Abbildung 5.9.: Verteilung der gemittelten Abweichungen der 2m-relativen Feuchte am 21. April 2012 von 9 bis 15 Uhr (MESZ) für Berlin

5.2.4. 04. August 2012

Wie am 21. April war es auch am 4. August zunächst sonnig bevor es am Nachmittag kurze Schauer und Gewitter gab. Diese Schauer waren allerdings stärker als am 21. April und lokal auf den Nordwesten von Berlin begrenzt, sodass der Einfluss des Niederschlages in den Daten zu erkennen ist. In Abbildung 5.10 wurde der Tagesgang der Temperatur eingetragen. Es wurde jeweils über alle Stationen jeder Institution je Uhrzeit gemittelt. Es zeigt sich, dass es ab ca 13 Uhr (MESZ) zu einem Einbruch der Temperatur während des Schauers kommt. Dieser ist in allen Daten zu sehen, da jedes Institut im Nordwesten von Berlin eine Messstation besitzt. Bei den Daten der TU und der HTW ist er am Schwächsten, da hier nur Spandauer Straße im beeinflussten Gebiet liegt. Auch der Einfluss der städtischen Wärmeinsel zeigt sich in den Daten. Die TU und die HTW haben nur Messstationen in der Stadt, so dass die mittleren Temperaturen in der Nacht am Höchsten sind. Im Gegensatz hat die Firma Meteomedia die meisten Stationen außerhalb von Berlin, weshalb diese Stationen die niedrigsten mittleren Temperaturen haben.

Die gemittelte Abweichung der 2m-relativen Feuchte für Berlin wurde in Abbildung 5.11 in einer Karte dargestellt. Die Abbildung 5.12 zeigt den Boxplot am 21. April. Es zeigt sich, dass im Nordwesten im Einzelfall Abweichungen der relativen Feuchte von der zeitlichen mittleren relativen Feuchte von über 40% registriert wurden. Route 1 (Tegeler Forst) weist bereits vor dem Niederschlag positive relative Feuchte-Abweichungen auf. Dies liegt daran, dass der Median im

5.2 Analyse der 2m-Daten

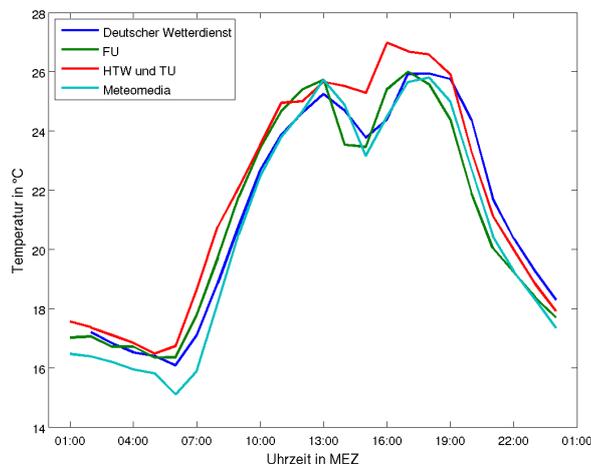


Abbildung 5.10.: Verlauf der Temperatur am 4. August 2012 je Uhrzeit gemittelt über alle Stationen der jeweiligen Institution

positiven Bereich liegt und daran, dass das Niederschlagsereignis erst am Ende der Messungen ab 13 Uhr (MESZ) stattgefunden hat. Außerdem bricht die Route ab, nachdem der Regenschauer eingesetzt hat, so dass keine Messwerte von über 40% Abweichung gemessen wurden. Route 19 im Märkischen Viertel liegt am Rande des Niederschlagsgebietes, so dass hier nur einzelne Extremwerte mit hohen positiven Abweichungen verzeichnet wurden. Von den festen Messstationen konnten höhere relative Feuchten gemessen werden, da das Messgerät geschützt angebracht ist. Bei Tegel-Forstamt (Nr. 41) zeigt sich der Einfluss des Untergrundes, so dass vor dem Niederschlag überwiegend negative Abweichungen verzeichnet wurden und erst als der Schauer einsetzte, die Messungen stark zunahmten. Die Messstation am Tegeler See (Nr. 47) im Gegensatz dazu misst bereits vor dem Schauer hohe relative Feuchten, da aufgrund des Sees immer Wasser zum Verdunsten zu Verfügung steht. Der Messstandort Eiskeller (Nr. 63) der Firma Meteomedia zeigt bereits vor dem Schauer positive Abweichungen. Bei der Betrachtung aller Messwerten (Abb. 5.7) zeigt sich jedoch, dass die Messstationen der Firma Meteomedia im Allgemeinen höhere relative Feuchten aufweisen. Auch das Messgerät an der Spandauer Straße (Nr. 52), welches im Mittel negative Abweichungen hat (Abb. 5.7), weist an diesem Tag hohe positive Abweichungen von über 40% auf.

Im Weiteren fallen die Messdaten der Messstationen Jagen91 (Nr. 50), Albrechtstraße (Nr. 54) und Köpenick (Nr. 55) auf, die, obwohl hier kein Regen verzeichnet wurde, sehr hohe positive Abweichungen haben. Jedoch liegt dies an der Lage, die bereits bei der Erklärung der Allgemeinen Abbildung 5.7 beschrieben wurden. Außerdem zeigt sich wieder, dass die Abweichungen in der Stadt überwiegend negativ sind.

Die Abweichungen der Temperatur zeigen keine großen Besonderheiten. Die Abweichungen sind größer als bei den anderen Messtagen und liegen zwischen -3 und 3K. Außerdem hat die Route 18 (Olympiastadion) hohe negative Abweichungen, die bereits bei der allgemeinen 2m Temperatureauswertung erwähnt wurden. Die Boxplotdarstellung und die dazugehörige Karte befinden sich deswegen im Anhang (Abb. A.6 und Abb. A.7).

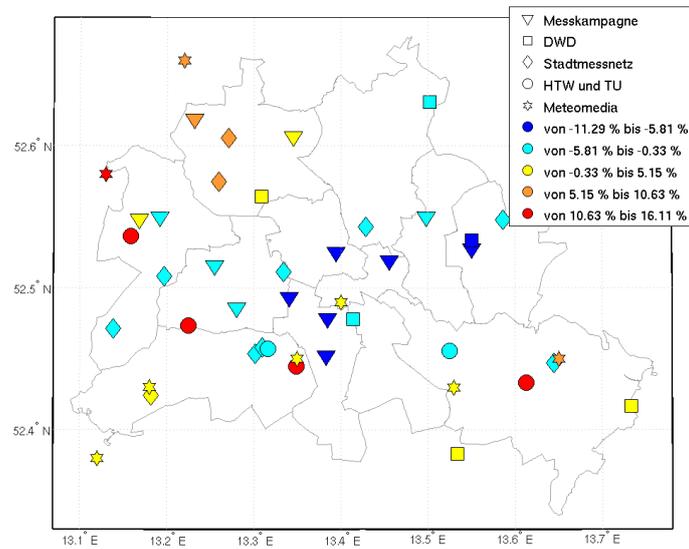


Abbildung 5.11.: Verteilung der gemittelten Abweichungen der 2m-relativen Feuchte am 4. August 2012 für Berlin

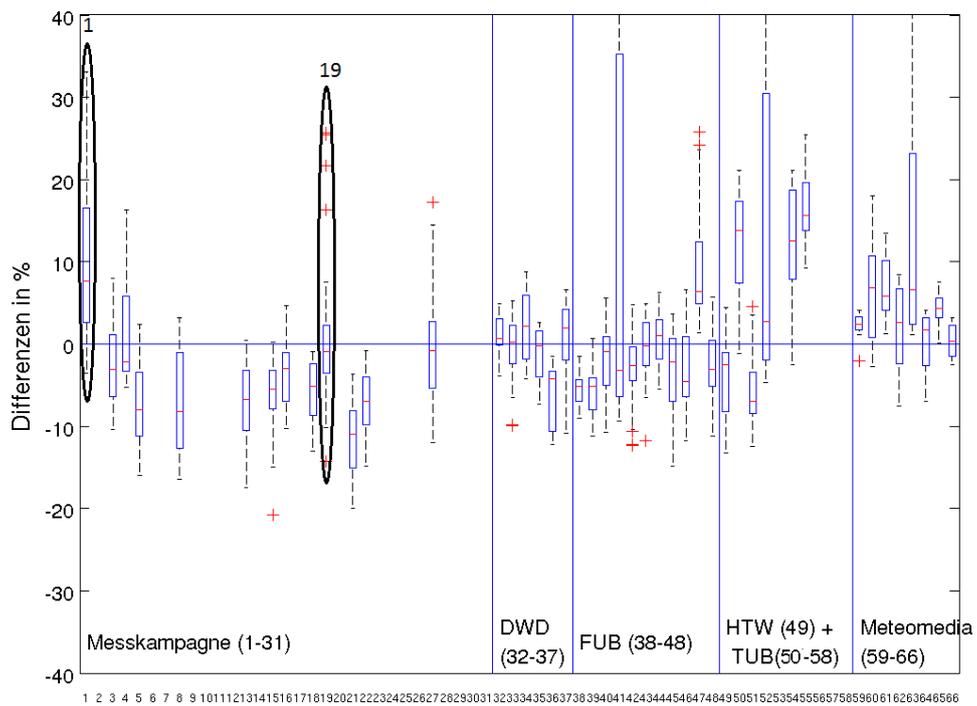


Abbildung 5.12.: Abweichungen der 2m-relativen Feuchte vom zeitlichen Mittelwert am 4. August 2012 für Berlin

Für die Auswertung aller Messdaten wurden die Zeiten mit Niederschlag herausgelassen, um die Ergebnisse nicht zu verfälschen. Da bereits ab 13 Uhr (MESZ) Niederschlag verzeichnet worden ist, gingen nur 4 Stunden in die Betrachtung mit ein. Die Boxplotdarstellung ist im Anhang dargestellt (Temperatur Abb. A.8, relative Feuchte Abb. A.9).

5.2.5. Nachtmessung vom 20. auf den 21. August 2012

Wie bereits erwähnt, werden die Nachtmessungen vom 20. August auf den 21. August 2012 separat untersucht, da die Studenten teilweise auf anderen Routen als am Tag unterwegs waren. In der Abbildung 3.16 in Kapitel 3.3.5 wurden alle Messpunkte dargestellt. Auch in dieser Nacht gab es immer wieder kurze Niederschläge.

In der Abbildung 5.13 ist der Verlauf der gemittelten Temperatur von 16 Uhr (MESZ) am 20. August bis 16 Uhr (MESZ) am 21. August 2012 dargestellt. Es wurde zum Einen über alle Messungen der Studenten je Uhrzeit gemittelt und zum Anderen auch für die einzelnen Institutionen, wobei die HTW wieder mit der TU zusammengefasst wurde. Der stark schwankende Verlauf bei

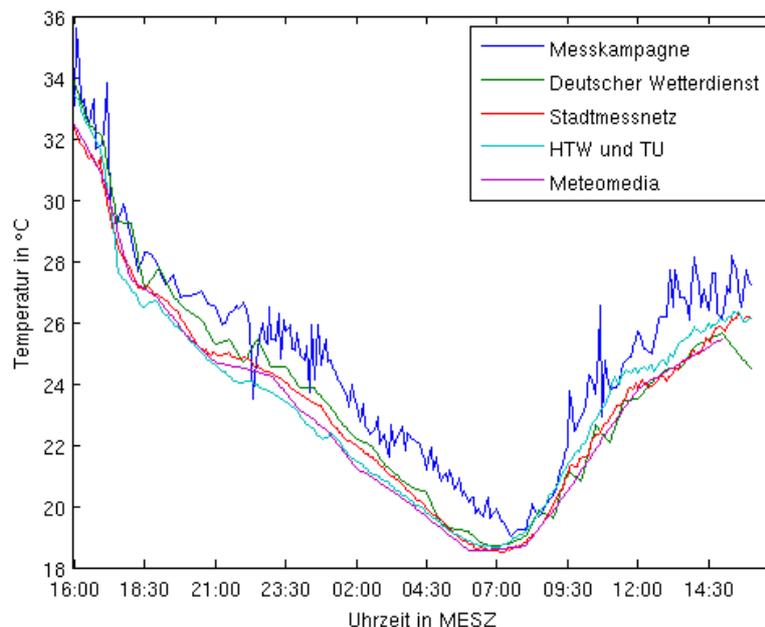


Abbildung 5.13.: Verlauf der Temperatur in der Nacht vom 20. auf den 21. August 2012. In schwarz wurden die Mittelwerte des Stadtmessnetzes der FUB eingetragen und in rot die Mittelwerte der Messkampagne.

den Messungen der Messkampagne lässt sich darauf zurückzuführen, dass je Uhrzeit im Schnitt nur 4 Messungen zur Verfügung standen und die Messgeräte der Studenten nur eine Genauigkeit von 1 °C haben. Jedoch sieht man, dass die Temperaturen von der Messkampagne nach Sonnenuntergang gegen 19:30 (MESZ) über den Temperaturen der festen Messstationen liegen. Dies zeigt den Albedoeffekt. Die festen Messstationen liegen überwiegend über Gras und die der Messkampagne über Asphalt. Durch die niedrige Albedo von Asphalt nimmt die Oberfläche im

Tagesverlauf sehr viel kurzweilige Strahlung auf und gibt diese in der Nacht in Form von langweiliger Strahlung wieder ab. Kurz nach Sonnenaufgang erwärmen sich die Grasflächen schneller als der Asphalt, so dass die festen Messstationen um ungefähr 7 Uhr (MESZ) die niedrigsten Temperaturen messen. Die Messkampagne registriert allerdings erst gegen 7:30 (MESZ) die niedrigsten Temperaturen. Am Vormittag nehmen die Temperaturen zunächst gleichmäßig zu, bevor dann die Temperaturen über Asphalt aufgrund der solaren Einstrahlung wieder höhere Werte annehmen. Es zeigt sich somit in den Messungen der Studenten kein städtischer Kälteinselleffekt.

Eine Auffälligkeit gibt es um 22:20 (MESZ). Hier fällt die Temperatur der Messkampagne unter die Temperatur der festen Messstationen. Dies liegt daran, dass zu dieser Uhrzeit von den Studenten nur ein Wert aufgezeichnet wurde und dieser wurde nach Regen in der Wuhlheide gemessen.

5.2.6. Stadt-Umland-Vergleich

Neben der Betrachtung zwischen den Daten der Messkampagne und denen der festen Messstationen werden nun die Tage um den heißesten Tag (20. August 2012) des Jahres 2012 im Vergleich zwischen Stadt und Umland von Berlin untersucht. Dafür wurden drei städtische Stationen ausgewählt: Fasanenstraße von der FU, Spandauer Straße von der TU und Kreuzberg von der Firma Meteomedia. Als ländliche geprägte Stationen wurden Station Schönefeld vom DWD und die Stationen Eiskeller und Henningsdorf-Nord vom der Firma Meteomedia genommen. In Abbildung 5.14 sind die Temperaturverläufe vom 18. August, und 20./21. August dargestellt. Da die Daten vom 19. August nicht zur Verfügung standen, wurde ein blauer Strich zur Unterteilung der Daten eingetragen. Wie erwartet, zeigt sich, dass an den Stationen Eiskeller und Henningsdorf-Nord die niedrigsten Temperaturen gemessen wurden. Die höchsten Temperaturen mit bis zu 35°C wurden innerhalb der Stadt in der Spandauer Straße und auch in der Fasanenstraße gemessen. Auffällig ist, dass am 20. August die höchsten Temperaturen nicht in der Stadt, sondern am Flughafen Schönefeld gemessen wurden. Dies könnte damit zusammenhängen, dass, obwohl die Temperatur über einer Wiese gemessen wurde, das Flugfeld mit seiner großen asphaltierten Fläche genug Wärme erzeugte, so dass dies Einfluss auf die Messstation genommen hat. Im Weiteren fällt auf, dass Fasanenstraße im Vergleich zu den anderen Stationen sich am langsamsten erwärmt. Dies könnte möglicherweise mit einer Abschattung der Station in den morgendlichen Stunden zusammenhängen. Dieser Effekt wird als städtische Kälteinsel bezeichnet. Die maximale städtische Kälteinsel (Differenz zwischen Fasanenstraße und Eiskeller) beträgt an diesen drei Tagen -4K. Jedoch zeigt sich auch der Effekt der städtischen Wärmeinsel mit einer Temperaturdifferenz von 6,6K.

In der Abbildung 5.14 ist zu erkennen, dass es am 18. August trocken war, da der Verlauf der Temperaturlinie gleichmäßig ist. Im Vergleich dazu gibt es in der Nacht vom 20. August auf den 21. August immer wieder Zacken im Temperaturverlauf. Dies liegt daran, dass es immer wieder kurz geregnet hat. Im Weiteren zeigt sich, dass die Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Land am Morgen kurz vor Sonnenaufgang am stärksten ist und sich das Land dann am schnellsten erwärmt.

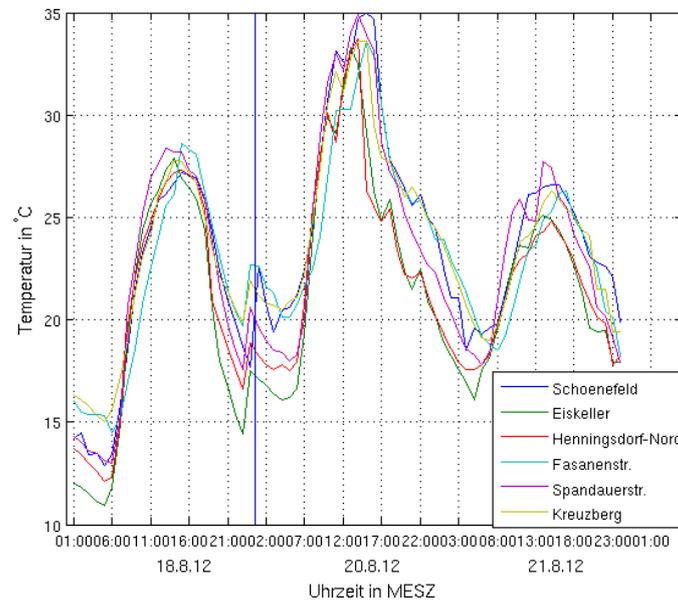


Abbildung 5.14.: Verlauf der Temperatur am 18. August, 20. August und 21. August für sechs Messstationen. Die umländlichen Messstationen sind Schönefeld (blau), Eiskeller (grün) und Henningsdorf-Nord (rot). Die Stadt wird repräsentiert durch die Stationen Fasanenstraße (türkis), Spandauer Straße (violett) und Kreuzberg (hellgrün).

5.2.7. Schlussfolgerung

Bei der Auswertung der Messkampagnendaten stellte sich heraus, dass der Range der Messungen im Vergleich zu den festen Messstationen besonders groß ist. Dies liegt zum Einen an der Messgenauigkeit der Messgeräte und zum Anderen an den unterschiedlichen Messpunkten. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Studenten überwiegend die höchsten Temperaturen und die niedrigsten relative Feuchten gemessen haben, da sie größtenteils über Asphalt gemessen haben. Dies muss bei der Validierung von METRAS berücksichtigt werden.

Die Messgeräte des DWD und der Firma Meteomedia haben den kleinsten Range und erfassen Temperaturen, die nah am zeitlichen Mittelwert liegen. Dies liegt daran, dass die Messstationen so aufgestellt werden, dass der Einfluss der direkten Umgebung möglichst gering ist.

Im Gegensatz dazu, haben die Universitäten FU und TU beide ein Stadtmessnetz, mit dem sie zum Teil große Ranges registrieren und die Messstationen deutlich von den Umgebungseffekten abhängig sind.

Bei der Nachtmessung und dem Stadt-Umland-Vergleich konnte der typische städtische Wärmeinseleffekt gezeigt werden. Außerdem zeigte sich auch der städtische Kälteinseleffekt, der sich durch die schnellere Erwärmung des Landes im Vergleich zur Stadt ergibt.

Kapitel 6

Mesoskaliges Transport- und Strömungsmodell (METRAS)

In Kapitel 5 wurden die gemessenen Daten analysiert. Im Folgenden soll nun auf den zweiten Teil der Arbeit eingegangen werden. Der zweite Teil dieser Masterarbeit beschäftigt sich damit das Mesoskalige Transport- und Strömungsmodell, METRAS, mit den gemessenen Daten zu validieren. Zunächst wird kurz auf die bei METRAS verwendeten Gleichungen und Parameterisierungen eingegangen. Anschließend werden ein paar Fakten zu METRAS genannt, bevor dann auf die Funktionsweise des Modells und in diesem Zusammenhang auf die Topographie-daten, Landnutzungsdaten und ECMWF-Daten (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) näher eingegangen wird.

Dem an der Universität Hamburg von Frau Prof. Dr. Schlünzen entwickelten dreidimensionalen Modell liegen die primitiven Gleichungen zur Erhaltung von Impuls, Masse und Energie zu Grunde [Schlünzen et al., 1996a]. Dies ist wichtig, da in einem abgeschlossenen System weder Impuls noch Masse oder Energie aus dem Nichts entstehen, bzw. sich auflösen können.

Die Gleichung zur Impulserhaltung nennt sich Bewegungsgleichung:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + 2\vec{\omega} \times \vec{v} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}p - \vec{\nabla}\phi^{(s)} + \frac{1}{\rho}\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathbb{F}}_{N.S.} \quad (6.1)$$

Dabei ist \vec{v} der Geschwindigkeitsvektor, $\vec{\omega}$ die Winkelgeschwindigkeit der Erde, $\vec{\nabla}$ der Nabla Operator, ρ die Dichte, p der Luftdruck und t die Zeit. ϕ ist das Geopotential und $\vec{\mathbb{F}}_{N.S.}$ ist der Navier-Stokes'sche Reibungstensor. Der letzte Term mit dem Navier-Stokes'schen Reibungstensor ist wichtig, da mit ihm Impuls durch Reibung in Wärmeenergie umgewandelt wird.

Die Masse wird mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung konstant gehalten:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \vec{\nabla} \times \vec{v} = 0 \quad (6.2)$$

Diese besagt, dass die zeitliche Änderung der Dichte nur durch eine räumliche Verschiebung verursacht werden kann.

Die dritte Gleichung der primitiven Grundgleichungen ist der 1. Hauptsatz der Thermodynamik:

$$\frac{de}{dt} + p \frac{dv}{dt} = \frac{\delta q}{dt} \quad (6.3)$$

Beim 1. Hauptsatz ist e die spezifische innere Energie, v das spezifische Volumen und q die spezifische zugeführte Wärme. Diese stellt sicher, dass die Energie erhalten wird.

Neben den Grundgleichungen werden noch einige Annahmen benötigt. Zunächst muss das Atmosphärenmodell inelastisch sein. Ansonsten würden sich die Wellen im System so stark verstärken, dass es zusammenbricht. Im Weiteren wird die Boussinesq-Approximation angewendet.

Die ideale Gasgleichung

$$pV = mRT \quad (6.4)$$

und die Definition der potentiellen Temperatur

$$\theta = T \left(\frac{10000hPa}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (6.5)$$

sind weitere Annahmen die gemacht werden; wobei p wieder für den Druck, V für das Volumen, m für die Masse und T für die Temperatur steht. R ist die spezifische Gaskonstante. Im Weiteren ist θ die potentielle Temperatur und c_p die spezifische Wärmekapazität von Luft bei konstantem Druck.

Das Koordinatensystem ist bodenfolgend. In Abbildung 6.1 ist dies im Bezug zu einem Berg dargestellt. Auf der linken Seite ist die Höhe z in Meter eingetragen und auf der rechten Seite die Höhe im Bezug zum Boden. Im Gegensatz zu einem karthesischen Koordinatensystem umströmen die Höhenlinien den Berg und schneiden diesen nicht. Dies vereinfacht die Berechnung, da ein Berg ein Hindernis darstellt, das die Luft überströmen muss.

Im Weiteren wird mit einer nicht-äquidistanten Gitterweite gerechnet. Dies bedeutet, dass in wichtigen Gebieten die Gitterweite reduziert werden kann, um das Gebiet höher aufzulösen. Die minimale, vertikale Gitterweite beträgt dabei 10m. Gerechnet wird auf einem Arakawa-C-Gitter. Da dieses Atmosphärenmodell dazu bestimmt ist, kleine Bereiche, wie eine Stadt oder ein Gebirge aufzulösen, kann der Coriolisparameter konstant gehalten werden. Außerdem ist das Modell deswegen nicht hydrostatisch, da bei hydrostatischen Modellen die Vertikalgeschwindigkeit eines Luftteilchens gleich Null ist. Auf kleinen Skalen ist es allerdings wichtig, diesen vertikalen Transport zu berücksichtigen.

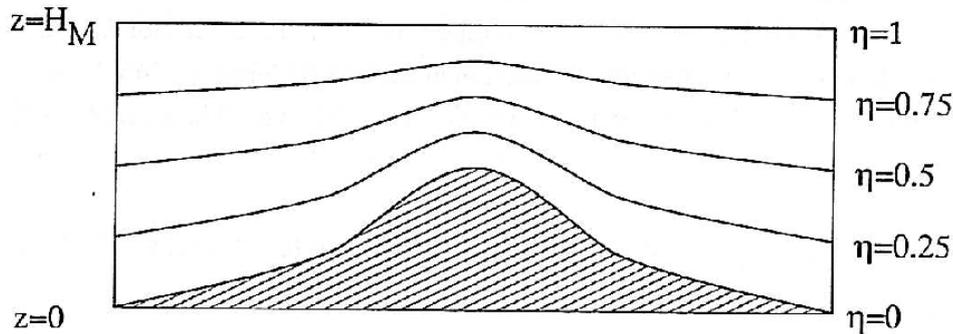


Abbildung 6.1.: Bodenfolgende Koordinaten. Die linke Achse zeigt die Höhe in Meter und die rechte Achse die bodenfolgenden Höhenlinien [Dierer, 1997].

Die Gitterpunktweite ist jedoch für kleine Prozesse wie Turbulenzen, Impulsflüsse und Strahlung immer noch zu groß, so dass diese Prozesse parametrisiert werden müssen. Die Parametrisierung erfolgte meistens mit der Schließung über die erste Ordnung.

Für die Wolkenparametrisierung wird das Kessler Schema angewendet [Kessler, 1969]. Dabei haben Wolkentropfen einen mittleren Radius von $10\mu\text{m}$ und Regentropfen einen mittleren Radius von $100\mu\text{m}$, die Trennung zwischen Wolken- und Regentropfen geschieht bei $40\mu\text{m}$. Die Marshall und Palmer Verteilung wird für das Regentropfenspektrum verwendet. Es muss beachtet werden, dass bei Verwendung dieses Schemas die Wolken- und Regentropfenbildung überschätzt wird [Lüpkes, 1991].

Evaluiert wurde METRAS in der Arbeit von [Dierer, 1997]. Eine genauere Beschreibung von diesem Modell befindet sich in der Dokumentation [Schlünzen et al., 1996a] und im Handbuch [Schlünzen et al., 1996b] von METRAS.

6.1. Eingangsdaten von METRAS

Nachdem die Modellgleichungen und Annahmen beschrieben wurden, wird nun auf die Eingangsdaten eingegangen. Um METRAS starten zu können, werden zum Einen Landnutzungsdaten und Topographiedaten und zum Anderen ECMWF-Daten (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) benötigt. Diese Daten müssen in einer möglichst großen Auflösung zur Verfügung stehen. Da die Auflösung der meteorologischen Daten für eine Berechnung von stadtklimatischen Effekten zu gering ist, muss ein Nestingverfahren angewendet werden, das zusammen mit den ECMWF Analyses Daten erklärt wird.

6.1.1. Landnutzungsdaten und Topographiedaten

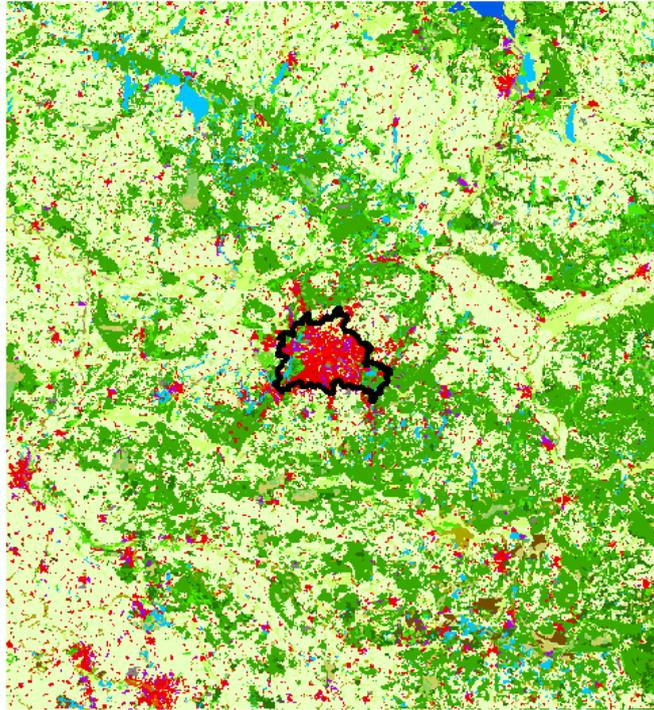
Das Projekt CORINE Land Cover (CLC) stellt Landnutzungsdaten für ganz Europa zur Verfügung. Das Projekt wird von der Europäischen Union gefördert, wobei CORINE für „Coordination of Information on the Environment,“ steht. Zur Einordnung der Landnutzungsklassen wurden Satellitendaten verwendet. Für Deutschland gibt es 37 Klassen, die in Abbildung 6.2 aufgelistet sind. Außerdem ist in Abbildung 6.2 der verwendete Datenausschnitt für Berlin und Brandenburg dargestellt.

Da in Städten die Bodenbedeckung besonders heterogen ist, muss bei stadtklimatischen Berechnungen besonders auf eine möglichst hohe Auflösung der Daten geachtet werden. Neben der Möglichkeit mit Satelliten Daten zur Landoberfläche zu erhalten, gibt es die Möglichkeit selber Erkundungsfahrten zu machen. Hierbei können einzelne Gebiete sehr gut beschrieben werden. Doch ist dieses Vorgehen bei größeren Gebieten sehr zeitaufwändig. Bei Städten wie Berlin gibt es bereits Landnutzungsklassentabellen, die z.B. die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt bereitstellt (siehe Abb. 6.3).

Um diese Landnutzungs-Tabellen mit METRAS verwenden zu können, müssen sie erst überarbeitet werden. So müssen jeder Landnutzungs-klasse bestimmte Oberflächeneigenschaften zugeordnet werden. Es ist vom Bodentyp abhängig, wie stark die Reflexion und der Wärmetransport sind und wieviel Feuchtigkeit der Oberfläche zum Verdunsten zur Verfügung steht. Bei METRAS gibt es 734 Klassen, davon wurden folgende 28 Bodeneigenschaften für Berlin ausgewählt:

- Häuserhöhe: > 11,5 Meter oder < 11,5 Meter
- Bodenbeschaffenheit: nackter Boden, Sand, Kies, Asphalt, Beton, Stein / Pflaster oder Stahl
- Bewuchs: kurzes, trockenes bzw. bewässertes Gras, langes Gras, Heide, trocken bzw. bewässerte Büsche, Sträucher oder Wald
- Nutzung der Fläche: Ackerland (auf Sand), gemischte Landnutzung, Laubwald, Nadelwald oder Mischwald (trocken oder feucht)
- Wasserflächen: fließendes oder stehendes Frischwasser

Für diese Arbeit wurden die Oberflächeneigenschaften mit Hilfe von Google Street View ergänzt. Der Hauptvorteil bei der Verwendung von Google Street View ist, dass man sich nicht vor Ort ein Bild machen muss. Die Nachteile sind, dass die Einschätzung sehr subjektiv ist, da aufgrund der großen Anzahl von Gebieten einer Landnutzungs-klasse nicht alle betrachtet werden können. Es werden nur drei oder vier Gebiete je Landnutzungs-klasse angeschaut um die Oberflächeneigenschaften für jede Klasse zu bestimmen. Dies wird dann für alle Gebiete dieser Landnutzungs-klasse angenommen. Zusätzlich können unterschiedliche Arten von Oberflächen in eine Landnutzungs-klasse fallen. In Berlin fiel besonders die Klasse Berliner Stadtreinigung auf. Zu dieser Klasse zählen sowohl das Klärwerk mit sehr viel Wasseroberfläche als auch die Recyclinghöfe mit fast nur versiegelter Fläche. Hier musste eine grobe Abschätzung vorgenommen werden. Für eine genauere Beschreibung wird auf die Arbeit „From Land-Use to Surface Cover for Mesoscale Atmospheric Models,“ verwiesen. [Flagg et al., in Bearbeitung]



BEBAUTETE FLÄCHEN

STÄDTISCH GEPRÄGTE FLÄCHEN

- 111 Durchgängig städtische Prägung
- 112 Nicht durchgängig städtische Prägung

INDUSTRIE-, GEWERBE- UND VERKEHRSFLÄCHEN

- 121 Industrie- und Gewerbeflächen
- 122 Straßen, Eisenbahn
- 123 Hafengebiete
- 124 Flughäfen

ABBAUFLÄCHEN, DEPONIEREN und BAUSTELLEN

- 131 Abbauflächen
- 132 Deponien und Abraumhalden
- 133 Baustellen

GRÜNFLÄCHEN

- 141 Städtische Grünflächen
- 142 Sport- und Freizeitanlagen

LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN

ACKERFLÄCHEN

- 211 Nicht bewässertes Ackerland

DAUERKULTUREN

- 221 Weinbauflächen
- 222 Obst- und Beerenobstbestände

GRÜNLAND

- 231 Wiesen und Weiden

HETEROGENE LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN

- 242 Komplexe Parzellenstrukturen
- 243 Landwirtschaft und natürliche Bodenbedeckung

WÄLDER UND NATURNAHE FLÄCHEN

WÄLDER

- 311 Laubwälder
- 312 Nadelwälder
- 313 Mischwälder

STRAUCH- UND KRAUTVEGETATION

- 321 Natürliches Grünland
- 322 Heiden und Moorheiden
- 324 Wald- Strauch- Übergangsstadien

OFFENE FLÄCHEN OHNE / MIT GERINGER VEGETATION

- 331 Strände, Dünen und Sandflächen
- 332 Felsflächen ohne Vegetation
- 333 Flächen mit spärlicher Vegetation
- 334 Brandflächen
- 335 Gletscher und Dauerschneegebiete

FEUCHTFLÄCHEN

FEUCHTFLÄCHEN IM LANDESINNERN

- 411 Sümpfe
- 412 Torfmoore

FEUCHTFLÄCHEN AN DER KÜSTE

- 421 Salzwiesen
- 423 In der Gezeitenzone liegende Flächen

WASSERFLÄCHEN

WASSERFLÄCHEN IM LANDESINNERN

- 511 Gewässerläufe
- 512 Wasserflächen

MEERESGEWÄSSER

- 521 Lagunen
- 522 Mündungsgebiete
- 523 Meere und Ozeane
- Flächen außerhalb des Bearbeitungsgebietes

Abbildung 6.2.: Corine-Landnutzungsklassen mit den dazugehörigen Klasseneinteilungen¹

¹http://www.corine.dfd.dlr.de/intro_en.html

Straßendefinition mit ArcMap

Bei den Landnutzungsdaten der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt ist Berlin nur in Teilblöcke und Blöcke eingeteilt gewesen, so dass die Straßen keiner Klasse zugeordnet waren. Dies hätte eine starke Verfälschung der Ergebnisse bewirkt, da gerade Straßen durch ihre Versiegelung der Oberfläche einen starken Einfluss auf das lokale Klima haben. Die Zuordnung der Straßen erfolgte folgendermaßen: Zunächst wurde bei ArcMap eine Datei geöffnet, die die Umrisse der Stadtbezirke in Berlin darstellt. Mit Hilfe von ArcMap wurden die einzelnen Bezirke zu einer Fläche zusammengefügt, die nun Gesamt-Berlin zeigt. Als nächstes wurden die Landnutzungsdaten von Berlin eingelesen. Die Teilblöcke und Blöcke von Berlin wurden dann von der Gesamtfläche von Berlin abgezogen. Übrig blieben die nicht definierten Straßen. Diese wurden zunächst abgespeichert und anschließend zusammen mit den vorhandenen Landnutzungsklassen wieder eingelesen und zusammengefügt. Abschließend wurde den Straßen eine extra Klasse zugewiesen. In Abbildung 6.3 sind jetzt die Teil- und Blöcke von Berlin mit den Straßen dargestellt.

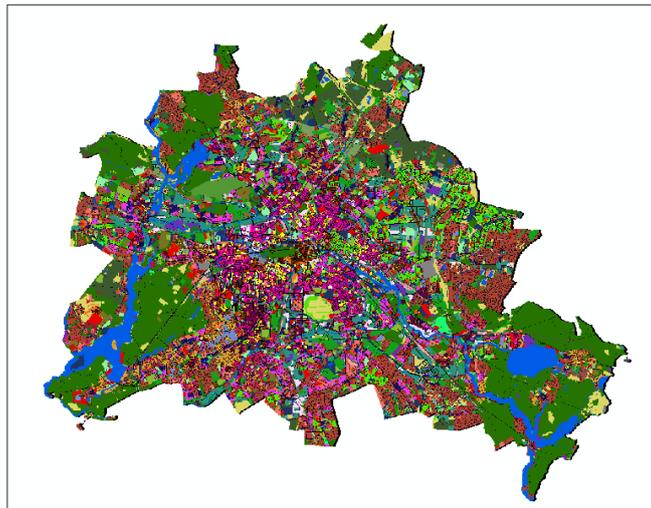


Abbildung 6.3.: Landnutzungsklassen von der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt

Topographiedaten

Die Topographiedaten werden kostenlos vom International Centre for Tropical Agriculture (CI-AT) [Jarvis et al., 2006] zur Verfügung gestellt. Das International Centre for Tropical Agriculture stellt sie mit einer 90m Auflösung für die ganze Welt zur Verfügung. Dabei wurden fehlende Daten interpoliert. In Abbildung 6.4 ist die Topographie von Deutschland dargestellt.

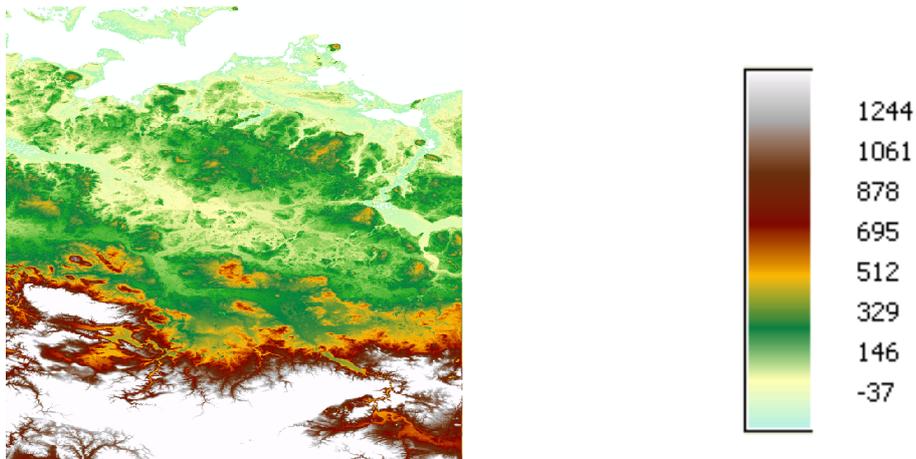


Abbildung 6.4.: Topographie von Deutschland [m]

6.1.2. ECMWF-Daten und Nestingverfahren

Zur Berechnung der Daten mit METRAS werden Eingangsparameter benötigt. Für diese Arbeit werden die Analyse-Daten vom ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, England) verwendet. Die Daten haben eine räumliche Auflösung von T1279. Dies entspricht am Äquator ca. 15km Abstand zwischen den Gitterpunkten. Die zeitliche Auflösung sind 6 Stunden. Da diese Auflösung zu grobskalig ist um sie als Eingangsparameter für ein 200m x 200m Gitter zu verwenden, muss zunächst ein Nestingverfahren angewendet werden. Bei diesem werden die Daten zunächst auf ein 4km Gitter gewichtet, dann auf ein 1km Gitter und abschließend auf das 200m Gitter interpoliert. Dargestellt sind die Gebietsgrößen in Abbildung 6.5.

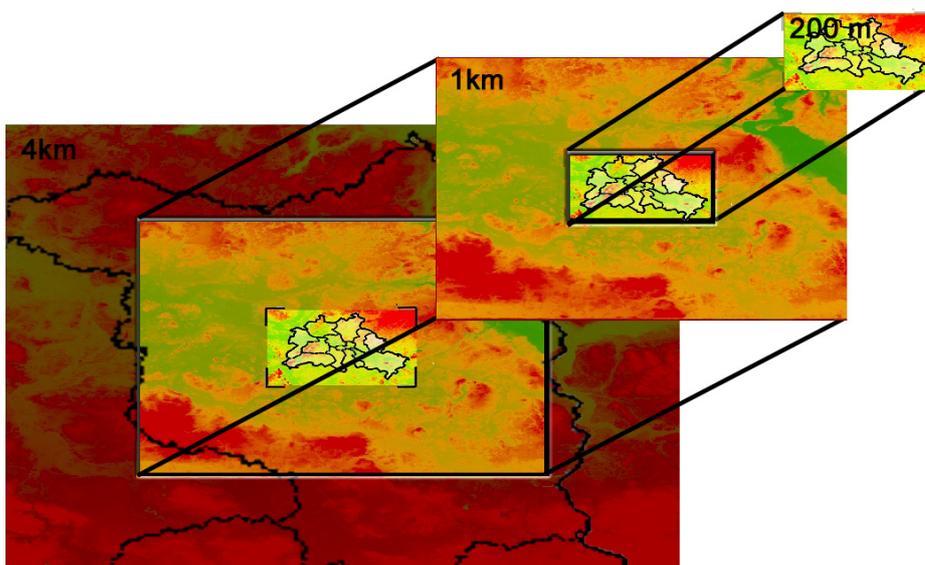


Abbildung 6.5.: Größe der Gebiete mit einem Gitterpunktabstand von 4km, 1km und 200m

Beim Nestingverfahren wird ein hochaufgelöstes Modell, in dieser Arbeit das mesoskalige Modell METRAS, in ein globales Modell (Global Climate Modell (GCM)) genestet oder auch eingestet. Dies wird gemacht, um lokale Effekte simulieren zu können, wie die städtische Wärmeinsel oder orographische Effekte [Beck und Stadlbacher, 2004]. Für diese Effekte wird die feinskalige Auflösung des regionalen Klimamodell (RCM) gewünscht; allerdings wäre die Rechenzeit zu lang, um global mit einem RCM zu rechnen. Beim Nesting werden die Daten vom GCM als Randdaten an das RCM übergeben [Harris und Durran, 2009].

6.2. Anleitung zur Verwendung von METRAS

Im Folgenden werden die Schritte genannt, die benötigt wurden, um METRAS zu starten. Zuerst muss METRAS heruntergeladen, kompiliert, initialisiert und gestartet werden. Dann werden Analyses Daten vom ECMWF benötigt. Diese können mit einem Skript geholt werden. Dazu muss man sich zunächst mit dem Benutzernamen und Passwort anmelden:

```
ssh -X username@ecaccess.ecmwf.dkrz.de
```

Das Skript heißt `getmar_metras.sh`. Es muss der Tag und das Verzeichnis, in dem die Daten abgelegt werden sollen, im Skript geändert werden. Bevor das Skript gestartet wird, ist es empfehlenswert, `sshkeys` anzulegen. Wie dies funktioniert, ist im Hilfewiki beschrieben.

```
www.geo.fu-berlin.de -> Internes -> Wissenschaftliches Rechnen -> Hilfewiki
```

Dann kann das Skript mit dem folgenden Befehl gestartet werden:

```
nohup .getmar_metras.sh &
```

Mit dem Befehl `nohup` wird die Ausgabe in die Datei `nohup.out` umgelenkt und kann mit `cat` angeschaut werden. Dies ist hilfreich, um sich abmelden zu können oder auch um die Ausgabe später noch einmal anzuschauen, ob alles funktioniert hat.

Wenn mit einem Datum nach Mai 2011 gerechnet wird, müssen die Daten vom Grib2 Format ins Grib1 Format umgewandelt werden. Dazu muss zunächst folgendes Modul gestartet werden.

```
'grib_api/gfortran-4.3.2/1.9.16'
```

Die Umwandlung funktioniert dann mit dem Befehl:

```
grib_set -s edition=1 <infile> <outfile>
```

Diese Daten müssen nun auf das Computersystem Blizzard vom Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) kopiert werden. Dort kann dann mit dem `ecmwfscript.sh` das richtige Gebiet ausgeschnitten werden. Es muss darauf geachtet werden, dass zum Zuschneiden alle Tage gleichzeitig zugeschnitten werden

```
.ecmwfscript.sh date1 date2 date3
```

Diese zugeschnittenen Daten werden mit dem `ecmwf_TAPE5` weiter verarbeitet. Hierfür werden zusätzlich noch GA-Files benötigt, in denen die Topographiedaten und die Landnutzungsdaten verarbeitet wurden. Außerdem werden noch die Werte der Meeresoberflächentemperaturen und die Meer/Landverteilungsmaske benötigt. Die Meeresoberflächentemperaturen stehen unter `ftp://ftp.emc.ncep.noaa.gov/cmb/sst/oisst_v2/` als wöchentliche Mittelwerte am Mittwoch zur Verfügung. Es wurde jeweils der Mittwoch vor dem Samstag, an dem die Messkampagne stattgefunden hat, gewählt. Diese Daten werden alle in das Skript `ecmwf_TAPE5` eingetragen. Gestartet wird nicht das `ecmwf_TAPE5`, sondern das `job_ecmwf.ll` mit `llsubmit`. Dieses startet das `ECMWF.P6`, welches auf das `ecmwf_TAPE5` zugreift.

Von den Ergebnissen wird die `m1tini_TAPE5_force` Datei benötigt. Diese ist das Skript für das 1D-Modell. Es muss noch mit den Topographiedaten, den Outputfiles, dem Datum und der Jahreszeit noch weiter angepasst und zum Schluss als `m1tini_TAPE5` abgespeichert werden. Es werden die beiden `job_ibm` und `m1tini.P6` zum Starten des Modells benötigt.

Jetzt kann das 3D Modell gestartet werden. Dazu muss das `ME_PE_TAPE5` angepasst und als `m3tras_TAPE5` abgespeichert werden. Unter `TAPE50` muss der Pfad zu den Ergebnissen vom 1D Modelllauf stehen. Außerdem wird auch hier der GA-File benötigt. Zusätzlich muss noch der Pfad zum Ergebnis des `job_ecmwf.ll` eingetragen werden. Außerdem ist darauf zu achten, dass das `m3tras_TAPE1` vorhanden ist, denn dieses wird beim 3D Lauf angepasst und wird anschließend beim Nesting benötigt.

Nachdem `job_m3tras_ll` wieder mit `llsubmit` gestartet wurde, müssen die Ergebnisdateien zu einer Datei zusammengefasst werden. Dies funktioniert mit folgendem Befehl:

```
cat 'ls BP*_AG | head -2 | tail -1 ' BP*<wiederholende Zahlenfolge>*. *[\^ AG] >  
<outfile>
```

Als nächstes musste für diese Arbeit genestet werden. Dazu wird das `m3tm3t.P6` mit dem dazugehörigen `job_ll` und dem dazugehörigen `m3tm3t_TAPE5` benötigt. Zusätzlich muss wieder das `m1tini_TAPE5` vorhanden sein, da dieses wieder überschrieben wird und im Anschluss für den nächsten Start des 1D Modelllaufs benutzt wird. Das Ergebnis, eine Datei die mit `BF` beginnt, wird danach wieder beim 3D Modelllauf verwendet.

Zusätzlich ist es wichtig, bereits ab dem ersten Schritt die Ergebnisse auf ihre Richtigkeit zu untersuchen. Mit folgendem Befehl können die BP-Ergebnisse (binary-files) in `netcdf`-Dateien umgewandelt werden.

6.2 Anleitung zur Verwendung von METRAS

```
~u232013/bin/blizzard/m2cdf
```

Dieser Befehl funktioniert allerdings nur, wenn man sich auf dem Rechner Blizzard befindet. Mit `ncview` können dann die Ergebnisse untersucht werden. Besonders wichtig ist, dass die Randdaten mit den Forcingfiles (den BF-Dateien) übereinstimmen.

Die zweite Möglichkeit besteht darin, die Daten mit Matlab zu untersuchen. Dazu wird von der Universität Hamburg eine Memitoolbox zur Verfügung gestellt. Um sie verwenden zu können, muss zunächst ein Lesezugang in Hamburg eingerichtet werden. Für die Installation gibt es drei Varianten, wobei die Installation mit bearbeitbarem Quellcode empfohlen wird. Nach Erhalt des Lesezugangs wird die Memitoolbox heruntergeladen. Dies funktioniert mit folgendem Pfad:

```
svn co https://svn-zmk.zmaw.de/svn/memi_toolbox/trunk  
~/matlab/memi_toolbox -username=forname.lastname
```

Im Anschluss muss die Toolbox in den Suchpfad von Matlab gespeichert werden. Danach kann sie gestartet werden.

```
run('~/matlab/memi_toolbox/memi_toolbox.m')
```

Die wichtigsten Befehle sind:

```
bp2mat - Umwandlung der BP-Dateien in Matlabdateien  
bp_open - Öffnen der Matlabdateien  
memi_calc - Berechnung der Temperatur und der Oberflächentemperatur  
plot_bp - Darstellen der Variablen
```

Weitere Befehle und die genaue Anwendung können mit der Hilfefunktion von Matlab angeschaut werden. Diese wird mit folgendem Pfad im Matlabbefehlsfenster installiert:

```
cd ~/matlab/memi_toolbox/ ; bulddocseachdb(['pwd'/html'])
```

Es gibt auch ein zusätzliches Hilfewiki zu der Memitoolbox. Der Link dazu heißt:

```
https://code.zmaw.de/projects/memi-toolbox
```

Dafür muss man sich auf <https://code.zmaw.de> registrieren.

Kapitel 7

Vergleich simulierter Daten von METRAS mit den Daten der Messkampagne

Im vorherigen Kapitel 6 wurde das MEsokalige TRAnsport- und Strömungs-Modell METRAS beschrieben. Anschließend wurden die für das Modell notwendigen Eingangsdaten aufgeführt. Außerdem wurde eine Anleitung zur Verwendung von METRAS erstellt. Nun sollen in diesem Kapitel die Modelldaten von METRAS mit den gemessenen Daten verglichen werden.

Dazu wurden die drei Tage, an denen die Studenten keinen Niederschlag aufgezeichnet haben, mit dem Modell METRAS simuliert (2. Juni, 18. August und 1. September 2012). Die beiden Tage mit Niederschlag (21. April und 4. August 2012) wurde bereits im Kapitel 5 analysiert, da das Modell die Niederschläge nicht zum exakten Zeitpunkt am exakten Ort simulieren würde und dabei größere Differenzen entstehen würden.

Da die METRAS-Daten nur in 10m Höhe zur Verfügung stehen, soll zunächst untersucht werden, wie groß Abweichungen zwischen 2m und 10m Höhe sind. Dazu werden die 2m-Temperatur am Flughafen Tempelhof mit der 10m-Temperatur am Flughafen Tempelhof verglichen, da dort keine 10m-Temperaturen gemessen werden. Außerdem gibt es noch einen Abschnitt über den Vergleich der Lagepunkte der Messstationen und der Gitterpunkte des Modells. Nach der Auswertung der 2m-Temperatur für die drei Tage wird zusätzlich noch die simulierte Oberflächentemperatur im Vergleich zur Bodenbeschaffenheit analysiert. Außerdem werden die Oberflächentemperaturen noch mit den Satellitendaten von MODIS verglichen.

Die Modelldaten sind lokale Sonnenzeitdaten (LST). Das bedeutet, dass im Modell um 12 Uhr der Sonnenhöchststand angenommen wird. Deswegen werden die Modelldaten im Folgenden mit den gemessenen Daten in Mitteleuropäischer Zeit (MEZ) verglichen.

7.1. Vergleich der 2m- mit den 12m-Temperaturdaten am Flughafen Tempelhof

Für den Vergleich der 2m- mit der 12m-Temperatur am Flughafen Tempelhof wurden die Jahre 2006 bis 2010 analysiert. Die Abbildung 7.1 stellt die jährlich gemittelte 2m und 12m-Temperaturen

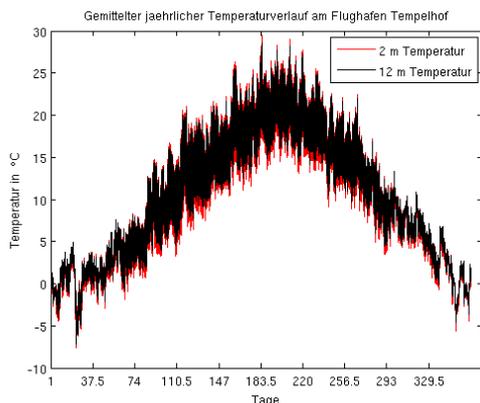


Abbildung 7.1.: Über die Jahre 2006 bis 2010 täglich und stündlich gemittelter Temperaturverlauf am Flughafen Tempelhof für die 2m und die 12m-Temperatur

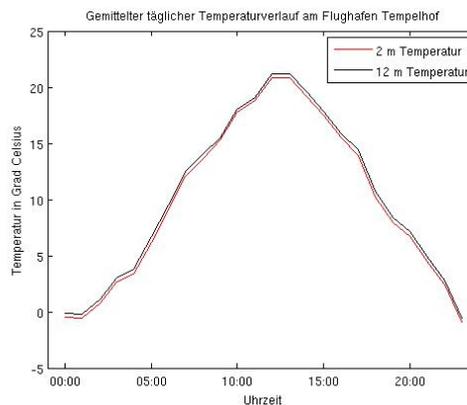


Abbildung 7.2.: Gemittelter Temperaturtagesgang in MEZ für die Jahre 2006 bis 2010 am Flughafen Tempelhof. In rot sind die 2m und in schwarz die 12m-Temperaturen eingetragen

dar. Es zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen den 2m- und den 12m Temperaturen sehr gering sind und somit die in 2m gemessenen Daten mit den von METRAS in 10m Höhe

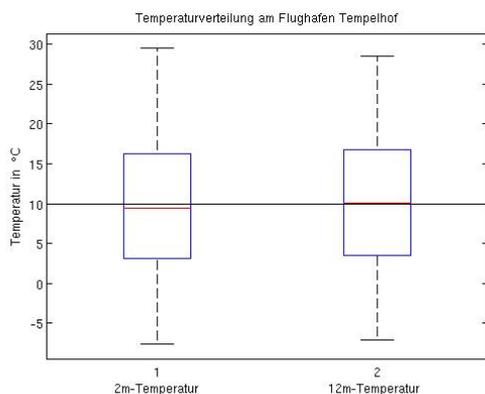


Abbildung 7.3.: Verteilung der Temperaturmesswerte in 2m Höhe und 12m Höhe am Flughafen Tempelhof

simulierten Daten verglichen werden können. In Abbildung 7.2 wurden alle Daten auf einen Tagesgang gemittelt. Wobei die rote Linie wieder die 2m-Temperatur und die schwarze die 12m-Temperatur darstellt. Es zeigt sich, dass im Mittel die 2m-Temperatur geringer als die 12m-Temperatur ist.

Auch bei der Verteilung der Messwerte zeigt sich in Abbildung 7.3, dass der Median von den 2m-Temperaturen geringer ist als von den 12m-Temperaturen. Allerdings liegen beide ungefähr bei 10 °C. Dies ist der typische Mittelwert für Berlin. Im Weiteren zeigt sich, dass der Range in 2m Höhe etwas größer als in 12m Höhe ist. Dies liegt daran, dass am Boden die Temperaturschwankungen aufgrund

der solaren Einstrahlung und terrestrischen Ausstrahlung größer sind als in 12m. Zur statistischen Analyse wurden in Abbildung 7.4 die 12m-Temperaturen den 2m-Temperaturen gegenüber gestellt. Es zeigt sich, dass sie eine sehr gute Korrelation von 0.995 haben. Der mittlere absolute Fehler berechnet sich auf 0.64 und der root square mean error (RSME) auf 0.95. Das zeigt, dass die Abweichungen zwischen den 2m und den 12m-Temperaturen sehr gering sind.

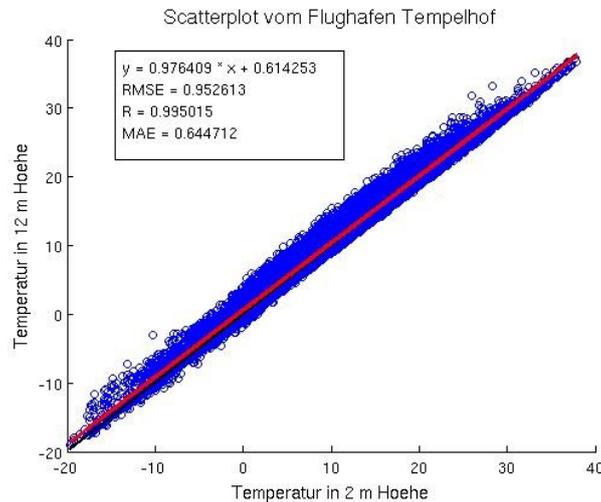


Abbildung 7.4.: Vergleich der 2m mit den 12m-Temperaturen °C am Flughafen Tempelhof für die Jahre 2006 bis 2012. Außerdem sind der RMSE, die Korrelation und der mittlere absolute Fehler berechnet.

Zusätzlich wurden die Daten in Sommerhalbjahr (April bis September) und Winterhalbjahr (Oktober bis März) aufgeteilt. Bei der Gegenüberstellung der 2m- und der 12m-Temperaturen zeigt sich, dass im Winterhalbjahr (Abb. 7.5a) die Korrelation, der RMSE und auch der MAE kleiner bzw. besser als in der Betrachtung vom gesamten Jahr ist. Dies liegt daran, dass die solare Einstrahlung im Winterhalbjahr geringer ist. Im Gegensatz dazu ist im Sommerhalbjahr in Abbildung 7.5b der MAE und RMSE größer als im Winter und auch größer als in der Betrachtung aller Messwerte. Deswegen ist auch die Korrelation der Werte schlechter. Jedoch sind die Fehler mit 0,78 für den mittleren absoluten Fehler MAE und mit 1,09 für den Root Mean Square Error (RMSE) immer noch sehr gering, so dass auch im Sommer die 2m- mit der 12m- bzw. 10m-Temperatur verglichen werden kann. Es zeigt sich in Abbildung 7.5b, dass die Abweichungen zwischen der 2m und der 12m-Temperatur vor allem bei den hohen und niedrigen Werten auftreten. So nimmt die Temperatur in 2m Höhe sowohl höhere als auch niedrigere Werte an als in 12m.

Als Letztes wurde ein Vergleich der 2m- und der 12m-Temperaturen am heißesten Tag und am kältesten Tag des Zeitraums betrachtet. In der kältesten Nacht des Zeitraums am 7. Januar 2009 wurde das Wetter durch ein Hochdruckgebiet bestimmt. Da es davor heftige Schneefälle gab, konnte die Lufttemperatur über der Schneedecke besonders stark auskühlen. In Abbildung 7.6a zeigt sich, dass die Temperaturen auf fast -20°C gesunken sind. Dabei sieht man, dass die Temperaturen am Boden aufgrund der hohen Ausstrahlung über Schnee niedriger sind als in 12m

7.1 Vergleich der 2m- mit den 12m-Temperaturdaten am Flughafen Tempelhof

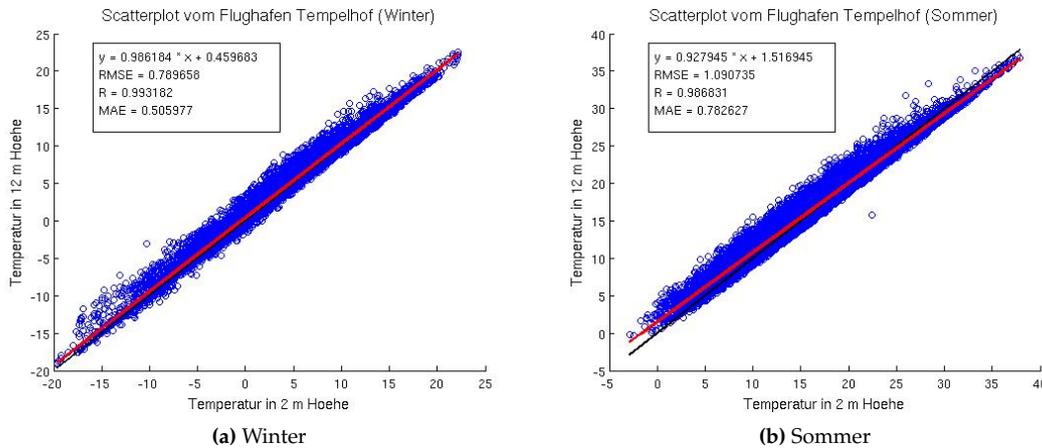


Abbildung 7.5.: Vergleich der 2m mit den 12m-Temperaturen in °C am Flughafen Tempelhof für die Jahre 2006 bis 2012 für das Winterhalbjahr von Oktober bis März. Außerdem sind der RMSE, die Korrelation und der mittlere absolute Fehler berechnet.

Höhe. Während des Tages weisen die 2m- und die 12m-Temperaturen die gleichen Werte auf. Dies liegt daran, dass die Albedo von frischem Schnee sehr hoch ist, so dass die Sonneneinstrahlung direkt reflektiert wird und sich die bodennahen Schichten nur sehr langsam erwärmen. Nach Sonnenuntergang sinken die Temperaturen am Boden wegen der Ausstrahlung schneller als in 12m Höhe. Wie bei der Darstellung der Messwerte für das Winterhalbjahr (Abb. 7.5a) ist der mittlere absolute Fehler mit 0.5 sehr gering.

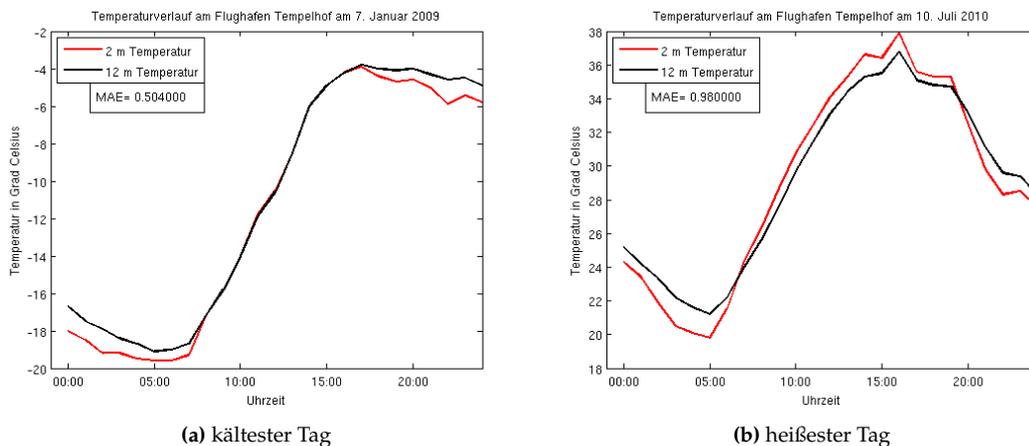


Abbildung 7.6.: Vergleich der 2m mit den 12m-Temperaturen am Flughafen Tempelhof für den kältesten Tag (7. Januar 2009) und den heißesten Tag (10. Juli 2010) für den Zeitraum von 2006 bis 2012. Außerdem wurde der MAE berechnet.

Im Gegensatz zum Winter zeigt sich in Abbildung 7.6b der typische Verlauf für einen heißen sommerlichen Tag. Am 10. Juli 2010 stieg die 2m-Temperatur auf fast 40 °C. Wie bereits erwähnt, sind die Temperaturschwankungen in tiefen Luftschichten wegen den Bodeneigenschaften, der die solaren Einstrahlung absorbiert und als terrestrischen Ausstrahlung emittiert, größer als in den hohen Luftschichten. Deswegen nimmt die Temperaturdifferenz zwischen 2m und 12m bis zum

Sonnenaufgang immer weiter zu. Danach steigt allerdings die Temperatur in 2m Höhe schneller als in 12m, sodass die Temperaturdifferenz sich umkehrt und kurz nach Sonnenhöchststand wieder ein Maximum erreicht.

7.2. Vergleich der Gitterpunkte mit den Lagepunkten aller Messwerte

Nachdem nun gezeigt wurde, dass der Unterschied zwischen 2m- und 12m-Temperaturen gering ist, soll nun dargestellt werden, wie nahe die Gitterpunkte von METRAS zu den Standorten der Messpunkte liegen. Danach werden die einzelnen Tage separat ausgewertet.

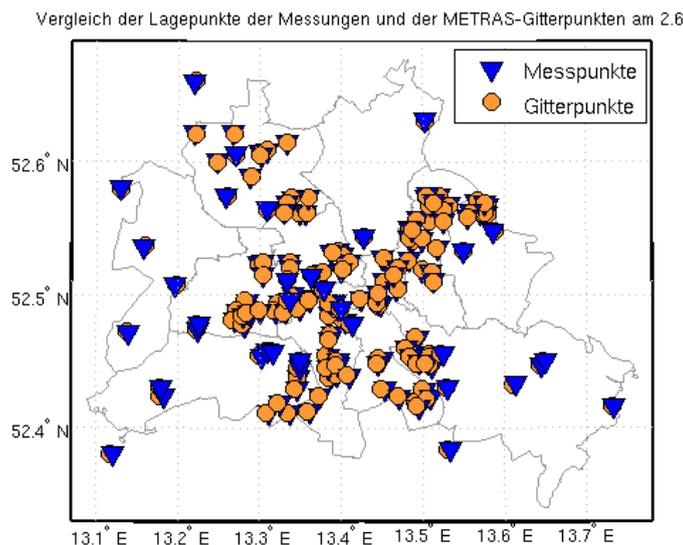


Abbildung 7.7.: Vergleich zwischen den Lagepunkten der Messungen und den METRAS-Gitterpunkten am 2. Juni 2012. Die Lagepunkte wurden mit blauen Dreiecken und die Gitterpunkte mit orangefarbenen Kreisen markiert, wobei bei den Routen die Gitterpunkte über den Messpunkten liegen und bei den festen Messstationen umgekehrt.

Für die Abbildung 7.7 wurden die Daten vom 2. Juni 2012 gewählt. Die Abbildungen zu den anderen Tagen befinden sich im Anhang (Abb. A.10 und Abb. A.11). Da bei dieser Darstellung alle Messpunkte der einzelnen Routen eingetragen wurden und nicht nur die Routenmittelpunkte, lässt sich eine gute Abdeckung von Berlin mit Messwerten erkennen. Außerdem zeigt sich, dass aufgrund der hohen Auflösung des Modells von 200m die Gitterpunkte überwiegend deckungsgleich mit Messpunkten sind.

7.3. 2. Juni 2012

7.3.1. Auswertung der gemessenen Daten

Wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, wurde das Wetter in Berlin am 2. Juni 2012 durch ein Tiefdruckgebiet über der Ostsee bestimmt. Der Wind wehte aus westlichen bis nordwestlichen Richtungen und brachte kalte Luft aus dem Norden mit. In der Abbildung 7.8 sind die Mittelwerte der Abweichungen der Messwerte vom zeitlichen Mittelwert dargestellt. Im Gegensatz zum Vergleich der Lagepunkte der Messungen mit den METRAS-Gitterpunkten (Abb. 7.7) wurde hier über die Lagepunkte der Routen gemittelt und an dieser Stelle das Dreieck gesetzt. Zur besseren Vergleichbarkeit mit der Abbildung 5.6 wurden wieder die gleichen Abweichungsklassen gewählt. Es fällt auf, dass neben der Messstation am Tegeler See dieses Mal der Messstandort Albrechtstraße (TU) und auf dem Dach der HTW negative Abweichungen aufweisen. Bei der Messstation der HTW liegt dies am Wind. Das Messgerät ist in 3m Höhe über einem Dach angebracht, so dass der kalte Wind aus dem Norden es stark beeinflussen konnte. Bei der Albrechtstraße hängen die niedrigen Temperaturen wie auch beim Tegeler See wieder mit hohen relativen Feuchten zusammen (Abb. 7.9).

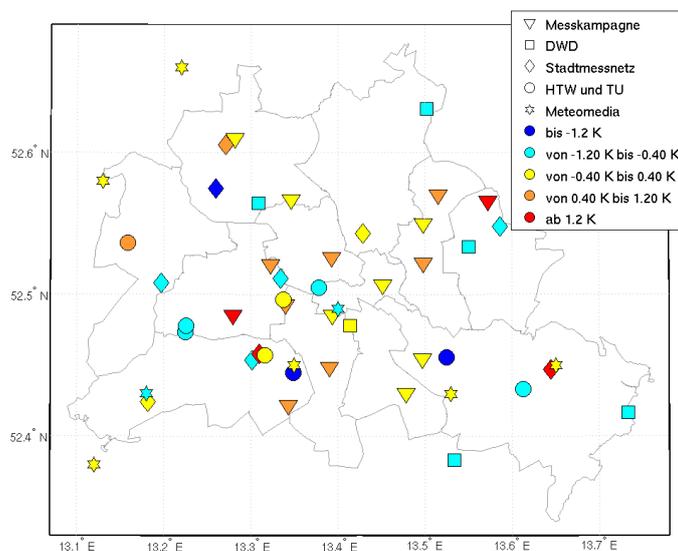


Abbildung 7.8.: Verteilung der gemittelten Abweichungen vom zeitlichen Mittelwert der 2m-Temperaturen am 2. Juni 2012 für Berlin

Mittlere positive Abweichungen über 1,2K weisen an diesem Tag die Route 6 und die Route 16 und die festen Messstandorte der Freien Universität Berlin (FU) Müggelsee und FB-Fichtenberg auf.

Bei der Messstation am Müggelsee hängt dies mit der Wetterlage zusammen. Da an diesem Tag der Wind aus westlichen Richtungen kam, wurde diese nicht durch den Müggelsee beeinflusst

und hat deswegen höhere Temperaturen gemessen. Dies ist auch bei der relativen Feuchte in Abbildung 7.9 zu sehen. Obwohl das Messgerät in der Nähe vom Müggelsee aufgebaut ist, hat es keine positiven Abweichungen gemessen. Das Messgerät auf dem FB-Fichtenberg scheint dagegen gut vor dem kalten Wind aus dem Norden geschützt zu sein.

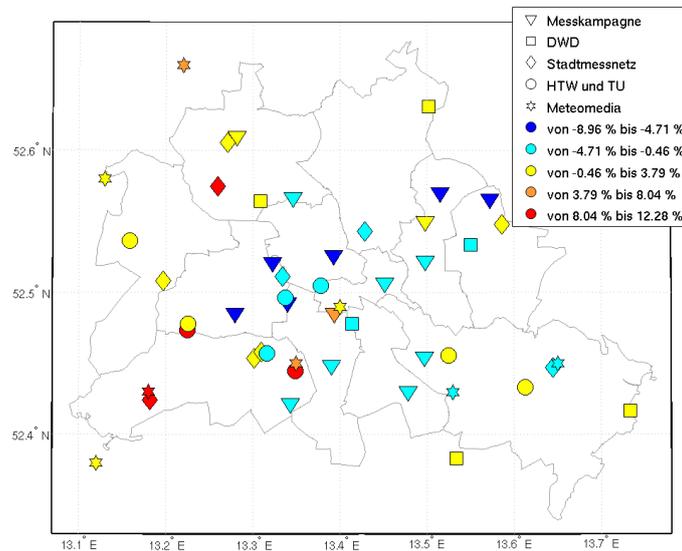


Abbildung 7.9.: Verteilung der gemittelten Abweichungen der 2m-relativen Feuchte am 2. Juni 2012 für Berlin

In Abbildung 7.9 zeigt sich der Einfluss des Windes sehr deutlich. Der Westwind, der an diesem Tag kalte Luft aus dem Norden mitbrachte, erhöht die relative Feuchte vor allem im Westen und Norden. Wie bereits erwähnt, kann Luft mit geringerer Temperatur weniger Wasserdampf aufnehmen.

Besonders hohe relative Feuchten wurden im Westen an den bereits in Abbildung A.1 als feuchte Gebiete aufgefallenen Messstandorten gemessen. Dazu zählen der Tegeler See, der Wannensee, Jagen91 im Grunewald und Albrechtstraße in der Nähe des Teltowkanals.

Im Weiteren weisen die Daten der Studenten wieder die niedrigsten relativen Feuchten auf, da sie überwiegend über Asphalt gemessen haben.

7.3.2. Betrachtung der METRAS-Ergebnisse

Im METRAS-Modell wird an diesem Tag, wie erwartet, ein zu hoher Anteil an Wolkenwassergehalt und Regenwassergehalt simuliert. Wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, war es zwar in Berlin in Realität trocken und die Sonne hat 8 Stunden lang geschienen. Allerdings zogen über den Norden von Deutschland viele Schauergebiete hinweg. Dies ist auch im Radarbild (siehe Abb. 3.9) zu sehen. Da das verwendete Kessler Schema die Wolken- und Niederschlagsbildungsprozesse

überschätzt, wird an diesem Tag in Berlin kein Sonnenschein simuliert und es war den ganzen Tag über bewölkt mit leichten Niederschlag im Norden. Die Bewölkung ist auch bei den Temperaturen in den Modelldaten zu sehen. Die Abbildung 7.10 zeigt die 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 und 21 Uhr (LST) Daten.

Um 0 Uhr (LST) in Abbildung 7.10a sieht man, dass die nächtliche Abkühlung nur sehr gering und dass der Norden wärmer ist, da er unter einer dickeren Wolkendecke liegt. Im Vergleich mit der Topographie von Berlin (Anhang Abb. A.12) fällt auf, dass sich die höher und tiefer gelegenen Gebiete durchprägen. Vor allem die Müggelberge im Südosten von Berlin sind deutlich wärmer als das restliche Berlin. Dies liegt vermutlich daran, dass im Modell eine Inversionswetterlage simuliert wird, da bei einer Inversionswetterlage die Temperatur mit der Höhe zunimmt und die Daten von METRAS in 10m über dem Erdboden simuliert sind. Im Weiteren fällt ein wärmeres Gebiet im Westen von Berlin auf. Da in den ECMWF-Daten Ostwind herrscht und somit warme Luft aus der Stadt nach Westen abzieht, ist es in dem Gebiet wärmer.

Drei Stunden später um 3 Uhr (LST) morgens (Abb. 7.10b) ist das warme Gebiet im Westen verschwunden. Im Norden unter der dickeren Wolkendecke haben sich die Temperaturen nur sehr wenig geändert. Im Süden hingegen ist eine leichte Abkühlung zu sehen. Weitere drei Stunden später um 6 Uhr (LST) (Abb. 7.10c) morgens geht die Sonne langsam auf (Sonnenaufgang um 5:50 MEZ). Die Temperaturen sind kaum verändert. Eine ganz leichte Erwärmung ist zu erkennen.

Erst um 9 Uhr (LST) (Abb. 7.10d) zeigt sich eine deutliche Erhöhung der 10m-Temperatur. Da die Erwärmung im Norden durch die stärkere Bewölkung reduziert ist, erwärmt sich der Süden schneller. Im Vergleich zur Topographie (Anhang Abb. A.12) zeigt sich nun deutlich die Höhenlage. Die Müggelberge haben besonders hohe Temperaturen, aber auch die tiefere Lage der Spree fällt mit niedrigeren Temperaturen auf.

Die Abbildung 7.10e stellt nun die 12 Uhr (LST) Simulation dar. Hier macht sich der fehlende Einfluss der Solarstrahlung im Norden besonders durch niedrigere Temperaturen bemerkbar. Im Weiteren fallen die Flüsse und Seen, speziell der Müggelsee, durch sehr niedrigen Temperaturen auf.

In Abbildung 7.10f (15 Uhr LST) werden die höchsten Temperaturen dargestellt. Diese liegen speziell im Süden und innerhalb der Stadtgrenzen von Berlin, da hier durch die Asphaltierung und Abwärme der Stadt mehr Wärme von der Oberfläche abgestrahlt wird.

Um 18 Uhr (LST) sinken die Temperaturen bereits. Wie schon in Abbildung 7.10a (0 Uhr LST) erwähnt, herrschte an diesem Tag in den Modelldaten ein Ostwind, welcher die Abwärme der Stadt Richtung Westen transportiert. Dieses macht sich auch um 18 Uhr (LST) bemerkbar. Außerdem zeigt sich, dass die Temperaturen in der Stadt langsam abnehmen, so dass sich Norden und Süden wieder angleichen.

Das letzte Bild (Abb. 7.10h) zeigt die Modelldaten um 21 Uhr (LST). Die Abwärme der Stadt ist fast komplett nach Westen abgezogen und die Stadt hat wieder relativ einheitliche Temperaturen um 9°C. Außerdem prägt sich auch die Topographie wieder mit höheren Temperaturen durch.

7 Vergleich simulierter Daten von METRAS mit den Daten der Messkampagne

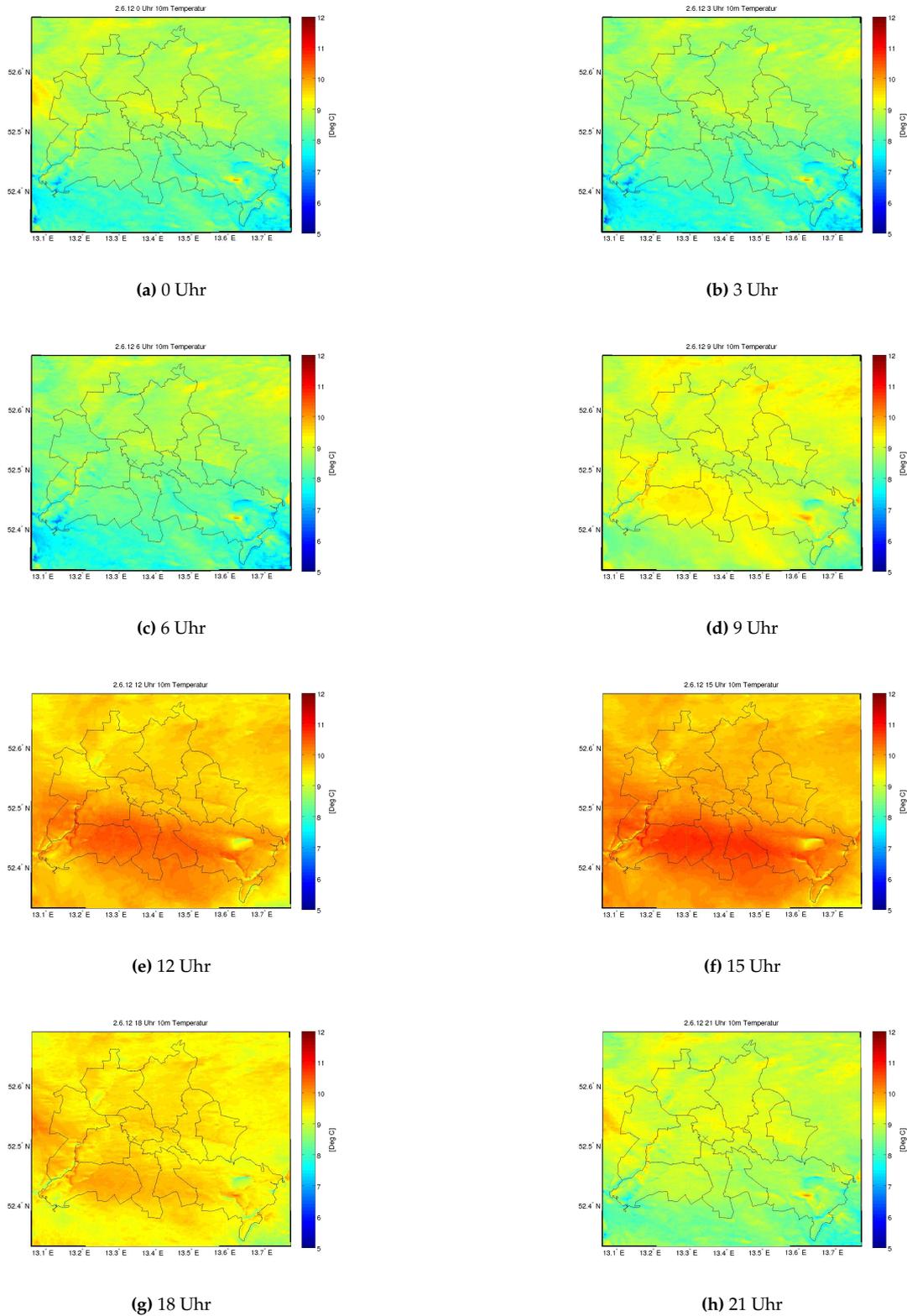


Abbildung 7.10.: Temperaturentwicklung am 2. Juni 2012 im Modell METRAS für die Uhrzeiten a) 0 Uhr, b) 3 Uhr, c) 6 Uhr, d) 9 Uhr, e) 12 Uhr, f) 15 Uhr, g) 18 Uhr und h) 21 Uhr (LST)

7.3.3. Vergleich der gemessenen Daten mit den METRAS-Daten

Nach der Beschreibung der gemessenen und simulierten Daten werden nun diese Werte verglichen. In Abbildung 7.11 wurden alle Messwerte in schwarz dargestellt und die simulierten Werte der nächstgelegenen Gitterpunkte in blau. Die Daten wurden je Stunde in MEZ aufgetragen.

Die gemessenen Daten zeigen einen typischen Verlauf für einen sonnigen Tag. Außerdem lässt sich bei den simulierten Daten der Einfluss der Wolkenbedeckung erkennen. Durch die Wolken fällt die Temperatur in der Nacht nicht so stark ab und steigt am Tage auch nicht stark an. Die Tiefsttemperatur bei den Messstation liegt bei unter 6°C . Im Gegensatz dazu fällt die Temperatur im Modell nicht unter 7°C . Am Tag ist der Einfluss der Wolken noch größer. So erreichen die gemessenen Daten fast die 18°C und die simulierten nicht einmal 11°C .

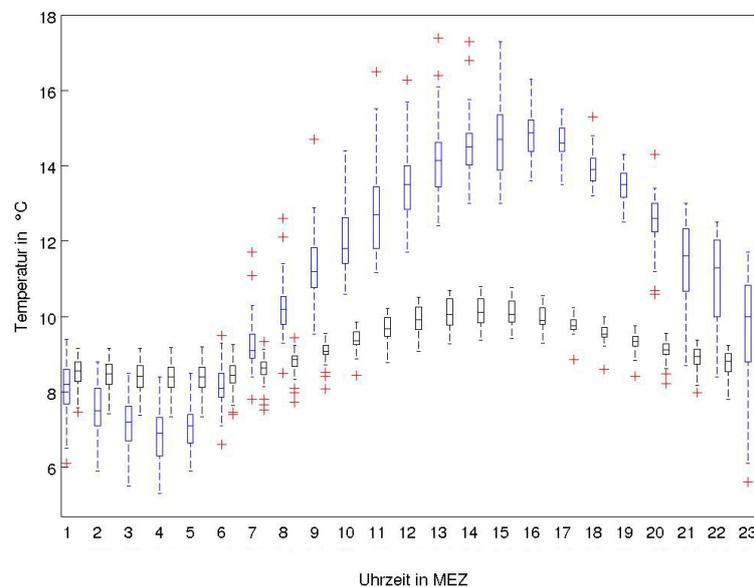


Abbildung 7.11.: Verlauf aller gemessenen Werte in blau und der Modellwerte der nächstgelegenen Gitterpunkte in schwarz je Stunde für den 2. Juni 2012

Außerdem ist zu sehen, dass die simulierten Daten einen viel kleineren Range besitzen. Dies bedeutet, dass die simulierten Daten viel einheitlicher sind, da diese in 10m Höhe und die gemessenen Daten in 2m Höhe aufgezeichnet wurden. Aber auch wegen der Wolkendecke bleiben die Temperaturen in der Stadt einheitlicher, da sich nur geringe durch Strahlung bedingten Stadteffekte ausbilden können.

7.3.4. Statistische Analyse der gemessenen Daten und der METRAS-Daten

Nach dem direkten Vergleich der Modell- und der gemessenen Daten sollen nun die Abweichungen zwischen den simulierten und den gemessenen Daten ausgewertet werden. In die folgenden

Karten sind alle gemittelten Differenzen (MAE und MBE) eingetragen. Hierbei wurde für die Routen der Messkampagne der erste Messpunkt als Lagepunkt der Route gewählt. In Abbildung 7.12 ist der absolute mittlere Fehler bzw. Differenz dargestellt und in Abbildung 7.13 der mittlere Biasfehler. Die Differenzen wurden stündlich von 1 Uhr bis 23 Uhr (MEZ) berechnet. Da die Studenten nur von 10 bis 17 Uhr (MEZ) unterwegs waren, gehen in die Statistik nur 8 Werte ein, da mit dem Modell nur stündliche Werte simuliert wurden. Wie in Abbildung 7.11 zu sehen ist, sind die Abweichungen zwischen den Modell- und den Messdaten tagsüber am größten. Deswegen sind auch die gemittelten Differenzen der Messkampagne am Größten.

Neben diesen Abweichungen der Messkampagne fällt vor allem die Messstation Müggelsee mit einem mittleren absoluten Fehler von 3,88K auf. Diese hohe mittlere Differenz entsteht dadurch, dass der zugeordnete Modellgitterpunkt direkt über dem Müggelsee liegt und somit durch die konstante Wassertemperatur beeinflusst wird und deswegen immer sehr niedrige Temperaturen aufweist.

Wie aufgrund des wolkenbedeckten Tages im Modell zu erwarten war, wurden die kalten Gebiete, wie der Tegeler See besser getroffen. Den kleinsten gemittelten absoluten Fehler hat der Botanische Garten mit 1,84K.

Bei Betrachtung des gemittelten absoluten Fehlers (Abb. 7.12) zeigt sich, dass im Norden von Berlin durch die stärkere Wolkendecke im Modell die Abweichungen größer als im Süden sind. Außerdem zeigt sich, dass der Differenzen auch im Stadtzentrum größer ist. Hier fällt wieder die Fasanenstraße heraus, da hier im Allgemeinen niedrigere Temperaturen als in der Umgebung gemessen wurden.

Der Einfluss der Wolken in der Nacht zeigt sich besonders auch beim mittleren Biasfehler (Abb. 7.13). Durch die höheren Temperaturen in der Nacht verringern sich die Differenzen zwischen den simulierten Werten und den Werten der festen Messstationen im Norden so stark, dass nun die Meteomedia Station Eiskeller den kleinsten Biasfehler aufweist.

Die Untersuchung des mittleren absoluten Fehlers in Zugehörigkeit zur jeweiligen Institution zeigt, dass beim DWD überwiegend kleine Differenzen simuliert werden. Dies liegt daran, dass die Messwerte, wie in Kapitel 5 analysiert, einen geringen Range und auch die geringsten Mittelwerte aufweisen. Auch die Messstation der HTW wird durch das Modell gut simuliert. Bei den Messstationen der TU wird ein Teil der Stationen sehr gut und ein anderer Teil nur gut getroffen. Die gleiche Verteilung hat auch das Stadtmessnetz. Bei beiden Universitäten zeigt sich die Verteilung aus Kapitel 5, wobei die kalten Stationen aufgrund des bedeckten Tages am besten simuliert werden. Die Daten der Firma Meteomedia haben überwiegend hellblaue Punkte, das heißt sie werden im Vergleich am schlechtesten getroffen. Bei der Analyse der gemessenen Daten in Kapitel 7.3.1 zeigte sich, dass der Range der Daten bei der Firma Meteomedia genauso gering wie beim DWD ist. Allerdings hat die Firma Meteomedia am 2. Juni höhere Werte gemessen, deswegen sind auch hier die Abweichungen zum Modell bei der Firma Meteomedia größer.

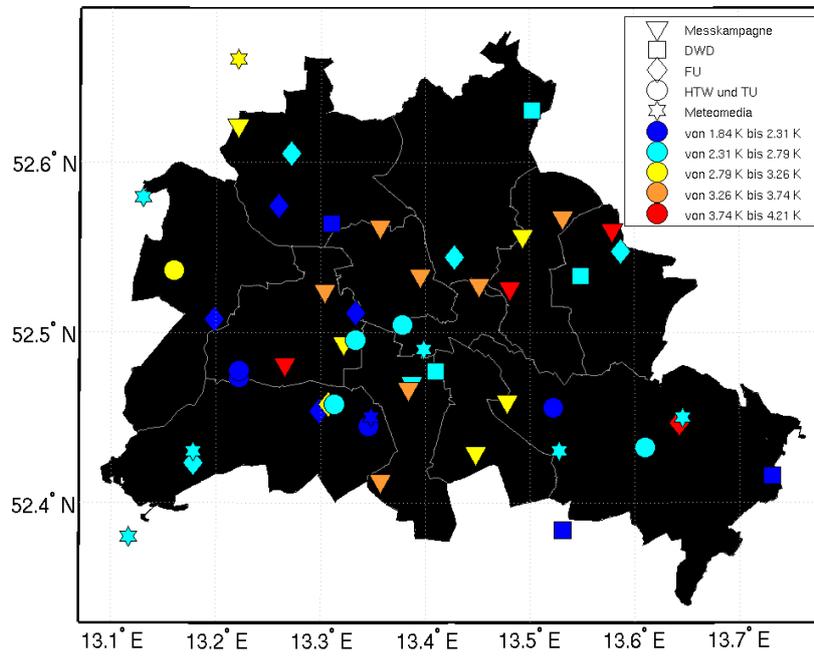


Abbildung 7.12.: Verteilung der gemittelten absoluten Differenzen (MAE) zwischen gemessenen Werten und simulierten Werten für den 2. Juni 2012

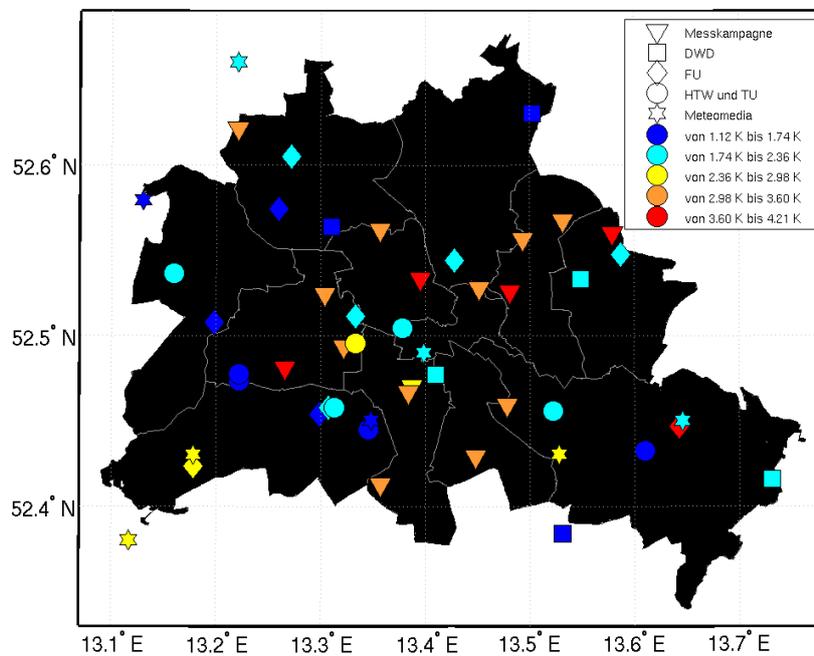


Abbildung 7.13.: Verteilung des gemittelten Biasfehlers zwischen gemessenen Werten und simulierten Werten für den 2. Juni 2012

7.4. 18. August 2012

7.4.1. Auswertung der gemessenen Daten

Der nächste niederschlagsfreie Tag der Messkampagne war der 18. August 2012. An diesem Tag lag, wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben, ein Hochdruckgebiet über Europa. Der Wind wehte aus südöstlichen Richtungen. In Abbildung 7.14 wurden die Abweichungen aller Messpunkte je Uhrzeit eingetragen. Im Vergleich zur allgemeinen Auswertung der Messdaten im Kapitel 5 zeigt sich,

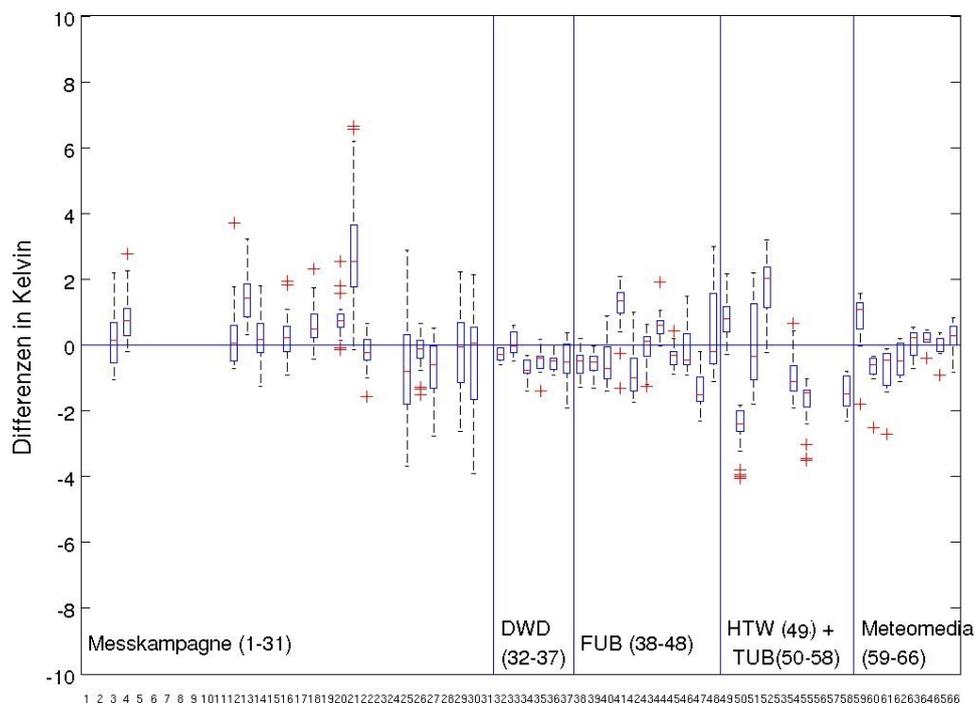


Abbildung 7.14.: Verteilung der Abweichungen der 2m-Temperaturen am 18. August 2012 von 9 bis 16 Uhr MESZ für Berlin

dass der Range der Messwerte des DWD (Nr. 32 - 37) und der Firma Meteomedia (Nr. 59 - 66) wieder sehr klein sind. Der Median der Messwerte liegt bei den meisten Stationen der Firma Meteomedia über denen des DWD. Bei der TU fallen die Messwerte an der Rothenburgstraße (Nr. 51) mit einem hohen Range und die der Spandauer Straße (Nr. 52) mit hohen Abweichungen auf. An den Messstandorten Jagen91 (Nr. 50) und Köpenick (Nr. 55) werden aufgrund ihrer Lage im Wald wieder die niedrigsten Temperaturen gemessen. Die höchsten negativen Abweichungen sind auch geringer als die am Tegeler See (Nr. 47).

Die Stadtmessnetzstation am Müggelsee (Nr. 48) zeigt wieder einen großen Range. Allerdings liegt der Median im negativen Bereich. Dies liegt wahrscheinlich wieder an der Windrichtung.

Da der Wind aus südöstlichen Richtungen wehte, wurde die Messstation vom Müggelsee beeinflusst und die Temperaturen stiegen nicht so hoch. Die höchsten Temperaturen werden beim Stadtmessnetz im Tegel-Forstamt (Nr. 41) gemeldet.

Bei der Messkampagne konnten am 18. August 2012 nicht alle Routen gelaufen werden. Es zeigt sich allerdings das gleiche Bild wie bei der Auswertung von allen Daten (Abb. 5.4), nämlich dass der Range der Werte groß ist. So haben die Studenten die größten Abweichungen (positiv und negativ) an diesem Tag aufgezeichnet. Besonders auffällig sind an diesem Tag die Route 21 (Kreuzberg) und die Route 25 (Adlershof). Die hohen Temperaturen in Kreuzberg lassen sich durch die dichte Bebauung in diesem Gebiet erklären. Der sehr große Range in Adlershof lässt sich dadurch begründen, dass die Route durch Gebiete mit unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit und Windverhältnissen verlief.

7.4.2. Betrachtung der METRAS-Ergebnisse

Der Einfluss der Sonneneinstrahlung an einem warmen Tag auf die 10m-Temperatur zeigt sich in der Abbildung 7.15. Dargestellt ist die Temperatur und der Wind um 18 Uhr (LST). Es zeigt sich, dass der Südostwind die warme Stadtluft nach Nordwesten transportierte und kühle Luft aus dem Südosten in die Stadt hineinwehte. Durch die Sonneneinstrahlung erwärmen sich die asphaltierten Flächen der Stadt im Laufe des Tages stärker als die Grünflächen im Umland. Die Wärme der asphaltierten Flächen wird von den versiegelten Oberflächen abgestrahlt. Dadurch werden zunächst die bodennahen Schichten erwärmt, bevor die Wärme in die Höhe steigt.

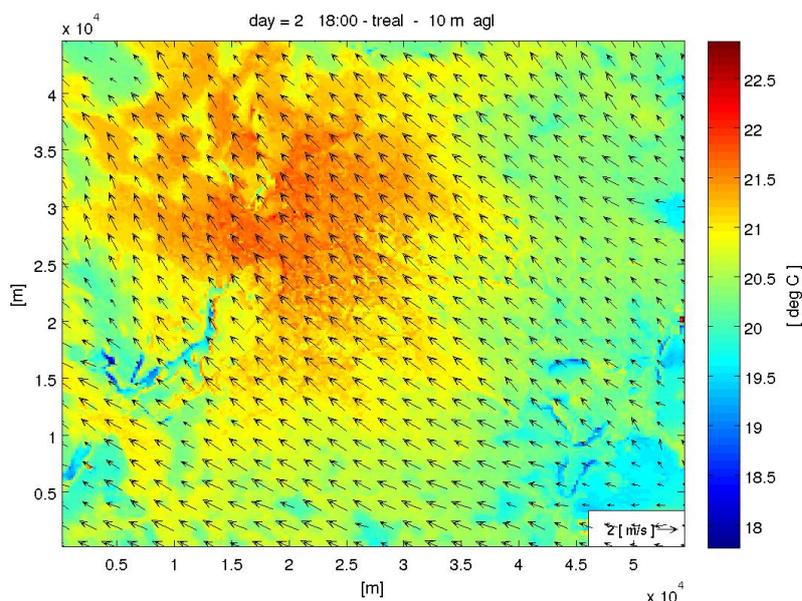


Abbildung 7.15.: Von METRAS simulierte Temperatur und Wind in 10m Höhe am 18. August 2012 um 18 Uhr LST

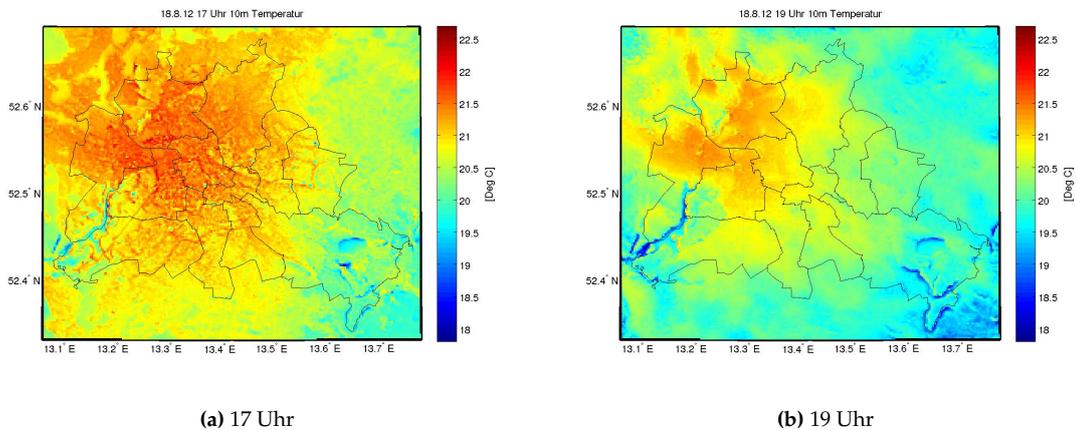


Abbildung 7.16.: Simulierte 10m-Temperatur am 18. August 2012 um 17 und 19 Uhr LST

In den Abbildungen 7.16 wurden zusätzlich die Temperatur von 17 und 19 Uhr (LST) dargestellt, um die Abwärme der Stadt besser beobachten zu können. Außerdem wurden in beiden Abbildungen 7.16 die Umrisse von Berlin eingezeichnet. Es zeigt sich, dass um 17 Uhr (LST) die gesamte Stadt noch warm ist. Nur im Südosten von Berlin wird kältere Luft aus dem Umland herantransportiert. Im Nordwesten hat aufgrund des Windes auch das Umland höhere Temperaturen. Um 18 Uhr LST (Abb. 7.15) hat sich die warme Luft weiter in den Nordwesten verlagert. Außerdem zeigt sich bereits ein Rückgang der Temperatur. Die Temperatur nimmt bis 19 Uhr LST (Abb. 7.16) weiter ab. Es fällt auf, dass die warme Luft im Nordwesten abgelenkt wird. Dies geschieht in Ländchen Glien. Dies ist eine Grundmoränenfläche, die eine Ausdehnung von 12 bis 15km hat.

Wie in den Abbildungen 7.10 vom 2. Juni 2012 gezeigt, beeinflussen die Seen und Flussläufe die Werte in 10m Höhe.

Allerdings war es in den Modelldaten nicht den ganzen Tag sonnig. Am Morgen bildeten sich Nebelfelder, die sich im Laufe des Vormittages langsam auflösten. Dies hatte zur Folge, dass die Temperaturen in den Modelldaten nicht die gemessenen Temperaturen erreichten. Diese Nebelfelder wurden am 18. August 2012 in Berlin nicht registriert. Da es vom 11. bis 15. August 2012 keinen Niederschlag gegeben hat, waren die Böden leicht ausgetrocknet. Wegen des leichten Niederschlages am 16. August 2012, wurde am 17. August 2012 Nebel in Berlin verzeichnet. Im Tagesverlauf löste sich dieser auf und am 18. August war der Boden wieder zu trocken für Nebel. Im Modell hingegen wurde diese niedrigere Bodenfeuchte nicht berücksichtigt, so dass sowohl am 17. August 2012 sich Nebel bildete, als auch am 18. August 2012, da die Sonne nicht in der Lage war, den Boden innerhalb eines Tages gleich stark auszutrocknen.

7.4.3. Vergleich der gemessenen Daten mit den METRAS-Daten

In Abbildung 7.17 wurde der mittlere Temperaturverlauf der in 5cm und in 2m gemessenen Temperaturen und an Oberfläche und in 10m simulierten Temperaturen dargestellt. Wie erwähnt,

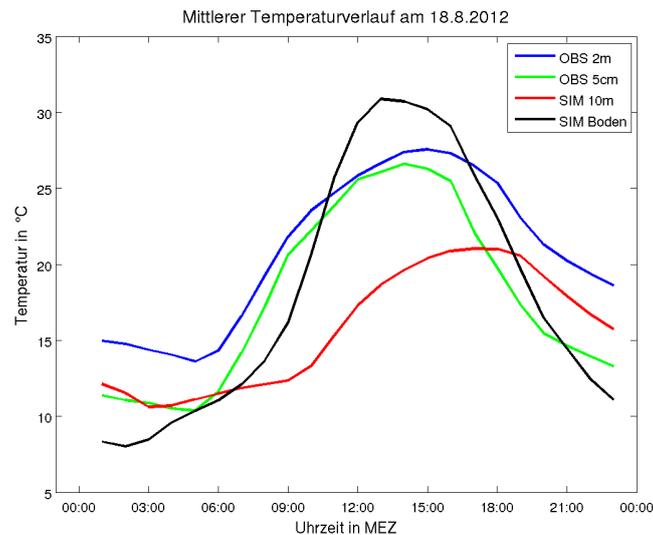


Abbildung 7.17.: Verlauf der Temperatur am 18. August von 0 bis 23 Uhr MEZ. Gemessen am Boden und in 2m Höhe als auch simuliert an der Oberfläche und in 10m Höhe.

gab es am Anfang des Tages eine langsamere Zunahme der Oberflächentemperaturen, die durch den Nebel verursacht wurde. Dies hatte zur Folge, dass sich die 10m-Temperatur nicht so stark erhöhte. An der 10m-Temperatur zeigt sich deutlich, dass sich der Nebel erst ab 10 Uhr MEZ komplett aufgelöst hatte und die Temperatur ansteigen konnte. Bis zum Abend hin nähern sich zwar die 2m- und die 10m-Temperatur einander an, aber die Sonneneinstrahlung, die am Morgen zunächst den Nebel auflösen musste, fehlte, um die gemessenen Daten exakt zu simulieren.

Beim Vergleich der 5cm- und der 2m-Temperaturen lässt sich erkennen, dass die bodennahen Schichten in der Nacht stärker auskühlen und sich am Vormittag schneller wieder erwärmen. Nach dem Sonnenhöchststand um 12 Uhr (LST) nimmt die Stärke der Sonneneinstrahlung und die 5cm-Temperatur langsam ab. Die 2m-Temperatur steigt zunächst noch höher, bevor sie wieder abnimmt.

Als nächstes wurden noch vier Messstationen separat betrachtet. Dazu wurden zwei Stationen des Stadtmessnetzes der Freien Universität Berlin (FU), Fasanenstraße und Botanischer Garten und zwei Stationen des DWD, Flughafen Tegel und Schönefeld ausgewählt. In Abbildung 7.18 wurde der Tagesgang der vier Stationen einmal für die Messungen an den Stationen selbst (a) und einmal für die Vergleichspunkte von METRAS (b) dargestellt.

Bei den gemessenen Daten (Abb. 7.18a) zeigt sich ein typischer Verlauf für einen sonnigen Tag in der Stadt. An der Fasanenstraße werden in der Nacht aufgrund der städtischen Wärmeinsel fast die höchsten Temperaturen gemessen. Nur Flughafen Tegel hat höhere Werte, da durch den Südostwind warme Luft aus dem Stadtzentrum advehiert wird. Es fällt zusätzlich auf, dass der Botanische Garten, obwohl er sich innerhalb der Stadt befindet, kühlere Temperaturen hat. Dies liegt daran, dass der Botanische Garten eine große, bewässerte Grünfläche hat und hier der Einfluss der Stadt geringer ist. Am Vormittag zeigt sich der städtische Kälteinseleffekt, da die Temperaturen in der Fasanenstraße am geringsten sind und Flughafen Schönefeld und Botanischer Garten

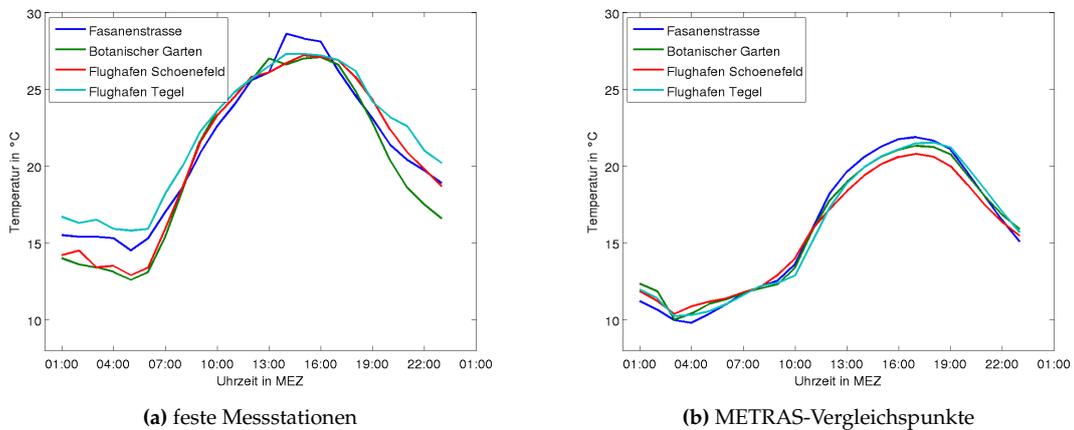


Abbildung 7.18.: Der Tagesgang der Temperaturen an den Stationen Fasanenstraße, Botanischer Garten, Flughafen Schöniefeld und Flughafen Tegel für a) die festen Messstationen und b) für die METRAS-Vergleichspunkte am 18. August 2012

am stärksten zunehmen. Danach werden in der Innenstadt die höchsten Temperaturen erreicht. Am Abend sinken die Temperaturen, wobei es im Botanischen Garten durch die Bewässerung am kältesten wird.

In Abbildung 7.18b ist der Tagesgang der jeweils nächstgelegenen Gitterpunkte abgebildet. Wie bereits erwähnt, zeigt sich auch hier der Nebel zwischen 8 und 9 Uhr (MEZ). Aufgrund des Nebels liegen die Temperaturen an allen Gitterpunkten bei ungefähr dem gleichen Wert. Nach der Nebelauflösung nimmt die Temperatur in der Innenstadt am stärksten zu. Dies zeigt, dass das Modell keinen städtischen Kälteeffekt simuliert. Allerdings beruht dieser Effekt überwiegend darauf, dass durch die Häuser die Straßen abgeschattet sind und deswegen die freien Flächen auf dem Land schneller erwärmt werden. Im Modell wird dieser Temperaturdifferenz nicht simuliert. Außerhalb von Berlin, am Flughafen Schöniefeld, bleiben die Temperaturen am niedrigsten. Bei der abendlichen Temperaturabnahme zeigt sich, dass METRAS auch die städtische Wärmeinsel nicht simuliert. Die Temperatur in der Innenstadt fällt am stärksten und erreicht um 23 Uhr (MEZ) den niedrigsten Wert von allen vier Stationen. Auch ist die Temperaturdifferenz zwischen den einzelnen Stationen sehr gering. Am Morgen vor der Nebelbildung zeigt sich dieser Effekt bereits, da hier in der Innenstadt trotz Hochsommer die niedrigsten Temperaturen simuliert werden. Dies hängt wahrscheinlich mit der Wärmespeicherung im Asphalt oder dem sensiblen Wärmefluss im Modell zusammen. Bereits nach Sonnenuntergang nimmt die Temperatur in der Stadt stark ab. Jedoch konnte Hoffmann zeigen, dass METRAS in der Lage ist, sowohl eine städtische Kälteinsel als auch eine städtische Wärmeinsel zu simulieren. Allerdings wurde die Simulation so aufgesetzt, dass eine starke städtische Wärmeinsel gemessen werden konnte [Hoffmann, 2009].

7.4.4. Statistische Analyse der gemessenen Daten und der METRAS-Daten

Nachdem die Daten dargestellt wurden, werden der mittlere absolute Fehler MAE und der mittlere Biasfehler MBE berechnet. In der Abbildung 7.19 ist der MAE und in der Abbildung 7.20 der MBE dargestellt. Auf den ersten Blick fällt auf, dass es zwischen den beiden Abbildungen keine Unterschiede bei den Farben der Messpunkte gibt. Dies liegt daran, dass aufgrund des Nebels im Modell die Temperatur immer unterhalb der 2m-Temperatur lag. Außerdem fällt auf, dass wegen des stärkeren Tagesgangs der Temperatur am 18. August 2012 auch die Abweichungen größer sind. So ist an diesem Tag der geringste mittlere Biasfehler mit 3,33K schon fast genauso hoch wie der maximale mittlere Biasfehler am 2. Juni (3,88K).

Da die Studenten nur von 9 bis 16 Uhr (MESZ) unterwegs waren, trifft dies genau den Bereich, in dem die Temperaturen im Modell aufgrund des Nebels zu niedrig sind und die gemessenen Temperaturen nicht gut simuliert werden. Das hat zur Folge, dass die Abweichungen an den Messpunkten der Messkampagne wie auch am 2. Juni am größten sind. Dabei fällt zusätzlich noch ein Stadteffekt auf. Die Messungen der Messkampagnenrouten in Mitte (Nr. 13) und in Kreuzberg (Nr. 21) weisen die höchsten Temperaturen auf (siehe Abb. 7.21) und deswegen ergeben sich hier auch die größten Differenzen.

Im Weiteren ist zu beachten, dass an diesem Tag die Messstation der FU am Müggelsee keine extremen gemittelten Differenzen aufweist. Dies liegt daran, dass aufgrund des Windes von Süden der Müggelsee Einfluss auf die Messstation am Müggelsee hatte. In Abbildung 7.21 zeigt sich, dass die Messwerte der Messstation am Müggelsee (Nr. 48) negative Abweichungen vom zeitlichen Mittelwert haben.

Im Vergleich zu der Darstellung der gemessenen Daten (Abb. 7.14) zeigt sich, dass die Daten für die wärmsten Gebiete die größten mittleren Differenzen haben. Ausnahme ist die Spandauer Straße, wo durch den Wind genug warme Luft aus dem Zentrum von Berlin nach Spandau geweht wird, so dass sich eine kleinere mittlere Abweichung einstellt.

Bei der Auswertung der Fehler nach den jeweiligen Institutionen zeigt sich, dass bei den Messungen der HTW die Differenzen größer als am 2. Juni sind, da die Messstation insgesamt höhere Werte als im Mittel gemessen hat. Die TU, die FU und der DWD weisen ähnliche Abweichungen wie am 2. Juni auf. Nur die Firma Meteomedia hat geringere mittlere Differenzen. Die Werte im Nordwesten von Berlin wurden besser simuliert, da im Modell die warme Luft aus der Stadt nach Nordwesten abtransportiert wurde.

7.5. 1. September 2012

7.5.1. Auswertung der gemessenen Daten

Der letzte Tag der Messkampagne war der 1. September 2012. Es wehte ein schwacher Nordwestwind. In Abbildung 7.21 wurden die Abweichungen vom Mittelwert für jede Station dargestellt.

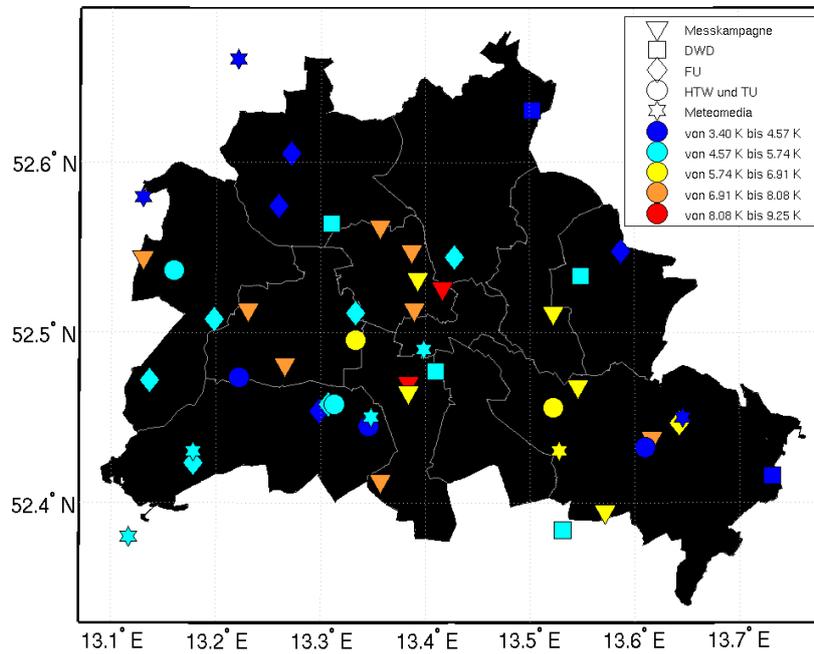


Abbildung 7.19.: Verteilung des gemittelten absoluten Fehlers bzw. Differenz zwischen den gemessenen und den simulierten Werten für den 18. August 2012

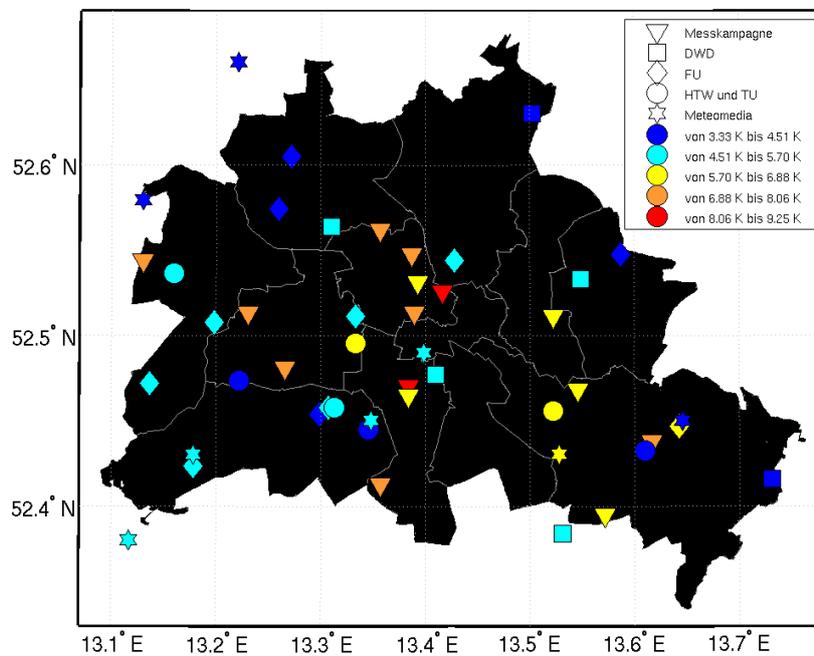


Abbildung 7.20.: Verteilung des gemittelten Biasfehlers zwischen den gemessenen und den simulierten Werten für den 18. August 2012

Wie in der Darstellung mit allen Abweichungen (Abb. 5.4) ist der Range vom Deutschen Wetterdienst und von der Firma Meteomedia gering und auch die Werte liegen nahe der Mitteltemperatur.

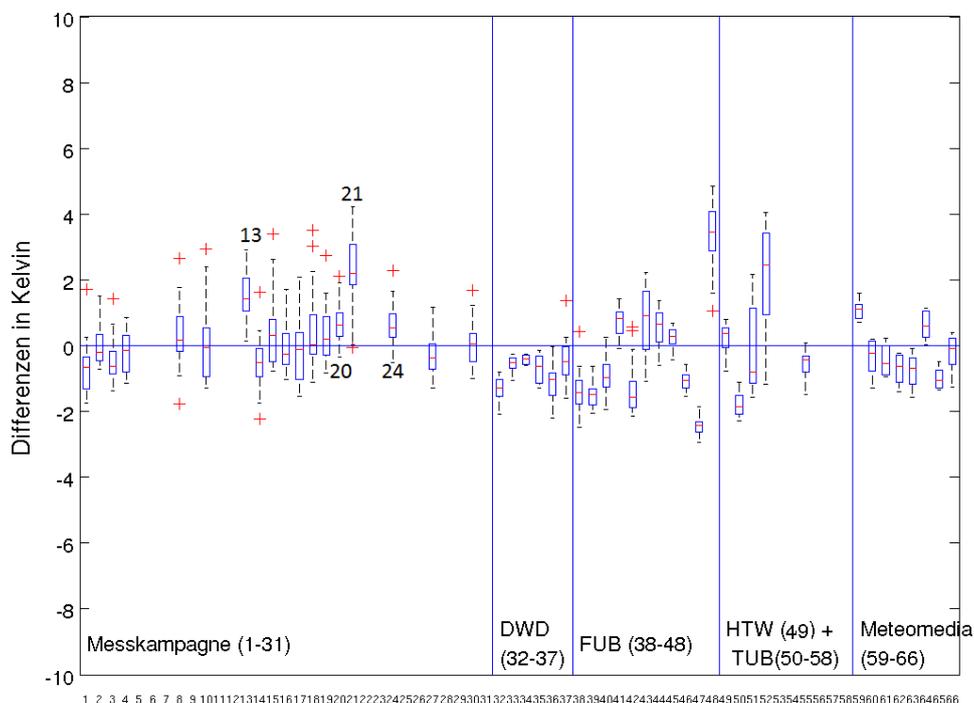


Abbildung 7.21.: Abweichungen der gemessenen Werte vom zeitlichen Mittelwert für alle Stationen am 1. September 2012. Mit Hilfe von blauen Querstrichen wurden die einzelnen Institutionen von einander abgetrennt.

Bei den Messwerten der TU fällt auf, dass es von der Hälfte der Stationen an diesem Tag keine Daten gab. Der Range bei der Messstation in der Rothenburgstraße (Nr. 51) ist wieder sehr groß und das Messgerät in der Spandauer Straße (Nr. 52) weist wieder hohe Abweichungen auf. Der Messstandort Jagen91 (Nr. 50) hat einen geringen Range mit niedrigen Temperaturen. Auch die Station der HTW (Nr. 49) misst mittlere Temperaturen mit einem geringen Range.

Die Station Müggelsee (Nr. 48) des Stadtmessnetzes wurde aufgrund des nordwestlichen Windes nicht vom Müggelsee beeinflusst und misst daher sehr hohe Temperaturen. Außerdem waren die Temperaturen direkt am Tegeler See sehr gering. Die anderen Stationen der FU zeigen keine Auffälligkeiten.

Auch bei der Messkampagne zeigt sich, dass es im Tegeler Forst (Route 1) kälter als im Mittel ist. Die Routen 2, 3 und 4 sind im Vergleich zum gesamten Datensatz auch kälter, was sich mit dem Nordwestwind erklären lässt. Die Routen im Stadtzentrum (Route 13 Mitte und Route 21 Kreuzberg) sind, wie an sonnigen Tagen üblich, wärmer als im Mittel. Durch den Wind aus der Stadt waren unter anderem die Route 24 in Schöneweide und die Route 20 in Lichterfelde beeinflusst.

7.5.2. Betrachtung der METRAS-Ergebnisse

Dieser Einfluss des Windes zeigt sich auch in den METRAS-Daten. Für die Abbildung 7.22 wurde die simulierte Temperaturverteilung für 0 Uhr (LST) dargestellt. Zusätzlich wurde noch die

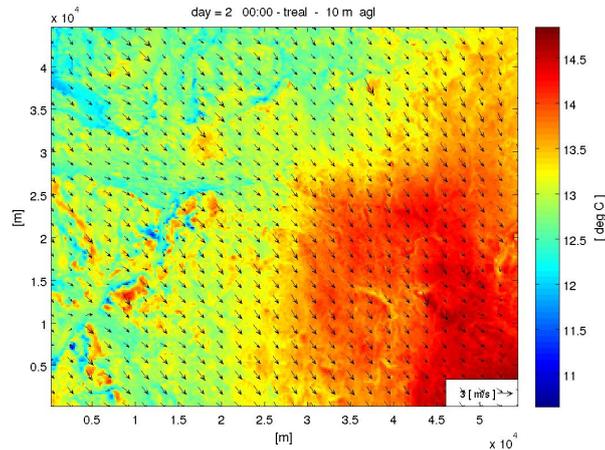


Abbildung 7.22.: Farblich ist die von METRAS simulierte Temperaturverteilung am 1. September um 0 Uhr LST dargestellt. Zusätzlich wurde noch die Windrichtung und Geschwindigkeit mit Pfeilen eingetragen.

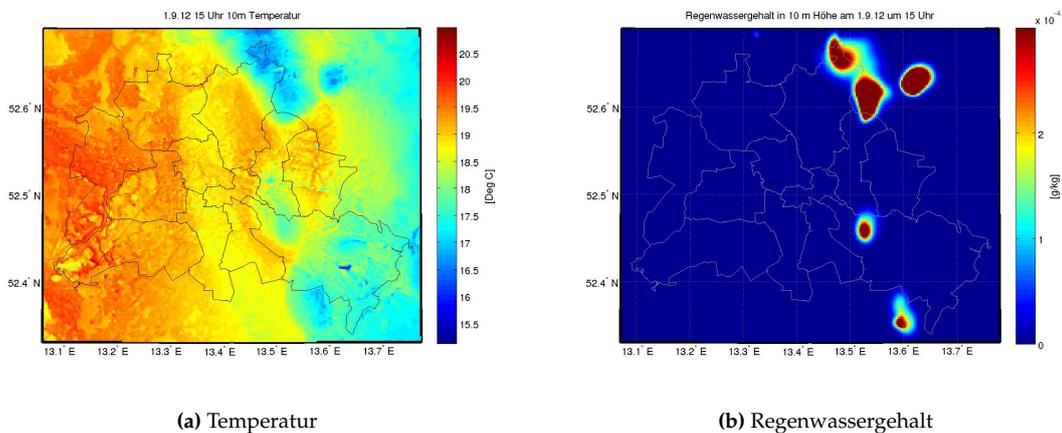


Abbildung 7.23.: Simulierte Temperatur und Regenwassergehalt in 10m Höhe am 1. September um 15 Uhr LST

Windrichtung in die Grafik eingetragen. Wie bereits beschrieben, wehte der Wind aus Nordost. In 10m Höhe lässt sich der Einfluss durch die Abwärme der Stadt sehr gut erkennen. Auch fallen die Flüsse und Seen durch niedrigere Temperaturen und die Berge durch erhöhte Temperaturen auf.

Am 1. September wurden im Modell am Nachmittag Schauer simuliert, so dass es nicht den ganzen Tag über trocken war. Wie bereits am 2. Juni 2012 erwähnt, wird aufgrund des Kess-

ler Schemas die Wolkentröpfchenbildungsprozesse und somit auch die Niederschlagsprozesse überschätzt.

Als Beispiel wurde in Abbildung 7.23 die Temperatur und der Regenwassergehalt dargestellt. Typisch für Schauerwetter sind die lokal begrenzte Regengebiete. Außerdem zeigt sich, dass durch den Regen die Temperatur abnimmt. Der Temperaturunterschied bei sonnigem Wetter im Vergleich zu Regenwetter liegt bei bis zu 5K. Zusätzlich zeigt sich, dass durch die Bewölkung auch die Temperatur vor allem im Osten reduziert wurde. Auffällig ist, dass die Müggelberge im Südosten von Berlin unter der Bewölkung sehr niedrige Temperaturen haben.

7.5.3. Vergleich der gemessenen Daten mit den METRAS-Daten

Da es erst am Nachmittag schauerte, war es am Morgen im Modell sonnig. In der Abbildung 7.24 ist somit eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den simulierten Daten zu sehen. Wie bereits am 2. Juni 2012 erwähnt, ist der Range der simulierten Daten in 10m Höhe kleiner als der gemessene in 2m. Dies liegt daran, dass in 10m Höhe der Einfluss der Bodenbeschaffenheit geringer als in 2m Höhe ist, wodurch sich die Temperaturen in 10m Höhe aneinander angeglichen haben. Dieser Effekt wurde auch beim Vergleich der 2m- und 12m-Temperaturen am Flughafen Tempelhof festgestellt. Auch fällt auf, dass die Temperaturen am Morgen in 10m Höhe niedriger als in 2m sind. Am Abend zeigt sich, dass die Temperatur in 2m Höhe unter die Temperatur in 10m Höhe sinkt. Das hängt damit zusammen, dass der Erdboden bei klarem Himmel stärker ausstrahlt, da die langwellige Strahlung nicht an den Wolken zurückgestrahlt wird. Vormittags nimmt die 2m-Temperatur erwartungsgemäß schneller zu. Den Maximalwert nimmt

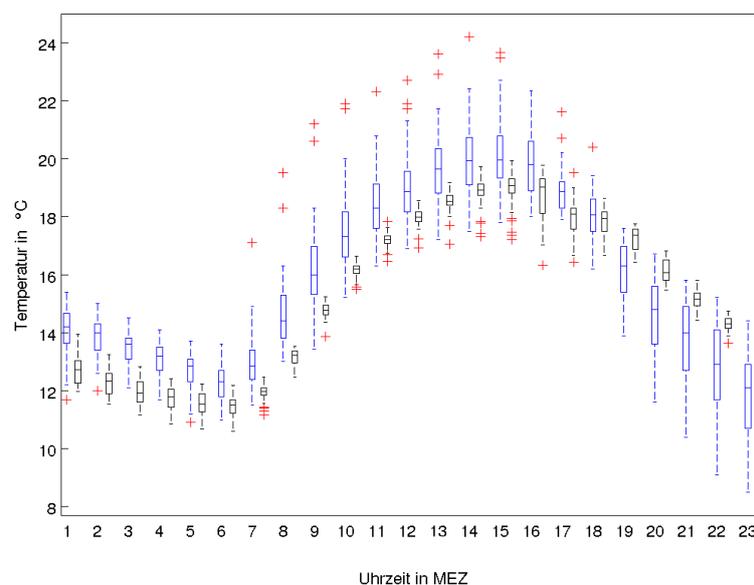


Abbildung 7.24.: Temperaturverlauf der gemessenen Temperaturen in blau und der simulierten Temperaturen in schwarz vom 1. September 2012

die 2m-Temperatur kurz vor der 10m-Temperatur an. Am Nachmittag ist die Temperaturabnahme in 2m Höhe wieder stärker als in 10m Höhe.

Bei der Verteilung der gemessenen Werte fällt auf, dass es aufgrund der starken Einstrahlung einige Extremwerte gibt. Diese verteilen sich überwiegend zwischen von 9 bis 16 Uhr (MESZ), sodass ein Zusammenhang mit den Messkampagnendaten wahrscheinlich ist. Wie in Kapitel 7.5.1 gezeigt, wurden von der Messkampagne die höchsten Abweichungen vom Mittelwert und somit die höchsten Temperaturen gemessen. Im Weiteren zeigt sich am Range, dass es bei den simulierten Daten am Nachmittag geschauert hat. Zwischen 14 und 16 Uhr (MEZ) ist der Range bei den simulierten Daten größer als zu den anderen Uhrzeiten. Da Schauer kurzfristig und auf kleine Stellen begrenzte Ereignisse sind, gibt es keinen allgemeinen Rückgang der Temperaturen.

7.5.4. Statistische Analyse der gemessenen Daten und der METRAS-Daten

Bei der statistischen Analyse werden die gemessenen 2m-Temperaturen mit den simulierten 10m-Temperaturen verglichen. Außerdem werden die Messkampagnendaten betrachtet. Wie in Abbildung 7.24 zu sehen, überschneiden sich die Wertebereiche der simulierten und gemessenen Temperaturen, deswegen zeigt sich ein Unterschied zwischen den mittleren absoluten Fehlern und den mittleren Biasfehlern. In Abbildung 7.25 wurde der mittlere absolute Fehler bzw. Differenz je Messpunkt eingetragen. Hierbei wurde bei den Routen der erste Messpunkt verwendet. In Abbildung 7.26 ist der mittlere Biasfehler dargestellt.

Beim mittleren absoluten Fehler liegen die gemittelten absoluten Differenzen zwischen 0,55K und 3,09K. Die großen Abweichungen wurden am Müggelsee simuliert, da der simulierte Wert die Temperatur des Müggelsees hat. Die größte Differenz wurde dieses Mal, wie auch am 18. August 2012, bei der Route 21 in Kreuzberg simuliert. Dies liegt daran, dass sich in 10m Höhe der Einfluss der Stadt verringert.

Weitere hohe Abweichungen ergeben sich für die Spandauer Straße und Kaniswall, da hier der Wind auf die 10m-Temperatur mehr Einfluss als auf die 2m-Temperatur hat. So sind beide Gebiete in 2m Höhe mehr durch die Umgebung beeinflusst, als die 10m-Daten. Der letzte Wert mit einer größeren Abweichung als 2K liegt wieder im Stadtzentrum. Es zeigt sich, dass die 10m-Temperatur die kleinräumigen Unterschiede in der Stadt nicht darstellen kann.

Über ein Drittel aller Werte hat einen kleineren mittleren absoluten Fehler als 1K. Dies zeigt, dass der Tag trotz der Schauer am Nachmittag gut simuliert wurde.

In diesem Fall ist es wichtig, den Biasfehler separat zu betrachten. Es zeigt sich nämlich, dass sich durch die stärkere Abkühlung der 2m-Temperatur am Abend negative mittlere Differenzen ergeben. Abbildung 7.26 zeigt, dass die Biasfehler zwischen -0,69K und 3,09K liegen. Es muss beachtet werden, dass die Studenten wieder nur von 9 bis 16 Uhr (MESZ) unterwegs waren und somit nicht die Temperaturabnahme am Abend gemessen haben. Deswegen bleibt die größte mittlere Abweichung auch bei 3,09K.

Da der Müggelsee in der Nacht wärmer als die 2m-Temperatur ist, fällt die 2m-Temperatur unter die Temperatur des Müggelsees und der Biasfehler vom Müggelsee ist kleiner als der mittlere ab-

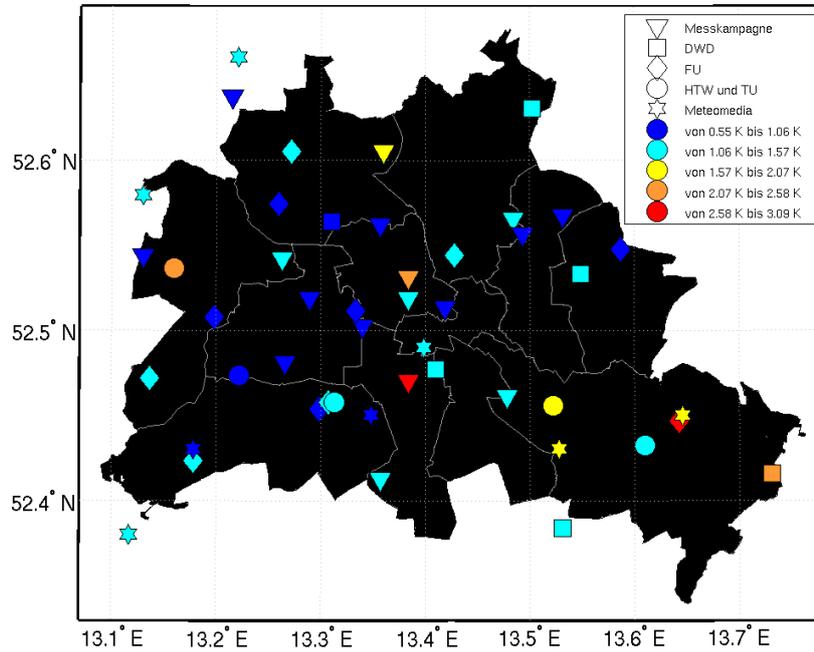


Abbildung 7.25.: Verteilung des gemittelten absoluten Fehlers bzw. Differenz zwischen den gemessenen Werten und den simulierten Werten für den 1. September 2012

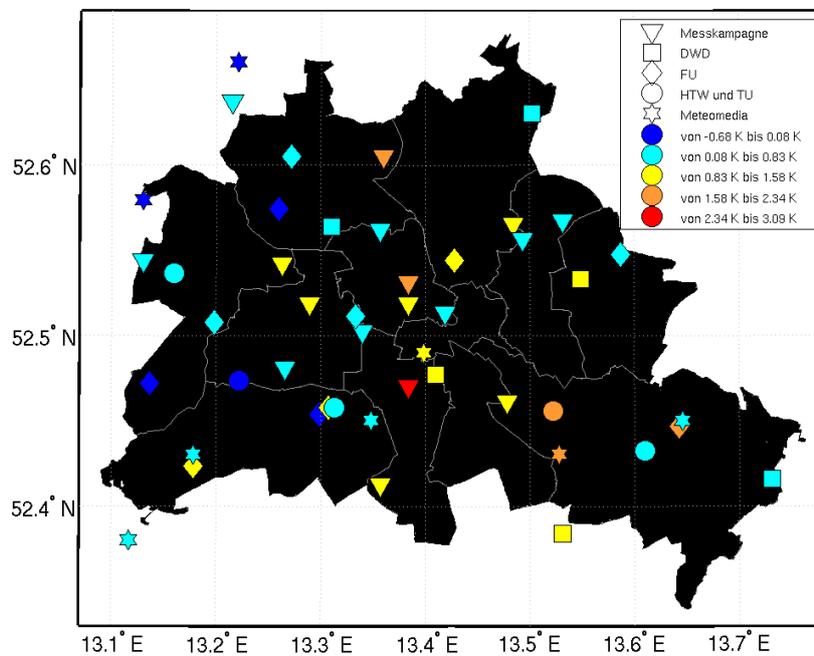


Abbildung 7.26.: Verteilung des gemittelten Biasfehlers zwischen den gemessenen Werten und den simulierten Werten für den 1. September 2012

solute Fehler. Die Messstation Spandauer Straße profitiert sehr durch die abendliche Abkühlung. Ihr mittlere Differenz liegt daher bei 0,58K.

Zu bemerken ist, dass die generell kühlen Messstationen wie Grunewald, Tegeler See oder auch Botanischer Garten durch den Biasfehler auf negative mittlere Abweichungen kommen. Dies zeigt, dass an diesen Stationen die Temperatur im Modell überwiegend die gemessene Temperatur überschätzt. Dies hängt auch damit zusammen, dass in 10m Höhe die Temperaturen ausgeglichener sind als in 2m Höhe.

Die größten negativen Fehler werden im Eiskeller von Berlin berechnet. Im Vergleich mit dem mittleren absoluten Fehler zeigt sich, dass auch hier am Tag positive Werte gemessen wurden. Der mittlere absolute Fehler berechnet sich zu 1,41K. Jedoch überwiegen die niedrigeren Temperaturen in der Nacht. Dies hängt mit der Lage der Messstation zusammen, die von der Firma Meteomedia ausgewählt wurde. Auch hier ist die 10m-Modelltemperatur zu ausgeglichen und kann die gemessenen Extremwerte in 2m Höhe nicht darstellen.

Bei der Auswertung der Messstationen nach den Institutionen zeigt sich, dass die HTW wieder höhere Temperaturen gemessen hat, als simuliert wurden.

Die Messwerte der Firma Meteomedia werden relativ gut getroffen. Dieses Mal ist die Abweichung ähnlich wie beim DWD. Auch die Messwerte der TU werden recht gut simuliert. Die am Besten simulierten Werte weist an diesem Tag allerdings das Stadtmessnetz auf, wenn von der Messstation am Müggelsee abgesehen wird.

7.6. Untersuchung der simulierten Oberflächentemperatur

In den vorherigen Abschnitten wurde die gemessene 2m- und die simulierte 10m-Temperatur an den Tagen 2. Juni, 18. August und 1. September 2012 ausgewertet. Im Folgenden soll die Oberflächentemperatur am Beispiel des 18. Augusts näher betrachtet werden, da es nur weniger Stationen in Berlin gibt, die die Oberflächentemperatur messen, werden die MODIS-Satellitendaten zum Vergleich herangezogen.

7.6.1. Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf die Oberflächentemperatur

In der Abbildung 7.27 wurden die Oberflächentemperatur vom Modell METRAS für die Uhrzeiten 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 und 21 Uhr (LST) dargestellt.

Um 0 Uhr (LST) (Abb. 7.27a) fallen vor allem die Seen und Flüsse mit höheren Temperaturen auf, da sie eine höhere Wärmekapazität haben. Allerdings zeichnet sich auch ganz leicht das Straßennetz mit sehr niedrigen Temperaturen ab. Dies liegt an der starken Ausstrahlung der asphaltierten Straßen bei Nacht. Die Grünflächen weisen höhere Temperaturen als die Straßen auf. Dies zeigt, dass die Ausstrahlung über Asphalt überschätzt wird, den sowohl Kessler (Abb. 2.1) als auch [Yilmaz et al, 2008] haben gezeigt, dass die Oberflächentemperatur an Sommertagen von Asphalt den ganzen Tag über wärmer als über Gras ist.

7.6 Untersuchung der simulierten Oberflächentemperatur

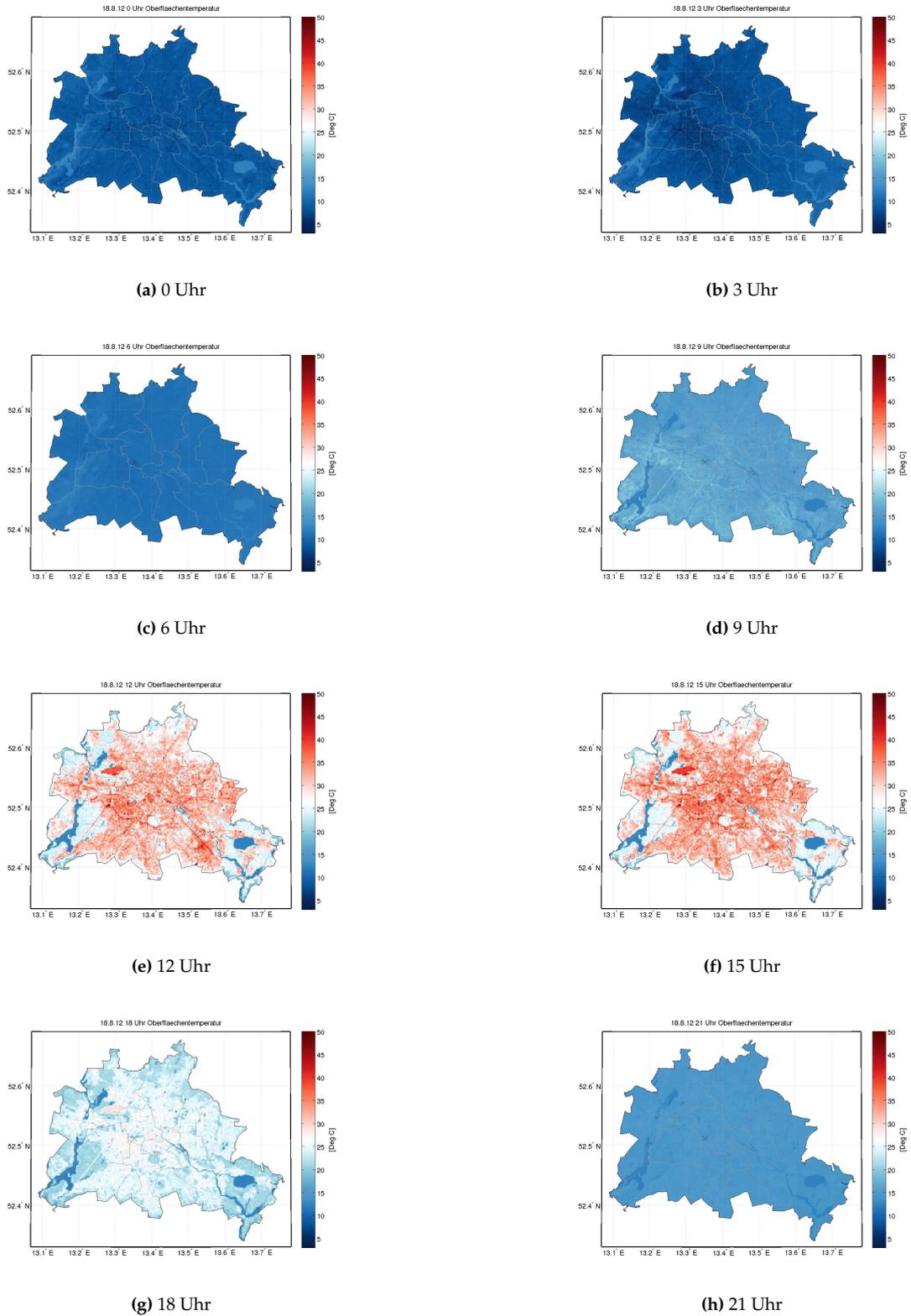


Abbildung 7.27.: Entwicklung der Oberflächentemperatur am 18. August in den Modelldaten für die Zeiten a) 0 Uhr, b) 3 Uhr, c) 6 Uhr, d) 9 Uhr, e) 12 Uhr, f) 15 Uhr, g) 18 Uhr und h) 21 Uhr LST

Drei Stunden später zeigt sich in der Abbildung 7.27b, dass wegen der nächtlichen Ausstrahlung die Temperaturen weiter zurückgegangen sind. Nur die Seen und Flüsse blieben wegen ihrer hohen Wärmekapazität bei einer konstanten Temperatur.

Am Morgen bildete sich ein großflächiges Nebelgebiet in Berlin. Durch den Nebel wird die nächtliche Ausstrahlung verhindert, so dass sich in Abbildung 7.27c um 6 Uhr (LST) die Temperaturen vereinheitlichen. Nur die Seen und Flüsse fallen noch mit etwas wärmeren Temperaturen auf.

Um 9 Uhr LST (Abb. 7.27d) hat die Sonne langsam den Nebel aufgelöst und es zeigt sich das Gegenteil vom Bild der Nacht. Die Straßen sind nun als warme Striche innerhalb der Stadt erkennbar und die Seen sind Kältequellen. Der Müggelberg fällt nicht mehr auf. Hier zeigt sich, dass im Modell keine Abschattungseffekte berücksichtigt werden können. Deswegen erwärmen sich die Gitterpunkte mit einem hohen Anteil von Asphalt am stärksten.

Gegen 12 Uhr LST (Abb. 7.27e) verstärken sich die Temperaturgegensätze. Die Temperatur der Seen und Flüsse bleibt aufgrund des Wärmespeicherkoeffizienten gleich, aber für die asphaltierten Straßen nimmt die Temperatur zu. Auch hier zeigt sich der Einfluss des Gitterpunktabstandes von 200m. Die Gitterpunkte, die beim Asphalt einen höheren Bodenbedeckungsanteil besitzen, erwärmen sich stärker als andere Gitterpunkte. Auch zeigt sich der kühlende Effekt von Parks und Grünflächen beim Tiergarten und dem Tempelhofer Feld sehr gut. Durch die weitere Sonneneinstrahlung erwärmen sich die Oberflächen bis 15 Uhr (LST) weiter.

Um 18 Uhr LST (Abb. 7.27g) sind die Oberflächentemperaturen aufgrund der abgeschwächten Einstrahlung gesunken. Die Oberflächentemperatur ist nur noch leicht durch die stark asphaltierten Gebiete in Mitte und am Flughafen Tegel geprägt. Auf der letzten Abbildung 7.27h sieht man, dass sich die Oberflächentemperaturen wieder ausgeglichen haben.

7.6.2. Vergleich der simulierten Oberflächentemperatur mit den Satellitendaten

Im vorherigen Abschnitt wurde die Oberflächentemperatur im Vergleich zur Bodenbeschaffenheit untersucht. Nun soll die Oberflächentemperatur im Vergleich zu den Satellitendaten von MODIS betrachtet werden. Da es am Vormittag bewölkt war, können nur die Daten vom Nachmittagstermin näher betrachtet werden. Zunächst ist in Abbildung 7.28 die Temperaturverteilung der METRAS-Gitterpunkte dargestellt, die den MODIS-Gitterpunkten am nächsten liegen. Es zeigt sich, dass im Südosten von Berlin aufgrund von Bewölkung keine MODIS-Daten zur Verfügung standen. Außerdem haben die MODIS-Daten eine Auflösung von 1km. Dies führt dazu, dass in der Abbildung 7.28 keine Straßenstrukturen zu erkennen sind. Jedoch fallen gewisse Bereiche weiterhin auf. Zum Einen liegen alle Temperaturwerte von unter $14,76^{\circ}\text{C}$ über Flüssen oder Seen. Im Südwesten von Berlin befindet sich der Wannensee und im Nordwesten der Tegeler See. Außerdem fällt ein weiterer kalter Gitterpunkt im Osten von Berlin auf. Dieser liegt über der Rummelsburger Bucht. Auch der Tiergarten fällt mit drei kälteren simulierten Werten (gelbe Punkte) im Zentrum von Berlin auf. Das Tempelhofer Feld südöstlich vom Tiergarten ist ebenfalls mit kälteren Temperaturen zu sehen.

7.6 Untersuchung der simulierten Oberflächentemperatur

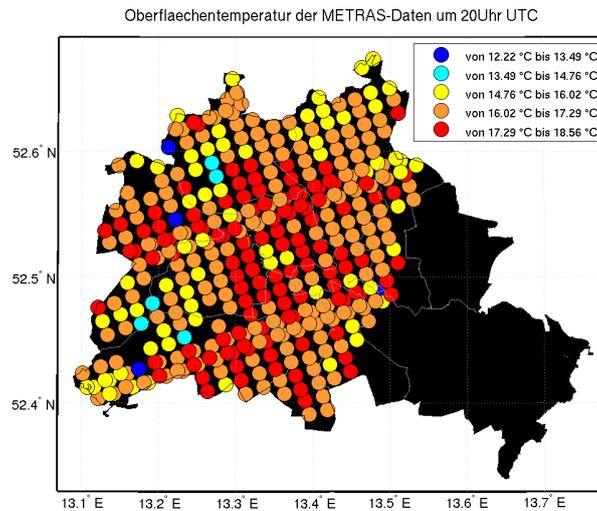


Abbildung 7.28.: Oberflächentemperaturverteilung der METRAS-Daten am 18. August 2012 um 21 Uhr LST

Nachdem die Oberflächentemperaturen von METRAS näher betrachtet wurden, sollen sie mit den Satellitendaten vom Instrument MODIS verglichen werden. In Abbildung 7.29 ist die Ober-

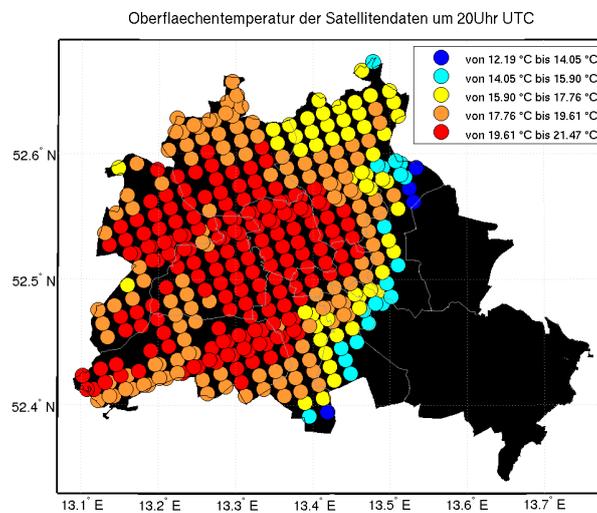


Abbildung 7.29.: Oberflächentemperaturverteilung der MODIS-Daten am 18. August 2012 um 20:20 Uhr UTC

flächentemperaturverteilung der Messwerte von MODIS eingetragen. Es zeigt sich, dass die Temperaturen im Osten viel niedriger sind. Danach brechen die Messwerte ab. Dies lässt darauf schließen, dass hier bereits Bewölkung vorhanden war. Aufgrund der Bewölkung werden vom Satelliten nicht nur die Oberflächentemperaturen gemessen, sondern auch die viel kälteren Temperaturen der Wolken. Dies führt dazu, dass die Temperaturen geringer sind.

Zusätzlich weisen diese Daten auch einen hohen Fehlerwert auf (siehe Abb. A.13). Deswegen

wurden alle Temperaturen, die unter 16 °C lagen, nicht zum Vergleich mit den METRAS-Daten herangezogen.

Im Unterschied zu den Oberflächentemperaturen von METRAS sind die Werte von MODIS viel gleichmäßiger und können Flüsse und Seen nicht darstellen. Dies liegt an der geringen Auflösung von 1km.

In Abbildung 7.30 sind zum Einen farblich die Temperaturdifferenz zwischen den MODIS und den METRAS-Daten dargestellt und zum Anderen wurden die Fehler der MODIS-Werte mit verschiedenen Symbolen eingetragen. Es bestätigt sich, dass die MODIS-Daten die Flüsse und Seen nicht auflösen können, so dass die größten Differenzen zwischen MODIS und METRAS darauf zurückzuführen sind. Auch der Tiergarten hat bei den MODIS-Daten keine niedrigere Temperatur. Die Rummelsburger Bucht zeigt sich auch mit höheren Temperaturdifferenzen.

Oberflächentemperaturdifferenz zwischen Satellitendaten und METRAS-Daten um 20Uhr UTC

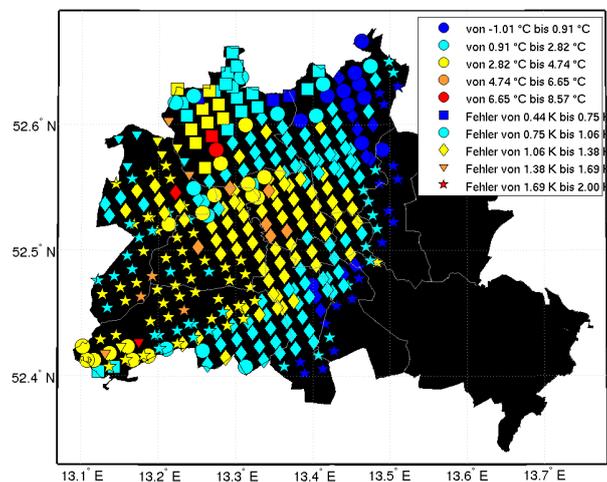


Abbildung 7.30.: Verteilung der Oberflächentemperaturdifferenzen zwischen METRAS und MODIS am 18. August 2012 um 20 Uhr UTC. Zusätzlich wurden die Fehler der MODIS-Daten mit unterschiedlichen Symbolen eingetragen.

Im Weiteren zeigen die Fehlerwerte von MODIS, dass im Osten die Werte immer noch ungenau sind. Ein weiterer großer Unsicherheitsbereich liegt über dem Grunewald und erstreckt sich über Wilmersdorf. Auch über dem Stadtzentrum liegen die Fehler zwischen 1K und 1,4K. Die geringsten Fehler von unter 1K werden vor allem im Norden von Berlin gemessen. Hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung der METRAS und der MODIS-Daten. Die Differenz liegt zum Teil im Bereich der Fehler der MODIS-Daten.

Tägliche Daten Um eine höhere statistische Aussagekraft der Werte zu erhalten, wurden zusätzlich noch die täglichen Daten von MODIS von Tag und Nacht gemittelt und mit einem Tagesmittel der METRAS-Daten verglichen. Es wurde ein mittlerer Biasfehler von 0,99K und ein mittlere prozentualer absoluter Fehler (MAPE) von 12% berechnet. Folglich werden die anderen Messpunkte sehr gut simuliert.

Kapitel 8

Fazit und Ausblick

Nachdem im Jahr 2012 sechs Messkampagnen im Rahmen des Projektes MILIEU - Centre for Urban Earth System Studies durchgeführt wurden, war es von Interesse, diese Daten auch auszuwerten und damit ein mesoskaliges Modell zu validieren. In dieser Arbeit wurde das Mesoskalige Transport- und Strömungsmodell METRAS für Berlin validiert. Da es im Modell nicht möglich ist, den Niederschlag zu simulieren, wo er in Realität fällt, wurden für die Validierung nur die drei Tage ausgewählt, an denen die Studenten keinen Niederschlag aufgezeichnet haben.

Zunächst wurden in Kapitel 5 die gemessenen Daten im Allgemeinen ausgewertet und auf die beiden Tage eingegangen, an denen von den Studenten Niederschlag aufgeschrieben wurde. Danach wurde noch die Nachtmessung und ein Stadt-Umland-Vergleich separat betrachtet.

Generell ist bei der Messkampagne zu beachten, dass die Studenten nur von 9 bis 16 Uhr (MESZ) unterwegs waren. Der städtische Wärmeinseleffekt bildet sich allerdings 3 - 5 Stunden nach Sonnenuntergang bei windstillen strahlungsintensiven Tagen am stärksten aus [Oke, 1981]. Jedoch konnte auch gezeigt werden, dass sich zwischen 10 und 13 Uhr (MEZ) eine städtische Kälteinsel ausbilden kann [Giovannini et al, 2011]. Dieser Effekt zeigt sich in den Daten darin, dass die Messstationen Fasanenstraße, Bambergerstraße und Dessauer Straße, obwohl sie mitten in der Stadt liegen, negative Abweichungen von der Mitteltemperatur haben. Es fällt jedoch auf, dass die Studenten diesen städtischen Kälteeffekt nicht gemessen haben. Dies liegt vermutlich daran, dass die Messgeräte keine Zeit hatten sich zu akklimatisieren und die Routen durch unterschiedliche Gebiete verliefen.

Auch bei der relativen Feuchte lässt sich ein Stadteffekt sehen. In der Stadt ist es überwiegend trockener als im Umland. Dieser Effekt kann sich zwar im Winter umkehren [Kuttler et al., 2007], allerdings wurden bei der Messkampagne nur Sommertage untersucht. Ein Zusammenhang zwischen Messungen mit hohen Temperaturen und niedriger relativer Feuchte konnte bei der Auswertung der Messkampagne festgestellt werden.

Bei der Auswertung der Messkampagne fiel auf, dass die Messwerte der Studenten einen großen

Range aufweisen. Dies liegt daran, dass an unterschiedlichen Messpunkten die Messwerte aufgezeichnet wurden. Auch liegt die Messgenauigkeit der verwendeten Trotec-Messgeräte nur bei 1K (siehe Tabelle 3.2).

Trotzdem konnte bei der Messkampagne gezeigt werden, dass die Bodenbeschaffenheit Einfluss auf die 5cm-Messwerte hat. Über Asphalt wurden im Mittel die höchsten Temperaturen und die niedrigsten relativen Feuchten gemessen. Dies liegt daran, dass aufgrund der Versiegelung der Oberfläche Niederschlag sofort abgeleitet wird und somit kein Wasser zur Verdunstung zur Verfügung steht. Die hohen Temperaturen hängen mit der Albedo von Asphalt zusammen. Dadurch wird die solare Einstrahlung absorbiert und als Wärmestrahlung wieder freigesetzt. Über Gras ist es im Allgemeinen feuchter, da sowohl das Gras Feuchtigkeit transpirieren als auch vom Erdboden Wasser evaporieren kann. Die Temperatur liegt zwischen der Temperatur von Asphalt und Sand, da Sand eine viel hellere Oberfläche hat, so dass ein hoher Anteil der Einstrahlung reflektiert und somit nicht in Wärme umgewandelt wird. Durch die fehlende Vegetation liegt Sand bei der relativen Feuchte zwischen Asphalt und Gras.

Da die Studenten überwiegend über Asphalt gemessen haben, liegen die Abweichungen der Messwerte im positiven Bereich. Ausnahme ist u.a. die Route 1, die im Tegeler Forst verlaufen ist. Bei der speziellen Betrachtung der Route Wuhlheide/Rummelsburg fiel auf, dass besonders die Abschattungseffekte wichtig sind, da es über Asphalt im Wald unter Bäumen trotzdem kälter als über einer Wiese ist, die in der Sonne liegt.

Bei der Nachtmessung zeigte sich, dass die gemittelten Temperaturen der Messkampagne wärmer als die gemittelten Messwerte der Institute sind, da sie überwiegend über Asphalt gemessen haben. Zusätzlich fällt der Stadteffekt auf. Das heißt, dass sich die Luft auf dem Land schneller erwärmt, als in der Stadt. Auf diesen Effekt wurde gesondert eingegangen.

Bei der Auswertung des Stadtmessnetzes der Freien Universität Berlin (FU) fällt neben der Fasanenstraße vor allem der Messstandort am Tegeler See auf. Aufgrund der Montage direkt über dem See wurden hier immer die niedrigsten Temperaturen gemessen. Wie bereits erwähnt, hängt dies mit der immer zur Verfügung stehenden Feuchte zusammen. Im Weiteren wird dieses Messgerät künstlich belüftet, so dass verstärkt Verdunstungskälte erzeugt wird. Bei den anderen beiden Seen, Wannsee und Müggelsee, stehen die Messgeräte abseits vom See, so dass hier der Einfluss des Sees von der Wetterlage abhängig ist. Dieser Effekt besteht darin, dass kühlere Temperaturen und höhere relative Feuchten gemessen werden, wenn der Wind vom See her weht. Beim Tegel-Forstamt zeigt sich, dass durch das Gras/Sand-Gemisch als Untergrund die Temperaturmesswerte trockener und höher als über Gras sind. Der Unterschied zwischen den Temperaturen im Botanischen Garten und auf dem FB-Fichtenberg wird zum Teil dadurch verursacht, dass der Botanische Garten bewässert wird und der Messgarten auf dem FB-Fichtenberg nicht.

Beim Messnetz der TU fiel besonders die Messstation in der Spandauer Straße mit sehr hohen positiven Temperaturabweichungen auf. Die Auswertung der 2m-Temperatur für mehrere Berliner Messstationen über einen Zeitraum von 5 Jahren (siehe Abb. 2.2) zeigt, dass dieser Messstandort im Mittel negative Abweichungen aufweist. Dies könnte der ländlich geprägte Effekt gegenüber der städtische Kälteinsel sein, der sich in den Daten von der Dessauer Straße, dem Tiergarten und der Bambergerstraße zeigt. Jagen91 und Köpenick haben aufgrund ihrer abgeschatteten Lage im

Wald niedrigere Temperaturen als im Mittel. Sehr feucht und kühl ist es besonders in der Albrechtstraße. Dies hängt mit der Lage der Messstation in einer Kleingartenkolonie und der Nähe zum Teltowkanal zusammen.

Die Messnetze des DWD und der Firma Meteomedia ähneln sich in der Hinsicht, dass beide einen geringen Range aufweisen und im Mittel ausgeglichene Temperaturen messen. Bei den fünf hier ausgewerteten Tagen lagen die Temperaturen der Firma Meteomedia im Mittel über den Temperaturen des DWD.

Außerdem wurden die Daten der HTW verwendet. Diese sind in drei Meter über dem Dach der Universität in Schöneweide aufgezeichnet worden. Obwohl die Daten nicht in 2m Höhe gemessen wurden, gibt es eine gute Korrelation.

Zusätzlich wurde der Unterschied zwischen 2m und 12m Daten am ehemaligen Flughafen Tempelhof untersucht. Hier zeigte sich ein Temperaturunterschied von im Mittel 1K. Dieser ist geringer als der Temperaturunterschied innerhalb der Stadt.

Dieser Vergleich wurde dazu herangezogen, um zu zeigen, dass die gemessenen 2m- Temperaturen mit den simulierten 10m-Temperaturen verglichen werden können. Jedoch zeigte sich, dass in 10m Höhe die Werte viel ausgeglichener waren und die kleinskaligen Effekte des Untergrundes nicht wiedergeben konnten. Es wäre hilfreich, wenn das Modell METRAS auch die 2m-Temperaturen simulieren könnte.

Bei den drei ausgewerteten Tagen fällt auf, dass METRAS immer mehr Niederschlag simuliert hat, als gemessen wurde. Dass METRAS die Feuchte nur bedingt gut wiedergeben kann, zeigt sich schon in der Arbeit zur Verifikation des Modells [Dierer, 1997]. Dies hängt mit folgenden Faktoren zusammen:

Am ersten und dritten Tag (2. Juni 2012 und 1. September 2012) liegt der erhöhte Niederschlag daran, dass das verwendete Kessler Schema die Wolken- und Niederschlagsbildungsprozesse überschätzt. Speziell am 2. Juni 2012 gab es im Norden von Deutschland viele Schauerereignisse. Jedoch nicht über Berlin. Wegen der hohen Luftfeuchtigkeit wurde im Modell allerdings eine durchgehende Wolkendecke simuliert. Außerdem wurden auch im Norden von Berlin Regenwassergehalt simuliert. Dies zeigt, dass es im Modell aufgrund der Parametrisierungen schwierig ist Niederschlagsereignisse exakt wiederzugeben. Am 1. September 2012 wurden Schauer simuliert, obwohl keine gemessen wurden, dies zeigt, dass gerade auch bei konvektiven Ereignissen Schwierigkeiten bestehen.

Am zweiten Tag, dem 18. August 2012, gab es am Vormittag Nebelbildung. Dieser Nebel konnte entstehen, da im Modell der Boden immer Feuchtigkeit zur Verfügung hat und nicht berücksichtigt wird, dass der Boden im Sommer ausgetrocknet sein könnte. In der Woche vor dem 18. August 2012 gab es in Realität 5 Tage lang keinen Niederschlag, so dass der Boden nicht gesättigt war und deshalb nicht genug Feuchtigkeit zur Nebelbildung vorhanden war.

Aufgrund des Niederschlages waren die simulierten Temperaturen allgemein geringer als die gemessenen. Es gab allerdings auch Ausnahmen. Wie zu erwarten lagen in der Nacht die simulierten Temperaturen unter der Wolkendecke über den gemessenen Daten. Außerdem sind die 2m Temperaturen aufgrund der Ausstrahlung in der Nacht niedriger als in 10m Höhe.

Bei der Betrachtung der Differenzen zwischen den simulierten und den gemessenen Temperaturen fällt auf, dass am ersten Tag sowohl der mittlere absolute Fehler als auch der Biasfehler zwischen 1K und 4,21K liegt. Da die gemessenen Daten einen Range von 4K aufweisen, liegen diese Werte trotz Bewölkung im Rahmen. Der zweite Tag hat einen Range von 3 bis 9K. Dies liegt daran, dass durch die Bewölkung am Morgen im Modell sich die Temperaturen im Tagesverlauf nicht so stark erwärmen konnten, wie in Realität. Am 1. September hat der gemittelte Biasfehler einen Fehlerbereich von -0,68 bis 3,09K. Dies ist um 1K zu den gemittelten Abweichungen der gemessenen Daten verschoben. Das ist auf den Temperaturunterschied zwischen 2m und 10m Höhe zurückzuführen, denn beim Vergleich der 2m- mit den 12m-Temperaturen am ehemaligen Flughafen Tempelhof wurde ein Temperaturunterschied von 1K festgestellt. Dies weist darauf hin, dass das Modell die Temperaturen, wenn nicht zu viel Niederschlag simuliert wurde, gut wieder geben kann.

Bei der Oberflächentemperatur zeigte sich, dass diese die Strukturen der jeweiligen Oberflächenbeschaffenheit gut wieder gibt.

Beim Vergleich der MODIS-Daten mit den METRAS-Daten ist Vorsicht geboten, da es keine Uhrzeit gab, an denen der Himmel wolkenlos war. Durch Wolken werden die Satellitendaten sehr verfälscht, da sie dann die Wolkenoberflächentemperatur messen und nicht die Oberflächentemperatur. Die Wolken sind im Allgemeinen viel kälter als die Oberfläche. Jedoch können gerade am Rand einer Wolke oder bei einer sehr dünnen Cirrusbewölkung die eigentlichen Wolkentemperaturen mit Bodenoberflächentemperaturen verwechselt werden. Bei der Auswertung der 20 Uhr (UTC) Daten zeigte sich auch, dass die Fehler bei den MODIS-Daten sehr hoch sind und kaum vertrauenswürdige Daten zur Verfügung stehen. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass aufgrund der geringeren Auflösung der Satellitendaten der Einfluss von Seen und Flüssen nicht gemessen werden kann. Beim Vergleich mit den täglichen Daten zeigte sich eine gute Übereinstimmung der METRAS-Daten mit den MODIS-Daten mit einem prozentualen Fehler von 12% und einem Biasfehler von 1K.

Im Bezug auf des Wohlbefinden des Menschen wäre es wichtig die 2m-Temperatur zu simulieren. Um kleinräumige Effekte wie z.B. Windböen zu simulieren, müsste die Gitterauflösung noch erhöht werden. Jedoch werden stadtklimatische Effekte, wie die Abwärme aus der Stadt bereits gut wiedergegeben, so dass das Modell verwendet werden könnte, um Hitzestressbereiche zu qualifizieren. Außerdem müsste eine andere Niederschlagsparametrisierung verwendet werden, da an jedem ausgewerteten Tag zu viel Niederschlag simuliert wurde.

Um eine Aussage über den Heat Index treffen zu können, müsste zusätzlich noch die simulierte relative Feuchte untersucht werden. Für METRAS wäre es von Interesse, einen Tag ohne Niederschlag zu simulieren und zu untersuchen, ob METRAS dann in der Lage ist eine städtische Wärmeinsel zu simulieren oder nur wenn die optimalen Voraussetzungen vorgegeben werden. Außerdem wäre es interessant, auch Tage im Winterhalbjahr oder bei einer Stratusbewölkung zu simulieren. Für weitere Untersuchungen wäre es interessant die Messkampagnendaten mit anderen mesoskaligen Modellen zu validieren und besonders auch mit mikroskaligen Modellen, bei denen der Effekt durch die Abschattung der Häuser auch betrachtet werden kann.

Danksagung

Als erstes bedanke ich mich bei Prof. Dr. Sahar Sodoudi für die sehr gute Betreuung. Sie war zu jeder Zeit ansprechbar und hat mir immer gute Ratschläge gegeben.

Für die Begutachtung meiner Masterarbeit möchte ich mich bei Prof. Dr. Ulrich Cubasch bedanken.

Ganz besonders bedanke ich mich bei Prof. Dr. Heinke Schlünzen, die mir mit der zur Verfügungstellung ihres Modells erst ermöglicht hat, diese Arbeit zu schreiben.

Danke sage ich auch der Firma Meteomedia für die zur Verfügungstellung der Daten.

Außerdem bedanke ich mich bei Jochen Werner dafür, dass ich sein Foto verwenden durfte.

Herrn Gregori Lockot sei gedankt für die gute Hilfe mit ArcMap und Herrn Markus Kunze für Hilfe und Erklärung der ECMWZ-Daten.

Auch den freundlichen Mitarbeitern in Hamburg, David Grawe, Björn Fock, Ronny Petrik möchte ich für die Hilfe und Unterstützung mit METRAS danke sagen.

Bei Thomas Bergmann möchte ich mich besonders bedanken, da er jederzeit ansprechbar war und mir sehr oft bei kleineren oder größeren Computer-, Unix- oder auch Programmierproblemen geholfen hat.

Weiterhin bin ich über die hilfreichen Kommentare zu meiner Masterarbeit von Petra Gebauer, Ines Langer, Oliver Kunst, Julia Sieland, Katharina Lange, Nadine Basuk, Marcus Jurk, Elias Horn und meinem Vater sehr dankbar.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Literaturverzeichnis

- [Abegg, 2011] Abegg B., 2011. Compact: Tourismus im Klimawandel. CIPRA International, No. 01
- [Ackerman, 1985] Ackerman B., 1985. Temporal March of the Chicago Heat Island, American Meteorological Society, Vol. 24, 547 - 554
- [Asaeda und Vu Thanh Ca, 1993] Asaeda T. und Vu Thanh Ca, 1993. The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: a numerical model, Boundary-Layer Meteorology, Vol. 65, 159 - 179
- [Arnfield, 2002] Arnfield A. J., 2002. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island, Int. J. Climatol., Vol. 23, 1 - 26
- [Beck und Stadlbacher, 2004] Beck A., Ahrens B. und Stadlbacher K., 2004. Impact of nesting strategies in dynamical downscaling of reanalysis data, Geophys. Res. Lett., Vol. 31, L19101, doi:10.1029/2004GL020115
- [Belger, 1940] Belger W., 1940. Der Großstadteinfluß auf nichtstationäre Regenfronten und ein Beitrag zur Bildung lokaler Wärmegewitter, Dissertation an der Philosophischen Fakultät der Universität Berlin
- [Berliner Wetterkarte] Berliner Wetterkarte e.V., 2012. Berliner Wetterkarte. Vol. 61, Nr 77,104,109,159-161,169
- [Chen und Ng, 2011] Chen L. und Ng E., 2011. Quantitative urban climate mapping based on a geographical database: A simulation approach using Hong Kong as a case study, Int. J. of Applied earth observation and Geoinformation, Vol. 13, 586 - 594
- [Cubasch (Ed.), 2012] Cubasch U. (Ed.), 2012. MILIEU Final Projekt Report.
- [Dandou et al., 2005] Dandou A., Tombrou M., Akylas E., Soulakellis N., Bossioli E., 2005. Development and evaluation of an urban parameterization scheme in the Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), J. Geophys. Res., Vol. 110, D10102, doi:10.1029/2004JD005192
- [Dierer, 1997] Dierer S., 1997. Evaluierung des mesoskaligen Transport- und Strömungsmodells METRAS. Diplomarbeit, Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg

- [Elfattah, 2013] Elfattah A. A. A., 2013. The effect of urban form on urban heat island phenomenon in Cairo. Masterarbeit, Universität Cairo
- [Flagg et al., in Bearbeitung] Flagg D. D., Schoetter R., Fock B. H., Grawe D., Schlünzen K. H., Kirschner P. From Land-Use to Surface Cover for Mesoscale Atmospheric Models. in preparation for Theoretical and Applied Climatology
- [Gdowska, in Arbeit] Gdowska N.C., in Arbeit. Untersuchung des städtischen Wärmeinseleffekts von Berlin anhand der Hitzeperioden in den Jahren 2006 und 2010. Bachelorarbeit, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin
- [Gerstengarbe und Werner, 1999] Gerstengarbe F.-W. und Werner P.C., 1999. Katalog der Großwetterlagen Europas (1881 - 1998) Nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky, 5., verbesserte und ergänzte Auflage
- [Giovannini et al, 2011] Giovannini L., Zardi D., De Franceschi M., 2011. Analysis of the Urban Thermal Fingerprint of the City of Trento in the Alps. American Meteorological Society. Vol. 50, 1145 - 1162
- [Harris und Durran, 2009] Harris L. M. und Durran D. R., 2009. An Idealized Comparison of One-Way and Two-Way Grid Nesting. Monthly Weather Review. Vol. 138, 2174 - 2187
- [Hoffmann, 2009] Modifikation von Starkniederschlägen durch urbane Gebiete. Diplomarbeit, Meteorologisches Institut der Universität Hamburg
- [Howard, 1833] Howard L., 1833. Climate in London Deduced from Meteorological Observations. Harvey and Darton, London, 3. Edition, Vol. 1, 348 pp
- [International Disaster Database, 2013] International Disaster Database, 2013. EM-DAT: The OF-DA/CRED International Disaster Database, www.emdat.be - Universität catholique de Louvain - Brussels - Belgium, v12.07
- [Jacob und Winner, 2009] Jacob D.J. und Winner D.A., 2009. Effect of climate change on air quality, Atmospheric Environment, Vol. 43, 51 - 63
- [Jarvis et al., 2006] Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E., 2006. Hole-filled seamless SRTM data V3, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- [Johansson, 2006] Johansson E., 2006. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco, Building and Environment, Vol. 41, 1326 - 1338
- [Jonsson, 2004] Jonsson P., 2004. Vegetation as an urban climate control in the subtropical city of Gaborne, Botswana, int. J. of Climatol. Vol. 24, 1307 - 1322
- [Kawamoto und Ooka, 2009] Kawamoto Y. und Ooka R., 2009. Accuracy validation of urban climate analysis model using MM5 incorporating a multi-layer urban canopy model, The seventh International Conference on Urban Climate 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan

-
- [Kessler, 1969] Kessler E., 1969. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations. Meteor. Monogr. No. 32 American Meteorological Society, Boston, p. 81ff
- [Kratzer, 1959] Kratzer A.P., 1959. Das Stadtklima, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. p. 66 - 85
- [Kuttler et al., 2007] Kuttler W., Weber S., Schonnefeld J., Hesselschwerdt A., 2007. Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany. Int. J. Climatol., Vol. 27, 2005 - 2015
- [Kuttler, 2008] Kuttler W., 2008. Zum Klima im urbanen Raum, Klimastatusbericht vom DWD, p. 6 - 12
- [Liu et al., 20011] Liu Y., Warner T., Liu Y., Vincent C., Wu W., Mahoney B., Swerdlin S., Parks K., Boehner J., 2011. Simultaneous nested modeling from the synoptic scale to the LES scale for wind energy applications, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 99, 308-319
- [Lorenz und Jacob, 2005] Lorenz P. und Jacob D., 2005. Influence of regional scale information on the global circulation: A two-way nesting climate simulation. Geophys. Res. Lett., 32, L18706, doi:10.1029/2005GL023351
- [Lüpkes, 1991] Lüpkes C., 1991. Untersuchung zur Parametrisierung von Koagulationsprozessen niederschlagsbildender Tropfen. Verlag Dr. Kovac, Universität Frankfurt, Frankfurt, p. 156ff
- [Lüschner, 2012] Lüschner R., 2012. Dokumentation IBA-Werkstattgespräch: Verdichtung?! Umgang mit städtischen Raum - Begrüßung. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, p. 4
- [Miao et al., 2008] Miao S., Chen F., LeMone M. A., Tewari M., Li Q., Wang Y., 2008. An Observational and Modeling Study of Characteristics of Urban Heat Island and Boundary Layer Structures in Beijing. Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol. 48, 484 - 501
- [Morris und Simmonds, 2000] Morris C.J.G. and Simmonds I., 2000. Associations between varying magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in Melbourne, Australia. Int. J. Climatol., Vol. 20, 1931 - 1954
- [Nakamura und Oke, 1988] Nakamura Y. und Oke T. R., 1988. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. Atmospheric Environment, Vol. 22, No. 12, 2691 - 2700
- [Nehrkorn et al., 2013] Nehrkorn T., Henderson J., Leidner M., Mountain M., Eluszkiewicz J., McKain K., Wofsy S., 2013. WRF Simulations of the Urban Circulation in the Salt Lake City Area for CO2 Modeling. Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol. 52, 323 - 340 doi:<http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-12-061.1>
- [Oke, 1978] Oke T. R., 1978. Boundary Layer Climates, Methuen & Co Ltd, London, p. 15, 147 - 159, 240 - 267

- [Oke, 1981] Oke T. R., 1981. Canyon Geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of climatology*, Vol. 1, 237 - 254
- [Oke, 1988] Oke T. R., 1988. The urban energy balance. *Progress in Physical Geography* 12: 471, doi: 101177/030913338801200401
- [Papanastasiou und Kittas, 2011] Papanastasiou K. D. und Kittas C., 2011. Maximum urban heat island intensity in a medium-sized coastal Mediterranean city. *Theor. Appl. Climatol.* Vol. 107, p. 407 - 416
- [Saito et al., 1990] Saito I., Ishihara O., Katayama T., 1990/91. Study of the Effect of Green Areas on the Thermal Environment in an Urban area. *Energy and Buildings*, Vol. 15 - 16, p. 493 - 498
- [Schlegel, 2013] Schlegel, 2013. Auswertung und Kombination verschiedener Datenquellen und deren Visualisierungsmöglichkeiten an einer Medienfassade. Masterarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
- [Schlünzen et al., 1996a] Schlünzen, K. H., Bigalke, K., Lüpkes, Ch., Niemeier, U. und Von Salzen, K., 1996a. Concept and realization of the mesoscale transport- and fluid model 'METRAS'. METRAS technical report, 5, Meteorologisches Institut, Universität Hamburg
- [Schlünzen et al., 1996b] Schlünzen, K. H., Bigalke, K., Lüpkes, Ch., Niemeier, U. und Von Salzen, K., 1996b. Hints for using the mesoscale model METRAS. METRAS technical report, 6, Meteorologisches Institut, Universität Hamburg
- [Schönwiese, 2006] Schönwiese, C.-D., 2006. *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 4. Auflage, p. 164 - 168
- [Shashua-Bar und Hoffman, 1999] Shashua-Bar L. und Hoffman M.E., 1999. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings*, Vol. 31, 221-235.
- [Stanhill und Kalma, 1995] Stanhill G. und Kalma J. D., 1995. Solar dimming and urban heating at Hong Kong. *Int. J. of Climatol.*, Vol. 15, 933 - 941
- [Statistische Ämter der Länder, 2011] Statistische Ämter der Länder, 2011. *Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder - Inanspruchnahme der Umwelt durch Produktion und Konsum in den Bundesländern - Ausgewählte Indikatoren und Kennzahlen - Analysen und Ergebnisse*, p. 31 - 35
- [Umweltatlas, 2001] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, 2001. *Umweltatlas Berlin - Klima* (Ausgabe 04.02) Fundstelle: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ia402.htm> (Stand 14.05.2013)
- [Umweltatlas, 2007] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, 2007. *Umweltatlas Berlin - Wasser* (Ausgabe 02.13) Fundstelle:

-
- <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ib213.htm> (Stand 24.05.2013)
- [Umweltatlas, 2012] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, 2012. Umweltatlas Berlin - Versiegelung (Ausgabe 01.02) Fundstelle: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ic102.htm> (Stand 13.05.2013)
- [United Nations, 2008] United Nations, 2008. World Urbanization Prospects - The 2007 Revision - Highlights, Department of Economic and Social Affairs
- [Vaisala] Vaisala. Bedienungsanleitung HMP35A & HMP35D. Doc. no. HMP35A-OO217-2.1
- [Wilks, 2006] Wilks D.S., 2006. Statistical methods in the atmospheric science, International Geophysics Series, Vol. 91, 2. Auflage, p. 278-280
- [Wilmers, 1990] Wilmers F., 1990/91. Effects of Vegetation on Urban Climate and Buildings. Energy and Buildings, Vol. 15 - 16, 507-514
- [WitterungsReport Express] Deutscher Wetterdienst, 2012. WitterungsReport Express. Vol. 14, Ausgaben 5 - 9
- [Yilmaz et al, 2008] Yilmas H., Toy S., Irmak M. A., Yilmaz S. und Bulut Y., 2008. Determination of temperature differences between asphalt concrete, soil and grass surface of the City of Erzurum, Turkey. *Atmósfera*, Vol. 21(2), 135 - 146

Anhang A

Anhang

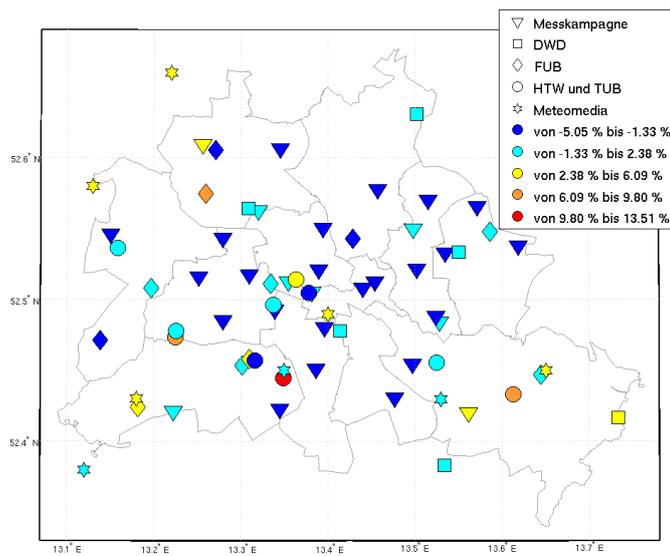


Abbildung A.1.: Verteilung der gemittelten Abweichungen der relativen Feuchte in Berlin von allen Messwerten

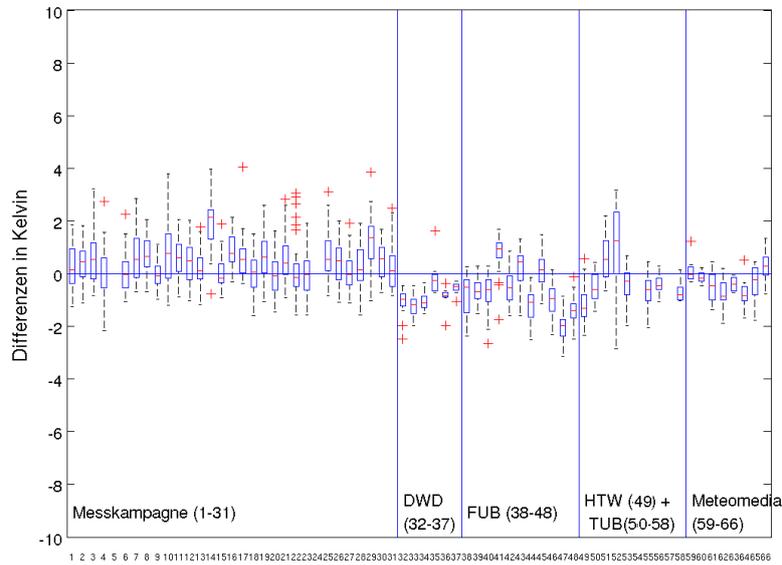


Abbildung A.2.: Abweichungen der Temperatur vom zeitlichen Mittelwert für alle Messwerte am 21. April 2012

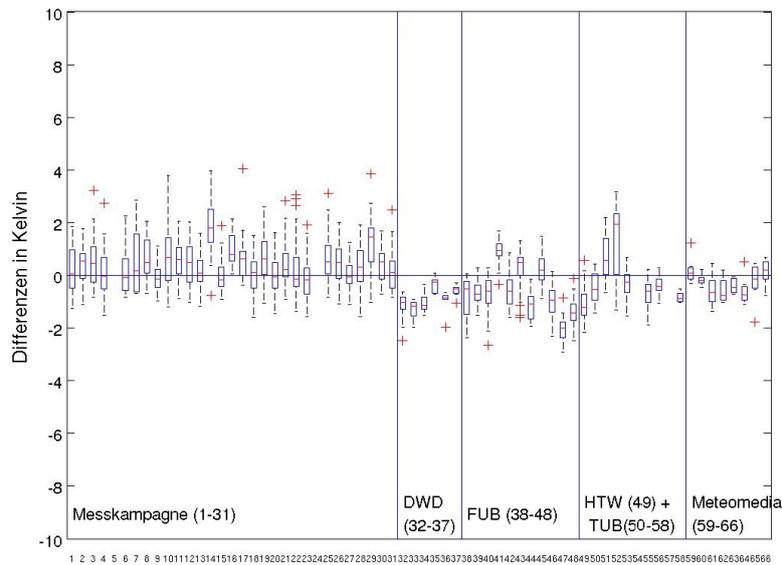


Abbildung A.3.: Abweichungen der Temperatur vom zeitlichen Mittelwert am 21. April 2012 ohne die Werte zwischen 14:30 und 15:30 Uhr MESZ.

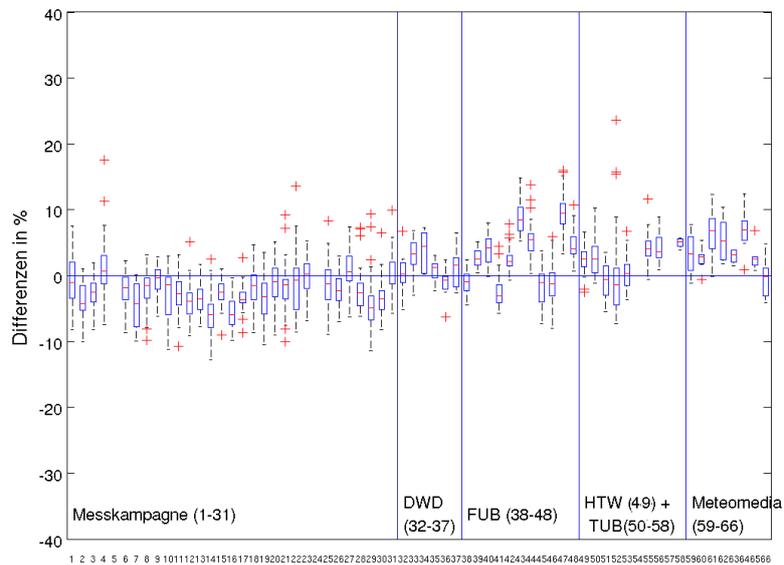


Abbildung A.4.: Abweichungen der 2m relativen Feuchte vom zeitlichen Mittelwert für alle Messwerte am 21. April 2012

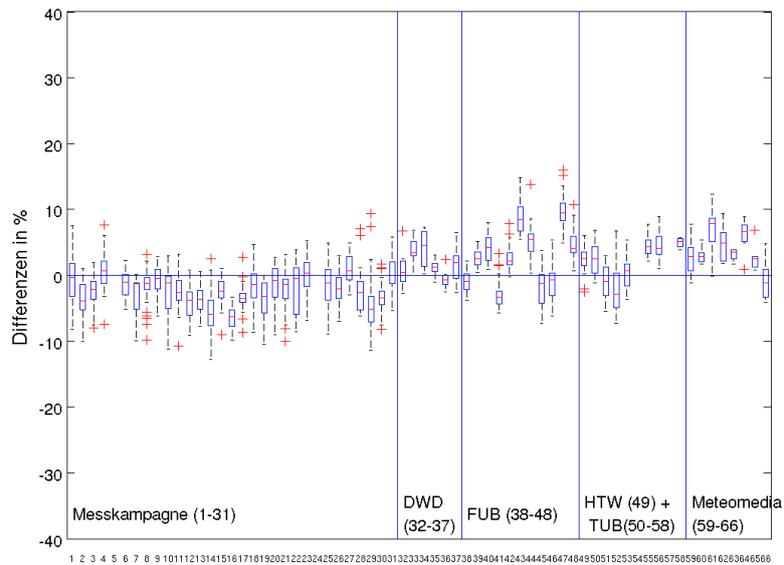


Abbildung A.5.: Abweichungen der 2m relativen Feuchte vom zeitlichen Mittelwert am 21. April 2012 ohne die Werte zwischen 14:30 und 15:30 Uhr MESZ

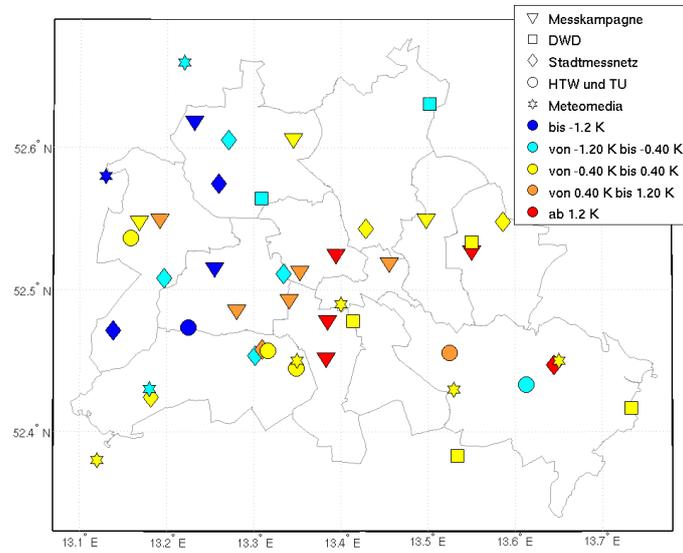


Abbildung A.6.: Verteilung der gemittelten Abweichungen der 2m-Temperatur am 4. August 2012 für Berlin

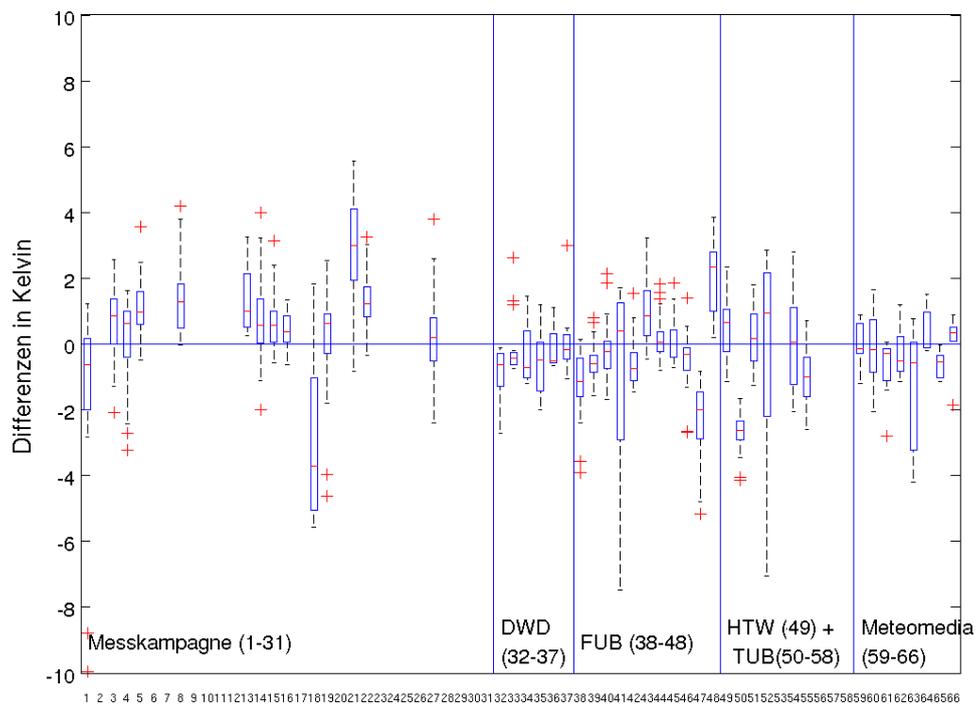


Abbildung A.7.: Abweichungen der 2m-Temperatur vom zeitlichen Mittelwert am 4. August 2012 für Berlin

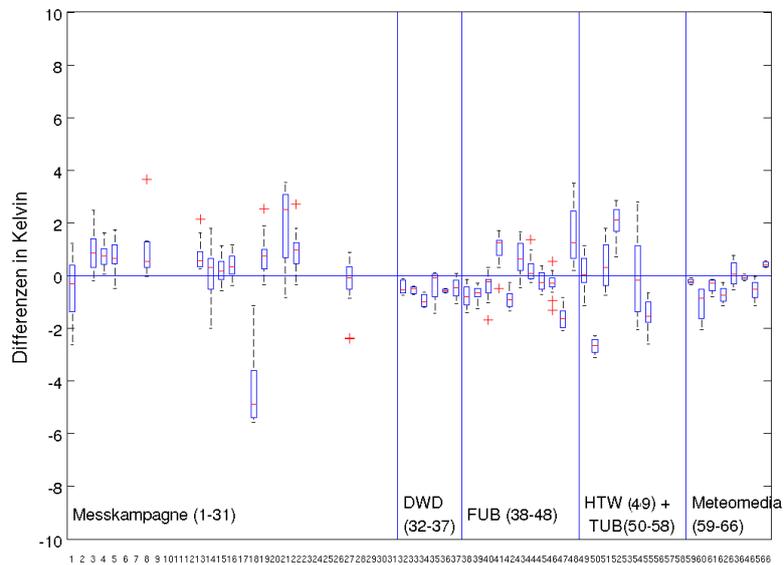


Abbildung A.8.: Abweichungen der 2m-Temperatur vom zeitlichen Mittelwert am 21. April 2012 bis 13 Uhr MESZ

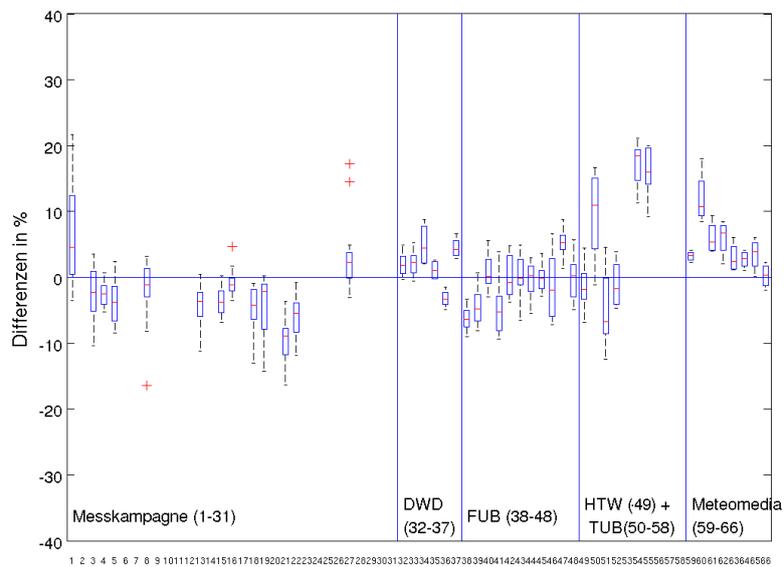


Abbildung A.9.: Abweichungen der 2m relativen Feuchte vom zeitlichen Mittelwert am 21. April 2012 bis 13 Uhr MESZ

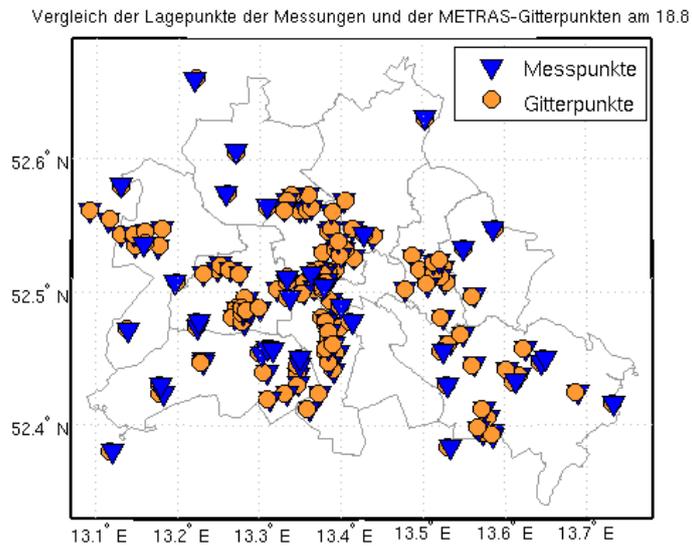


Abbildung A.10.: Vergleich zwischen den Lagepunkten der Messungen und den METRAS-Gitterpunkten am 18. August 2012. Die Lagepunkte wurden mit blauen Dreiecken und die Gitterpunkte mit orangefarbenen Kreisen markiert.

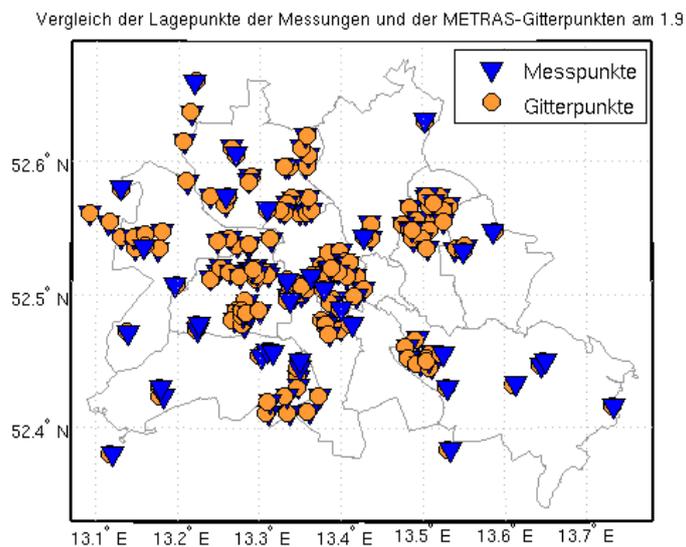


Abbildung A.11.: Vergleich zwischen den Lagepunkten der Messungen und den METRAS-Gitterpunkten am 1. September 2012. Die Lagepunkte wurden mit blauen Dreiecken und die Gitterpunkte mit orangefarbenen Kreisen markiert.

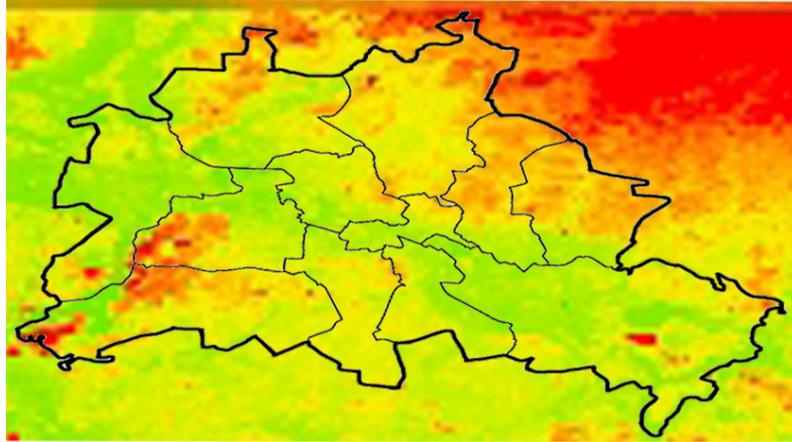


Abbildung A.12.: Topographie von Berlin

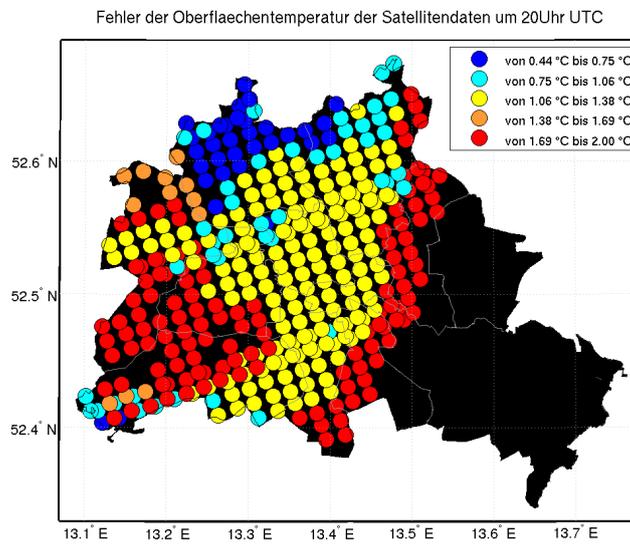


Abbildung A.13.: Fehler der Oberflächentemperaturen von MODIS am 18. August 2012 um 20:20 Uhr UTC