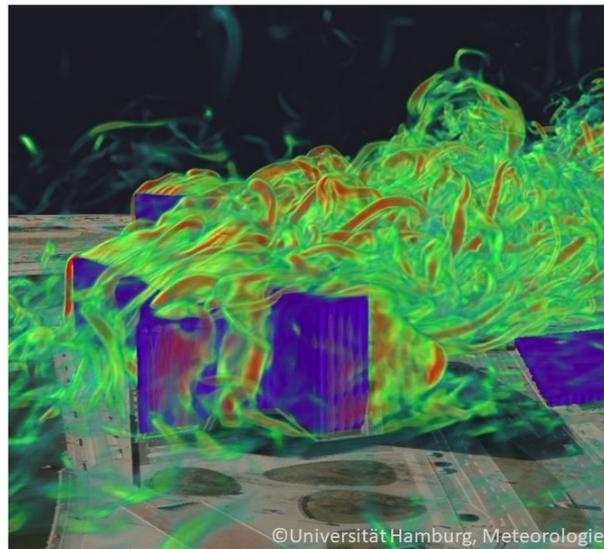


# [UC]<sup>2</sup>-Evaluierungsbericht

## Teil 2

Version 1, 06.05.2024



Scherer, D., Holtmann, A., Ament, F., Fehrenbach, U., Goldberg, V., Grassmann, T., Hansen, A., Holst, C., Kiseleva, O., Klemp, D., Langer, I., Leitl, B., Maronga, B., Meier, F., Meusel, G., Philipp, A., Queck, R., Raasch, S., Samad, A., Scherber, K., Schinke, O., Schneider, C., Steikert, R., Sühling, M., Venkatraman Jagatha, J., Vogt, U., Weber, S., Wegener, R., Erbertseder, T.

Arbeitsgruppe "Modellevaluierung" der Fördermaßnahme

**[UC]<sup>2</sup> Urban Climate Under Change  
Stadtklima im Wandel**

gefördert durch das



Dieser Bericht ist mit der Lizenz CC BY 4.0 verfügbar unter <https://doi.org/10.14279/depositonce-20441>

## Vorwort

Der vorliegende Evaluierungsbericht (Teil 2) wurde von der Arbeitsgruppe 'Modellevaluierung' im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme 'Stadtklima im Wandel' (Urban Climate Under Change [UC]<sup>2</sup>; Scherer et al., 2019a) erstellt und umfasst Beiträge aller Teilprojekte zu den entsprechenden Projektaktivitäten. Die Arbeitsgruppe wurde als programmweite Aktivität eingerichtet, um ein Konzept zur Modellvalidierung zu entwickeln und den gesamten Prozess der Modellevaluierung in der Fördermaßnahme<sup>1</sup> zu koordinieren.

Im vorliegenden Teil 2 des Evaluierungsberichts werden die Evaluierungsergebnisse vorgestellt. Ferner werden Kerndiagnostiken beschrieben, welche die Grundlage für ein weiterentwickeltes Evaluierungskonzept für moderne Stadtklimamodelle schaffen sollen. Teil 1 des [UC]<sup>2</sup>-Evaluierungsberichts umfasst das Evaluierungskonzept sowie die Beschreibung der qualitätsgeprüften Referenzdaten. In der Fördermaßnahme wurde zudem ein Evaluationsbericht zur Praxistauglichkeit von PALM-4U durch den Verbund ProPolis in Förderphase 2 erstellt (Burmeister et al., 2023).

Die Fördermaßnahme [UC]<sup>2</sup> stellte sich der Herausforderung, Großstädten und Stadtregionen ein wissenschaftlich fundiertes, praxistaugliches Instrumentarium zur Bewältigung der mit heutigen und zukünftigen Wetter- und Klimabedingungen und Luftbelastungen einhergehenden Probleme an die Hand zu geben. Bereits heute verursachen Starkniederschläge und Stürme, Hitze- und Kältewellen, Trockenperioden und Dürren sowie Episoden mit erhöhter Luftbelastung gravierende wirtschaftliche Schäden und Gesundheitsbelastungen bis hin zu Todesfällen. In Städten besteht durch die Konzentration der Bevölkerung einerseits sowie die von urbanen Strukturen verursachten Modifikationen der atmosphärischen Prozesse andererseits ein besonders hoher diesbezüglicher Handlungsbedarf. Durch die regionalen Folgen des globalen Klimawandels werden sich diese Probleme in den nächsten Jahrzehnten weiter verstärken und zusätzliche Anstrengungen erforderlich machen.

Ein zentrales Ziel der Fördermaßnahme war die Entwicklung, Validierung und Anwendung des auf dem Grobstrukturmodell (Large Eddy Simulation; LES) PALM (Parallelized Large-Eddy Simulation Model) basierenden gebäudeauflösenden Stadtklimamodells PALM-4U (PALM for urban applications; gesprochen: PALM for you) für ganze Großstädte wie Stuttgart,

---

<sup>1</sup> Die Arbeitsgruppe Modellevaluierung begann in der Förderphase 1 (2016-2019) und wurde in Phase 2 der Fördermaßnahme (2019-2022) als programmweite Aktivität fortgeführt

Hamburg oder Berlin. Bisher verfügbare Stadtklimamodelle waren entweder zu grobmaschig, um die gerade für die Planung von Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung des Stadtklimas, zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel sowie zur Verbesserung der Luftreinhaltung äußerst wichtigen mikroskaligen (Gebäude und Straßenschluchten) und lokalskaligen (Stadtquartiere) Prozesse auflösen zu können, oder sie deckten nur kleinere Stadtgebiete ab und konnten nicht an großräumige numerische Modelle gekoppelt werden, wie sie in der Wettervorhersage oder für regionale Klimaprojektionen zum Einsatz kommen.

Damit PALM-4U in der Lage ist, einen Beitrag zur Lösung der zuvor genannten Probleme zu leisten, musste dieses zunächst hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit evaluiert und beurteilt werden. Dazu sind umfassende Daten zu Wetter, Klima und Luftqualität in Großstädten erforderlich. Leider sind solche Daten bis heute nur begrenzt verfügbar, was insbesondere für mehrjährige oder gar multidekadische atmosphärische Langzeitbeobachtungen in Städten gilt. Daher wurden im Rahmen der [UC]<sup>2</sup>-Fördermaßnahme bereits verfügbare Daten aufbereitet und fehlende Daten über Langzeitmessungen und Intensivmesskampagnen neu erhoben. Dazu wurden auch verbesserte Konzepte und Analysewerkzeuge erforderlich, deren Erarbeitung ein wichtiges Ziel der Fördermaßnahme darstellte.

Eine weitere unabdingbare Anforderung an PALM-4U war seine Praxistauglichkeit. Dies bedeutet, dass die Modellergebnisse einerseits belastbare Aussagen für eine Vielzahl konkreter Anwendungen ermöglichen sollen, und andererseits die Anforderungen an die Rechnerinfrastruktur und Fachkenntnisse der potenziellen Nutzer/innen möglichst gering sind. Daher bestand ein weiteres zentrales Ziel der Fördermaßnahme darin, ausgewählte Anwendungsbeispiele und Nutzerkreise direkt in die Modellentwicklung und Messdatenerhebung zu integrieren, um die Praxistauglichkeit des Stadtklimamodells und der Messkonzepte und Analysewerkzeuge sicherzustellen.

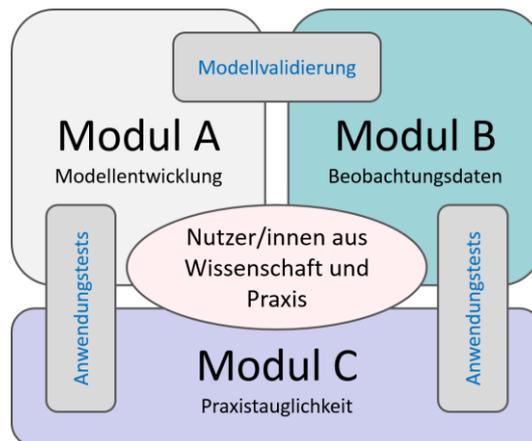


Abb. 0.1: Modellvalidierung als modulübergreifende Aufgabe in der Fördermaßnahme [UC]<sup>2</sup> (Scherer et al., 2019a).

Um das breite Spektrum und die Komplexität der Forschungs- und Entwicklungsaufgaben zu adressieren, wurde die Fördermaßnahme<sup>2</sup> [UC]<sup>2</sup> wie in Abb. 0.1 dargestellt organisiert: Drei Forschungsmodule (A – C) wurden implementiert, um bestimmte Aufgaben zu übernehmen: Entwicklung und Test des Stadtklimamodells PALM-4U (Modul A; Verbund MOSAIK<sup>3</sup>; Maronga et al., 2019; Maronga et al., 2020), Erfassung von Beobachtungsdaten für die Modellvalidierung (Modul B; Verbund 3DO<sup>4</sup>; Scherer et al., 2019b) und Test der Praktikabilität und Anwendbarkeit von PALM-4U (Modul C; Verbünde KliMoPrax und UseUClim<sup>5</sup>; Halbig et al., 2019 in Förderphase 1 und Verbund ProPolis<sup>6</sup> in Förderphase 2).

Neben ihren individuellen Aufgaben arbeiteten die drei Module intensiv in Bezug auf Modellvalidierung (Schnittstelle zwischen A und B) und Anwendbarkeitstests sowohl des Modells (Schnittstelle zwischen A und C) als auch der Beobachtungsmethoden (Schnittstelle zwischen B und C) zusammen.

<sup>2</sup> <http://www.uc2-program.org>

<sup>3</sup> Modellbasierte Stadtplanung und Anwendung im Klimawandel in Förderphase 1; MOSAIK-2 in Förderphase 2; <http://www.uc2-mosaik.org>.

<sup>4</sup> Dreidimensionale Observierung atmosphärischer Prozesse in Städten in Förderphase 1; Dreidimensionale Observierung und Modellierung atmosphärischer Prozesse in Städten (3DO+M) in Förderphase 2; <http://www.uc2-3do.org>.

<sup>5</sup> Klimamodelle für die Praxis (KliMoPrax); Beurteilung der praktischen Anwendbarkeit und der Nutzerfreundlichkeit eines Stadtklimamodells zur Förderung einer klimagerechten Stadtentwicklung (UseUClim).

<sup>6</sup> Grundlagen für die Operationalisierung von PALM-4U – Praktikabilität und Verstetigungsstrategie; <https://www.uc2-propolis.de/>.

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	1
1. Einleitung.....	7
1.1. Zielsetzung.....	7
1.2. [UC] <sup>2</sup> -Evaluierungsstrategie .....	7
1.3. Konventionen und Definitionen.....	9
1.4. Gliederung des Evaluierungsberichts .....	11
2. Kerndiagnostiken zur Evaluierung von Stadtklimamodellen .....	13
3. Validierung von PALM-4U-Simulationen.....	14
3.1. Lufttemperatur und spezifische Feuchte.....	16
3.2. Wind .....	68
3.3. Strahlung und Wolken.....	85
3.4. Turbulenz und Eddy-Kovarianz.....	89
3.5. Thermischer Wirkungskomplex.....	106
3.6. Luftchemie.....	108
3.6.1. Partikel.....	108
3.6.2. Spurengase.....	112
4. Schlussfolgerungen und Ausblick .....	129
Ausblick.....	132
Danksagung.....	133
Abkürzungsverzeichnis .....	134
Abbildungsverzeichnis .....	143
Tabellenverzeichnis.....	157
Quellenverzeichnis .....	139
Annex 1.....	160

**Hinweis:**

In diesem Bericht wird aus Gründen der Lesbarkeit für Funktionen das generische Maskulinum verwendet, sofern die Aufgabenbeschreibung im Vordergrund steht. Weibliche und anderweitige Geschlechter-identitäten werden dabei ausdrücklich ebenfalls angesprochen, soweit es für die Aussage erforderlich ist.

# 1. Einleitung

## 1.1. Zielsetzung

Der vorliegende Evaluierungsbericht wurde von der Arbeitsgruppe „Modellevaluierung“ koordiniert und ist das Ergebnis der konsequent im Projektverbund entwickelten und umgesetzten Evaluierungsstrategie. Er umfasst alle durchgeführten Evaluierungen von PALM-4U unter Darlegung und Diskussion der genutzten qualitätsgesicherten Referenzdatensätze und erlaubt letztlich die Bewertung von PALM-4U hinsichtlich seiner Genauigkeit und (Anwendungs-)Grenzen. Damit dokumentiert der Evaluierungsbericht wesentlich das Maß des Erfolgs der gesamten [UC]<sup>2</sup>-Fördermaßnahme.

## 1.2. [UC]<sup>2</sup>-Evaluierungsstrategie

Das Konzept zur Evaluierung des PALM-4U-Modells ist in Abb. 1.2.1 dargestellt und zeigt den allgemeinen Daten- und Informationsfluss zur Evaluierung des PALM-4U-Modells (Scherer et al., 2019a). Partner aus den Modulen A und B waren hauptsächlich für die Modellvalidierung in Zusammenarbeit verantwortlich. Modul A führte dabei schwerpunktmäßig technische und Plausibilitätsprüfungen (interne Validierung) einzelner PALM-4U-Komponenten durch, d.h. Routinen zur Auflösung der Fluidodynamik, zur Parametrisierung thermodynamischer Prozesse (Strahlung, Energiebilanz an der Oberfläche, Grenzschichtprozesse usw.) und für Berechnungen der Luftchemie. Modul B evaluierte hingegen vereinbarte und nach stadtklimatischen Gesichtspunkten ausgewählte Modellsimulationen (VALM) mit qualitätsgesicherten Referenzdatensätzen (VALR), die entweder aus bestehenden Langzeitbeobachtungen (LTO) aufbereitet oder in Intensivmesskampagnen in [UC]<sup>2</sup> erhoben worden sind. Die Rückkopplung der Evaluierungsergebnisse an Modul A zur Bewertung und ggf. Verbesserung des Modells war hierbei elementar.

Das gesamte Modell wurde zunächst nach festgelegten Richtlinien und Verfahren wie der VDI-Richtlinie 3783-9 (VDI, 2017) oder dem von der COST Action 732 (Franke et al., 2011) entwickelten CEDVAL-LES-Ansatz evaluiert. Gemäß diesen Richtlinien war die Modellvalidierung Teil der Modellbewertung, die darauf abzielte, die Genauigkeit eines Modells zu bewerten, d.h. Abweichungen zwischen Ergebnissen aus Modellsimulationen und Referenzdaten aus Beobachtungen oder physikalischen Experimenten zu quantifizieren. Priorisiert wurde zunächst die Evaluierung der Strömungsverhältnisse.

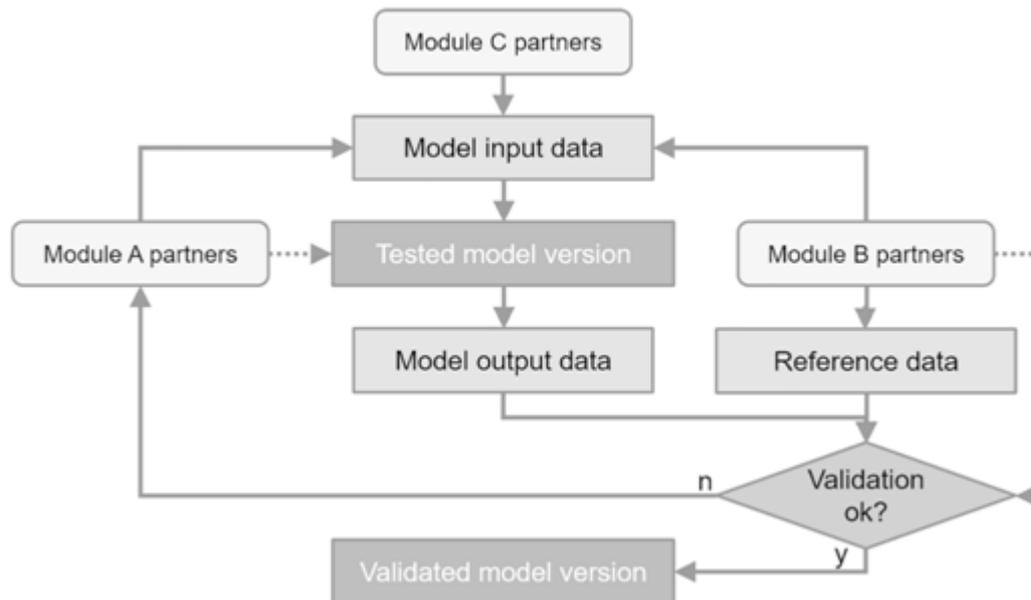


Abb. 1.2.1: Konzept zur Evaluierung des PALM-4U-Modells. Durchgezogene Linien zeigen den Daten- und Informationsfluss. Gepunktete Linien geben die jeweiligen Partner an, die für die Durchführung von Modellsimulationen und Evaluierungsroutinen verantwortlich sind. Modul C-Partner sind die Praxispartner (Scherer et al., 2019)

In der Fördermaßnahme [UC]<sup>2</sup> wurden die Modellergebnisse auch mit Daten aus Windkanalversuchen und Ergebnissen weiterer numerischer Modelle verglichen. Dieses Vorgehen betraf sowohl den RANS- als auch den LES-Modus des PALM-4U-Modells. Die Bewertung umfasst auch eine wissenschaftliche Analyse der Ergebnisse der Modellevaluierung, da Abweichungen zwischen Modellergebnissen und Referenzdaten auch auf Unsicherheiten bei den Modelleingangsdaten oder Referenzdaten zurückzuführen sein können, was eine gründliche Analyse erfordert. Die Genauigkeit eines Modells in Bezug auf einzelne Variablen zu kennen, bedeutet nicht, dass ein Modell für jeden Zweck geeignet wäre. Dies ist jedoch eine noch komplexere Aufgabe, da auch zweckspezifische Anforderungen an die Datengenauigkeit bekannt sein müssen. Diese Aufgabe bleibt für künftige Forschungsaktivitäten bestehen.

Hochauflösende Simulationen wurden im LES-Modus durchgeführt, während die stadtweiten Simulationen entweder im RANS- oder im LES-Modus durchgeführt wurden. Das PALM-4U-Modell erfordert sehr detaillierte und genaue Eingabedaten für Anfangs- und Randbedingungen für eine bestimmte Simulation. Diese Datensätze sind entweder statisch (z. B. GIS- und RS-Daten zur Topographie, Landbedeckung, Gebäudegeometrie) oder dynamisch (Atmosphärendaten). Darüber hinaus stellten die 3DO- sowie die 3DO+M-Partner (Modul B in Phase 1 und 2) Eingangsdaten zu Zeitpunkten und Orten von Beobachtungsdaten nach [UC]<sup>2</sup>-Datenstandard (Scherer et al., 2019c) bereit, die aus

Messungen an Stationen, vertikalen Profilen, Flugbahnen oder als gerasterte Fernerkundungsdaten von Boden-, Luft- oder Satellitenplattformen verfügbar waren. Das PALM-4U-Modell ist dann in der Lage, Ausgabedaten für diese Orte mit voller zeitlicher Auflösung zu erzeugen, was für die Untersuchung von z.B. Turbulenzphänomenen nötig ist und aufgrund begrenzter Datenspeicherkapazitäten nicht für die gesamte Modelldomäne möglich ist. Für PALM-4U-Simulationen sind normalerweise Zeitschritte in der Größenordnung von 1 s erforderlich, während die Anzahl der Rasterpunkte in der Größenordnung von 10<sup>9</sup> Punkten liegt, sodass für eine eintägige Simulation mehrere Hundertstel Terabyte für jede Variable erforderlich sind.

Je nach Modelldomäne mussten statische und dynamische Eingabedaten erneut abgetastet oder aus allgemeinen Datenquellen interpoliert werden. Die Partner führten sowohl Ideal- und Realfallsimulationen durch und verglichen die Modellausgangsdaten mit Referenzdaten, die entweder aus Windkanalexperimenten oder aus Feldbeobachtungen stammen. Bereits zum Testen des Modells verwendete Daten wurden nicht für die Modellvalidierung verwendet. Sofern zutreffend, wurden Modell- und Referenzdaten normalisiert und Abweichungen zwischen Modellausgabe und Referenzdaten in Abhängigkeit von Variablen, Fehlern und Unsicherheiten in Referenzdaten ausgewertet. Die Bewertung beinhaltet auch eine qualitative Diskussion der anwendungsspezifischen Anforderungen an die Modellgenauigkeit. Modul A- und Modul B-Partner priorisierten Variablen, die für praktische Anwendungen von wesentlicher Bedeutung sind und von Modul C-Partnern identifiziert wurden. Eine Hauptherausforderung bei der Modellbewertung bestand darin, die verschiedenen Unsicherheitsquellen, d.h. Fehler in Eingabe- und Referenzdatensätzen sowie Modelldefizite, zu bewerten.

### 1.3. Konventionen und Definitionen

Die [UC]<sup>2</sup>-Evaluierungsstrategie orientiert sich für die Evaluierung der Strömungsverhältnisse zunächst an den Richtlinien aus VDI 3783, Blatt 9, 2015 (Entwurf): Umweltmeteorologie, Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle, Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung.

Damit im vorliegenden Evaluierungsbericht ein einheitlicher Gebrauch wie auch ein gemeinsames Verständnis zum Themenkomplex Modellvalidierung gewährleistet werden, seien im Folgenden wichtige Definitionen aufgeführt (aus VDI 3783, Blatt 9, 2015):

#### Evaluierung:

Bewertung eines Modells und des dazugehörigen Programms hinsichtlich seiner Genauigkeit.

#### Genauigkeit:

Ausmaß der Übereinstimmung zwischen einem zu beurteilenden Wert und einem Bezugswert.

#### Validierung:

Prüfung, in welchem Maß (mit welcher Genauigkeit) ein Programm innerhalb des formalen Anwendungsbereichs des Modells die Phänomene beschreibt, die es zu modellieren vorgibt.

#### Verifikation:

Bestätigung, dass das Programm dem Modell entspricht.

Da der formale Anwendungsbereich von PALM-4U weder mit den vereinbarten Modellsimulationen noch von den erhobenen Beobachtungsdaten vollständig abgedeckt werden kann, gilt es hier festzuhalten, dass im Rahmen von [UC]<sup>2</sup> keine Validierung im engeren Sinne durchgeführt wurde, sondern der Schwerpunkt bei der Evaluierung liegt.

#### Evaluierungsbericht:

Die erfolgten Validierungen und Evaluierungen des Modells sind unter Diskussion der genutzten Datensätze aufzuführen. Die Evaluierung des Modells nach dieser Richtlinie ist zu erläutern, wobei jeder Testfall einzeln dokumentiert und diskutiert werden muss. Anwendungsgrenzen des Modells sind anzugeben. Es kann auf Literatur verwiesen werden.

#### Modellvalidierung:

Für die Validierung sind für ausgewählte Testfälle Vergleiche von Modellergebnissen mit Messungen, mit anderen Modellergebnissen und mit analytischen Lösungen durchzuführen. Weiterhin werden Vorgaben zum Rechengitter und zur Kontrolle von Modellergebnissen gemacht, die bei jeder Modellrechnung zu beachten sind:

*... Alle Testfälle müssen mit dem gleichen vollständigen Programm (dreidimensionales Modell) gerechnet werden. Für einzelne Testfälle abweichende Programmversionen zu verwenden, ist nicht zulässig. Ein Programm berechnet hinreichend gute Ergebnisse, wenn die Ergebnisse einer Modellrechnung im Rahmen vorgegebener Abweichungen (siehe hierzu Abschnitt 4.3.2) mit ausgewählten analytischen Lösungen, Messungen oder anderen Modellergebnissen übereinstimmen ...*

... Es liegen nutzbare Windkanal-Datensätze für Hindernisgeometrien unterschiedlicher Komplexität vor, mittels derer die mit einem mikroskaligen Modell simulierten Strömungsfelder geprüft werden können ...

... Werden neue qualitätsgesicherte Datensätze von Strömungsfeldern bei thermischer Schichtung, unter Einfluss von Orografie oder für weitere komplexe Hindernisstrukturen oder aktualisierte Datensätze der bestehenden Testfälle verfügbar, erfolgt eine Fortschreibung der Richtlinie ...

#### 1.4. Gliederung des Evaluierungsberichts

Der Aufbau des Evaluierungsberichts folgt den Aspekten der Modellevaluierung von COST 732 *Model evaluation case studies: approach and results* (Franke et al., 2011) sowie dem Evaluierungsbericht des Forschungsverbunds *High Definition Clouds and Precipitation for advancing Climate Prediction - HD(CP)<sup>2</sup>*, Heinze et al., 2017), der ebenfalls vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde.

Der Evaluierungsbericht ist in zwei Berichtsteile gegliedert. Teil 1 beschreibt das PALM-4U Modell, Konfigurationen, die Simulationen zur Evaluierung und die Referenzdatensätze. Teil 2 beschreibt die Kerndiagnostiken und präsentiert ausführlich die Evaluierungsergebnisse.

Die im Folgenden kursiv gedruckten Teile sind nicht Gegenstand dieses Evaluierungsberichts. Sie werden gesondert behandelt, worauf an entsprechender Stelle verwiesen wird.

##### Modellbeschreibung:

Eine kurze Beschreibung der Eigenschaften des Modells, des beabsichtigten Anwendungsbereichs, des theoretischen Hintergrunds, auf dem die Modellentwicklung basiert, der Software- und Hardwareanforderungen usw..

##### Datenbankbeschreibung:

Eine vollständige Beschreibung der Datenbank (qualitätsgesicherte Referenzdaten), die für die Bewertung des Modells verwendet wurde, einschließlich der Gründe, warum diese spezielle Datenbank ausgewählt wurde. Eine Schätzung der Datenvariabilität ist erforderlich.

##### Wissenschaftliche Bewertung:

Dies ist eine Beschreibung der Gleichungen, mit denen die physikalischen und chemischen Prozesse beschrieben werden, für die das Modell entwickelt wurde. Gegebenenfalls sollte sie die Wahl der numerischen Modellierungsverfahren rechtfertigen und die Grenzen in

Bezug auf die beabsichtigten Anwendungen klar angeben (Code). → siehe Publikation zu PALM-4U Version 6.0, Modul A (Maronga et al., 2020).

#### Verifikation:

Mit diesem Verfahren soll überprüft werden, ob das Modell Ergebnisse liefert, die mit der tatsächlich verwendeten Physik und Mathematik übereinstimmen. Dies dient zum Identifizieren, Quantifizieren und Reduzieren von Fehlern bei der Transkription des mathematischen Modells in ein Rechenmodell und der analytischen oder numerischen Lösung innerhalb des Modells. → siehe Publikation zu PALM-4U Version 6.0, Modul A (Maronga et al., 2020).

#### Modellevaluierung:

Dies ist ein strukturierter Vergleich von Modellvorhersagen mit experimentellen Daten und basiert auf statistischen Analysen ausgewählter Variablen. Ziel ist es, den Unterschied zwischen den Modellvorhersagen und den Datensätzen zur Modellbewertung zu identifizieren und zu quantifizieren. Dies liefert Hinweise darauf, wie gut sich das Modell der Realität annähert. Eine Quantifizierung der Unsicherheit der Modellvorhersagen soll erstellt werden.

#### Benutzerorientierte Bewertung:

Hier findet sich eine lesbare, umfassende Dokumentation des Codes, einschließlich technischer Beschreibung, Benutzerhandbuch und Evaluierungsdokumentation. Der Anwendbarkeitsbereich des Modells, die Computeranforderungen, Installationsverfahren und Ratschläge zur Fehlerbehebung sollten verfügbar sein, siehe "PALM-4U Evaluationsbericht zur Praxistauglichkeit" (Burmeister et al., 2023).

## 2. Kerndiagnostiken zur Evaluierung von Stadtklimamodellen

Tab. 2.0.1: Tabelle mit vereinbarten statistischen Größen und deren Definition. Teilweise tauchen, je nach Autoren, verschiedene Schreibweisen und Abkürzungen auf. \* Für die Standardabweichung der Windrichtung wurde die Methode nach Yamartino (1984) verwendet.

Abkürzung	Beschreibung
d	Differenz / Abweichung zwischen Modell und Observierung
MD	Mean Deviation
MAD (auch MAE)	Mean Absolute Deviation (Error)
MSD (auch MSE)	Mean Square Deviation (Error)
RMSD (auch RMSE)	Root Mean Square Deviation (Error)
NRMSD (auch NRMSE)	Normalized Root Mean Square Deviation (Error)
$\sigma_m$ (auch sd mod)	Standardabweichung der Modellwerte *
$\sigma_o$ (auch sd obs)	Standardabweichung der observierten Werte *
skv	Skillvarianz (Verhältnis der Standardabweichungen von Modellwerten und Beobachtungswerten)
$r$ (auch r_pears)	Pearson Korrelationskoeffizient
R <sup>2</sup> (auch Rsq)	Bestimmtheitsmaß / Erklärte Varianz
rho	Spearman Korrelationskoeffizient
bias	Abweichung der Mittelwerte

### 3. Validierung von PALM-4U-Simulationen

Die Validierung der PALM-4U Simulationen für die Modellstädte Berlin, Hamburg und Stuttgart sowie weiterer zusätzlicher PALM-4U Simulationen ist ein strukturierter Vergleich von Modellvorhersagen mit experimentellen Daten und basiert auf statistischen Analysen ausgewählter Variablen. Ziel ist es, den Unterschied zwischen den Modellvorhersagen und den Referenzdaten zu ermitteln und zu quantifizieren. Der Vergleich gibt Aufschluss darüber, wie gut sich das Modell für die jeweiligen Variablen der Realität annähert.

Die Darstellung der Evaluationsergebnisse erfolgt hierarchisch geordnet nach den untersuchten Variablen, den Modellstädten, den Simulationsläufen und - sofern relevant - den Prozessen.

#### Wetterlage

##### Berlin - VALM01v2

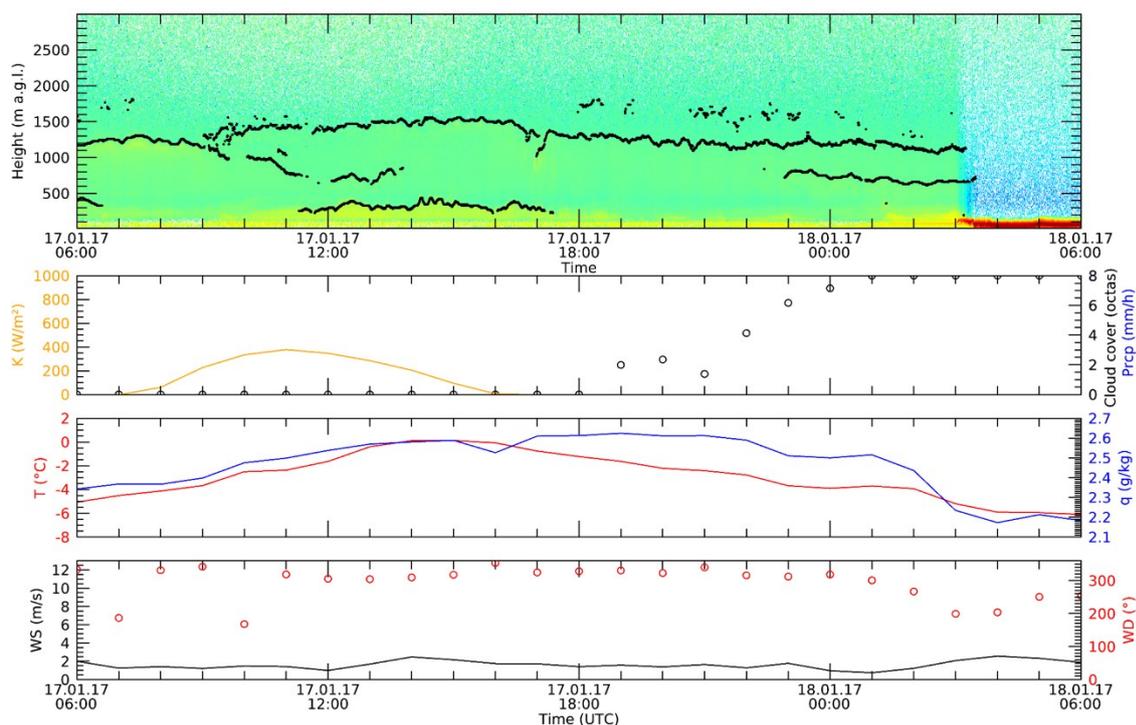


Abb. 3.0.1: Wetterlage im Validierungszeitraum VAL01 (17.01.2017 06:00 UTC bis 18.01.2017 06:00 UTC).  
Quelle: TUBklima

Die Validierungsperiode VALM01v2, der Winterlauf, umfasste den Zeitraum vom 17.01.2017 06:00 UTC bis zum 18.01.2017 06:00 UTC, das entspricht 24 Stunden.

Im Validierungszeitraum wehte nur schwacher Wind aus Nord bis Südwest. Die Temperaturen erreichten maximal 1°C und die Tiefstwerte lagen bei -5°C bis -6°C. Zu Beginn war der Himmel klar, am Abend nahm die Bewölkung zu. Bis zum Ende des Zeitraums war es dann bedeckt. Die relative Luftfeuchtigkeit lag zwischen 50% und 77% (Abb. 3.0.1).

### Berlin - VALM02v2

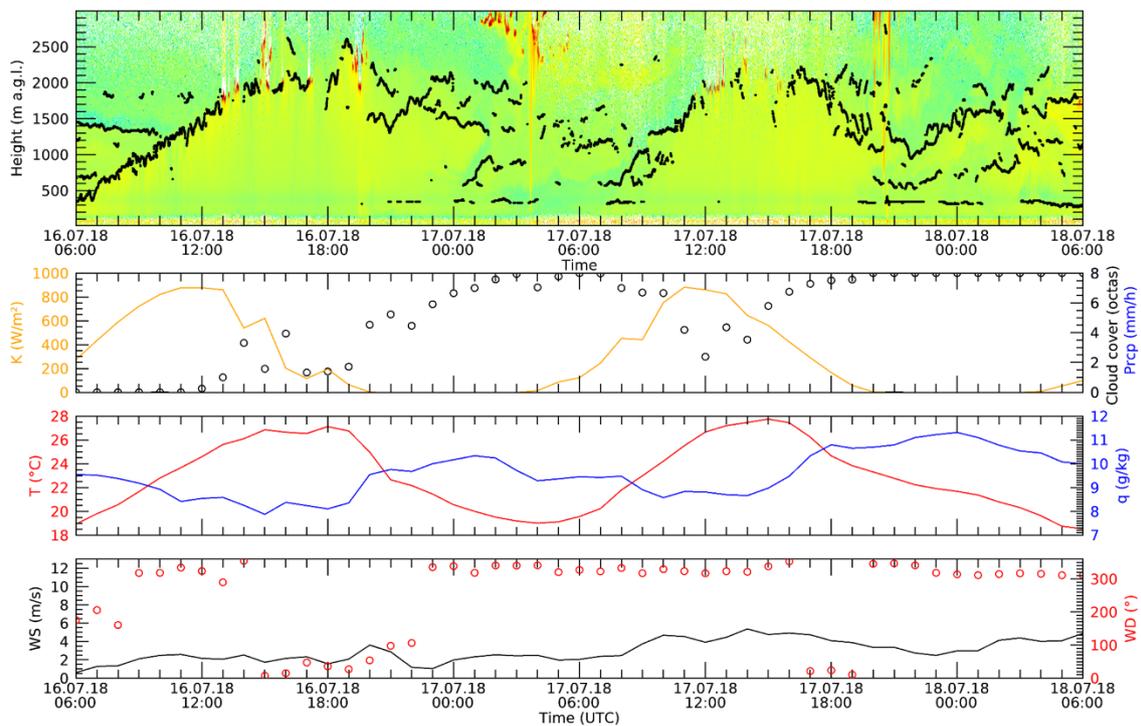


Abb. 3.0.2: Wetterlage im Validierungszeitraum VAL02 (16.07.2018 06:00 UTC bis 18.07.2018 06:00 UTC).  
Quelle: TUBklima.

VALM02v2, der Sommerlauf, erstreckte sich über den Zeitraum vom 16.07.2018 06:00 UTC bis zum 18.07.2018 06:00 UTC, entsprechend 48 Stunden.

Im Validierungszeitraum wehte nur schwacher Wind aus nördlichen Richtungen. Die Temperaturen erreichten Höchstwerte von 26 °C bis 28 °C und Tiefstwerte von 19 °C bis 15 °C. Über die Mittagsstunden war es verbreitet heiter bis wolkig, in den übrigen Zeiten meist bedeckt. Die relative Luftfeuchtigkeit lag zwischen 36 % und 54 % (Abb. 3.0.2).

### Stuttgart - VALM04

Die meteorologischen Bedingungen an diesen Tagen entsprachen denen eines typischen Sommertages in Stuttgart mit trockenen Bedingungen, einer Wolkenbedeckung von weniger als 5/8, einer durchschnittlichen oberflächennahen Windgeschwindigkeit von weniger als 3 m/s und einer tagsüber erreichten maximalen Lufttemperatur von mehr als 25 °C. Während

der Messkampagne erzeugten Hochdruck westlich der Britischen Inseln und Tiefdruck über Skandinavien im untersuchten Gebiet eine schwache bis mäßige großräumige Strömung aus nordwestlichen bis nördlichen Richtungen.

Zudem wurden für Stuttgart drei weitere Simulationen durchgeführt:

[PALM-4U v22.10](#) wurde für 48 Stunden vom 12. Februar 2018 00:00 UTC bis zum 15. Februar 2018 00:00 UTC auf Basis von ERA5- und WRF v4.1.5-Daten als dynamischer Antrieb gerechnet. Die Gitterweite wurde wie für den Fall VALM04 im Sommer für zwei genestete Domänen auf 40 m und 10 m festgesetzt. Die horizontalen Ausdehnungen der Domänen wurden auf 20x20 km<sup>2</sup> (Stuttgarter Stadtgebiet) und 4x4 km<sup>2</sup> (Stuttgarter Innenstadt) konfiguriert.

[PALM-4U v21.10-1](#) wurde mithilfe des PALM-Modell-Systems 21.10 UNIBWCluster durchgeführt. Die Simulationszeit betrug 39 Stunden: von 00 UTC am 14.08.2017 bis um 20 UTC am 15.08.2017. Das Simulationsgebiet mit der Größe von 48x48 km<sup>2</sup> deckte das Territorium um den Stuttgarter Kessel und das Neckartal ab. Vertikal erstreckte sich die Modelldomäne bis in 4 km Höhe. Die vertikale und horizontale Gitterweite betrug 40 m.

[PALM-4U v21.10-2](#) wurde ebenfalls mithilfe des PALM-Modell-Systems 21.10 UNIBWCluster durchgeführt. Das Simulationsgebiet hat die Größe von 12x12x2.5 km<sup>3</sup> und befindet sich im zentralen Stadtbereich um die Stationen cityhall und cityafus. Die vertikale und horizontale Gitterweite betrug 10 m. Die Simulationszeit betrug 18 Stunden von 00 UTC am 20.06.2018. Der statische Treiber beinhaltete die aufbereiteten DLR-Daten für die Orographie und Landnutzung mit einer Gitterweite von 10 m, ergänzt für die Region Stuttgart mit Daten aus OpenStreetMaps (Modul A). Der dynamische Treiber beinhaltete die stündlichen Randbedingungen aus COSMO-D2-Modellanalysen für die meteorologischen Größen (Wind, Temperatur, Feuchte).

### 3.1. Lufttemperatur und spezifische Feuchte

Das Ziel dieses Kapitels ist es, die Leistung des Modells bei der Vorhersage von Lufttemperatur und spezifischer Luftfeuchtigkeit zu bewerten und mögliche Unterschiede zwischen den Messungen und den Modellergebnissen aufzuzeigen.

#### Lufttemperatur Berlin

Zunächst wurden zwei Messkampagnen (VALR01 im Winter 2017 und VALR02 im Sommer 2018) in Berlin betrachtet und diese mit den Modellläufen von PALM-4U für die gleiche Zeit (VALM01v2 und VALM02v2) verglichen. Das Modell nutzte einen dynamischen Antrieb mit

COSMO-D2-Daten, um das Stadtklima in Berlin zu simulieren.

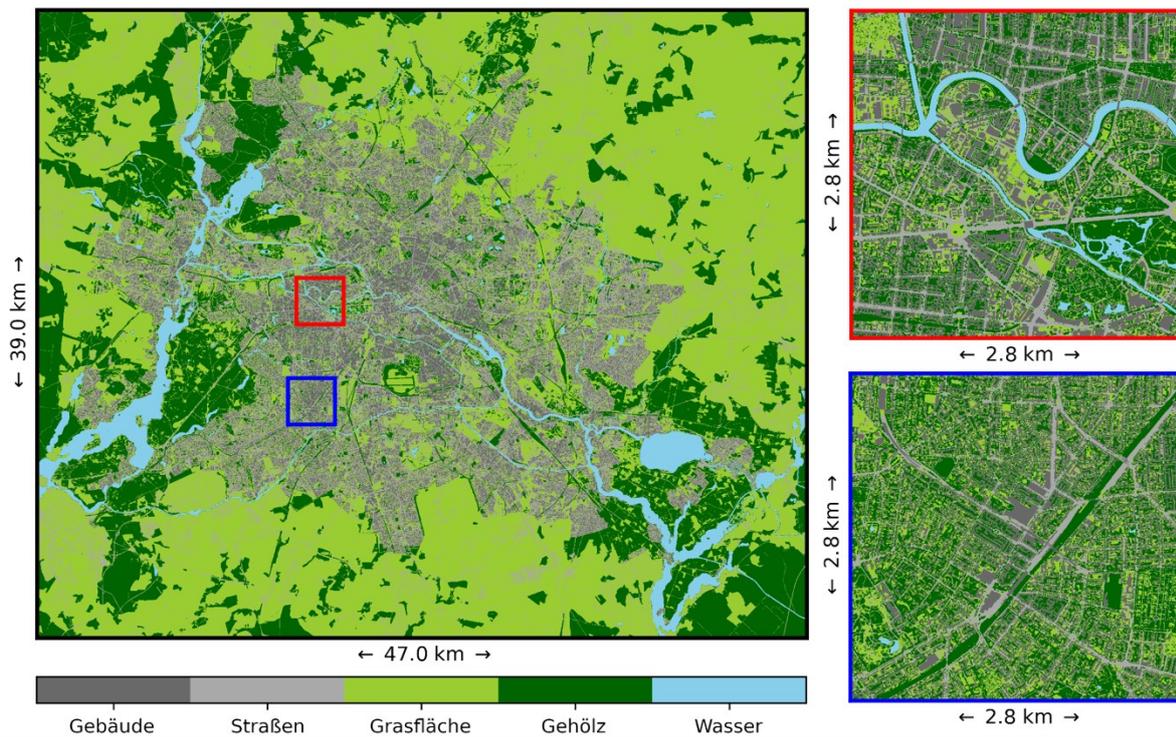


Abb. 3.1.1: Modelldomänen von PALM-4U, wie sie für die Validierungsläufe VALM01v2 und VALM02v2 verwendet wurden. Die Parent Domäne umfasst eine Fläche von 47 km x 39 km und wurde mit einer Auflösung von 16 m berechnet. Innerhalb dieser Domäne befinden sich die Child Domänen „TU Campus“ (rot markiert) und „Rothenburg“ (blau markiert), die jeweils eine Fläche von 2,8 km x 2,8 km abdecken und mit einer Auflösung von 2 m berechnet wurden. Quelle: Tobias Gronemeier (LUH).

Die Modellläufe wurden in unterschiedlichen Domänen durchgeführt. Die Parent Domain umfasst das gesamte Berliner Stadtgebiet mit näherer Umgebung. Die Modellgitter-Auflösung betrug hier 16 m. Darin eingebettet sind zwei Child Domains, in denen das Modell mit höherer Auflösung von 2 m lief (Abb. 3.1.1). Die Child Domain "TU Campus" liegt in der Berliner Innenstadt mit dem TU Hauptcampus in der Nähe des Zentrums der Domain. Außerhalb des Stadtzentrums liegt die Child Domain "Rothenburg", die das Gelände des Fachgebiets Klimatologie der TU Berlin enthält. Für die Validierung wurde bei dieser Child Domain nur der Sommerlauf (VALM02v2) durchgeführt.

#### Winterlauf VALM01 bzw- VALM01v2

In der Episode VALM01v1/VALR01 (17.1.2017 6:00 UTC bis 18.1.2017 6:00 UTC) wurden für den Vergleich stündlich Vertikalprofile bis ca. 300 Meter über Grund an den Standorten Gutmuths und Dahlemer Feld erhoben.

Allerdings gibt es aus der Ausgabe von PALM-4U keine virtuellen Messungen für die Messflüge. Daher wurden Säulen aus dem 3D-Output ausgeschnitten und für die Vergleiche verwendet. Diese beinhalten Instantanwerte des Modells zu einzelnen Zeitpunkten, während die Messflüge aus zwei Auf- und Abstiegen bestehen, die horizontal gemittelt wurden. Die Daten der Messflüge (VALR01) entsprechen somit einem zeitlichen Mittel über die Flugdauer (ca. 12-15 Minuten). Zudem wird für die Vertikalprofile eine Evaluierung der potenziellen Temperatur anstatt der Lufttemperatur durchgeführt, da diese Größe unabhängig von der Höhe ist und einen Vergleich der Schichtungsstabilität ermöglicht. Anstatt der relativen Luftfeuchte wird das Mischungsverhältnis verglichen, weil diese Größe unabhängig von der Temperatur ist.

Für die VALM01 wurden die Messungen auf der Südfassade des Gebäudes der TU Mathematik in Berlin-Charlottenburg am ERP-Messstandort in einer Höhe von ca. 4 m über dem Boden mit dem LUFFT WS600-Sensor durchgeführt.

Des Weiteren fand die Evaluierung für Werte in einer Höhe von 2 m vom 17.01.2017 an vier Standorten auf dem Gelände der Technischen Universität Berlin (Child-1 Domain) unter dem Gesichtspunkt der unterschiedlichen Gebäudeausrichtung statt. Die räumliche Modellauflösung betrug 2 m und die Stationen unterschieden sich durch den ‚Sky View Faktor‘ (SVF) und deren Geometrie der Gebäude.

Für die Betrachtung der Genauigkeit des Modells bei der Lufttemperatur wurden alle Stationen (siehe Abb. 1.2.2, [UC]2 Evaluierungsbericht - Teil 1) in der Parent Domain betrachtet (Abb. 3.1.2). Die Modellwerte der Lufttemperatur zeigen fast durchgehend niedrigere Werte im Vergleich zu den gemessenen Werten.

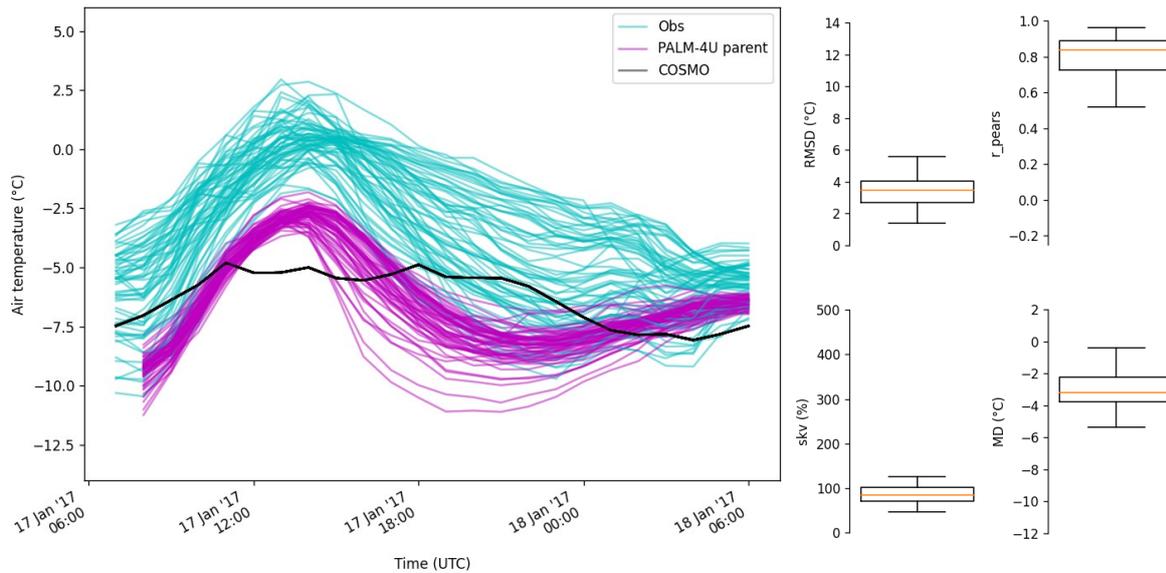


Abb. 3.1.2: Vergleich des modellierten (PALM-4U parent) und gemessenen (Obs) Temperaturverlaufs für die Messstationen in der Berliner Parent Domäne während des Winterlaufs. Zusätzlich wird der COSMO-Antrieb für die Lufttemperatur während der Modellaufzeit dargestellt. Es wurden pro Zeitschritt die Antriebe der vier Seiten der untersten Ebene des Modells gemittelt. Gütemaße (Medianwerte): RMSD: 3.45 K,  $r_{\text{pears}}$ : 0.84, skv: 84.59 %, MD: -3.20 K. Quelle: TUBklima.

Darüber hinaus weisen die Modellwerte eine deutlich geringere Variabilität auf. Die vorliegenden Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Modell systematisch niedrigere Temperaturwerte liefert, als tatsächlich gemessen werden. Der Tagesgang wird aber qualitativ gut wiedergegeben. Die Unterschätzung des Modells wird wahrscheinlich durch einen zu kalten Antrieb durch das COSMO-Modell hervorgerufen, da dessen Temperaturen fast durchgängig deutlich unter den gemessenen Werten liegen.

Obwohl die Gitterpunkte durch die höhere Auflösung in der Child Domain näher an den Messstationen liegen als die Punkte in der Parent Domain, zeigt sich keine Verbesserung bei den modellierten Werten. Im Gegenteil, bei der Mean Deviation stellen sich sogar höhere Abweichungen in der Child Domain heraus (Abb. 3.1.3 und Tab. 3.1.1).

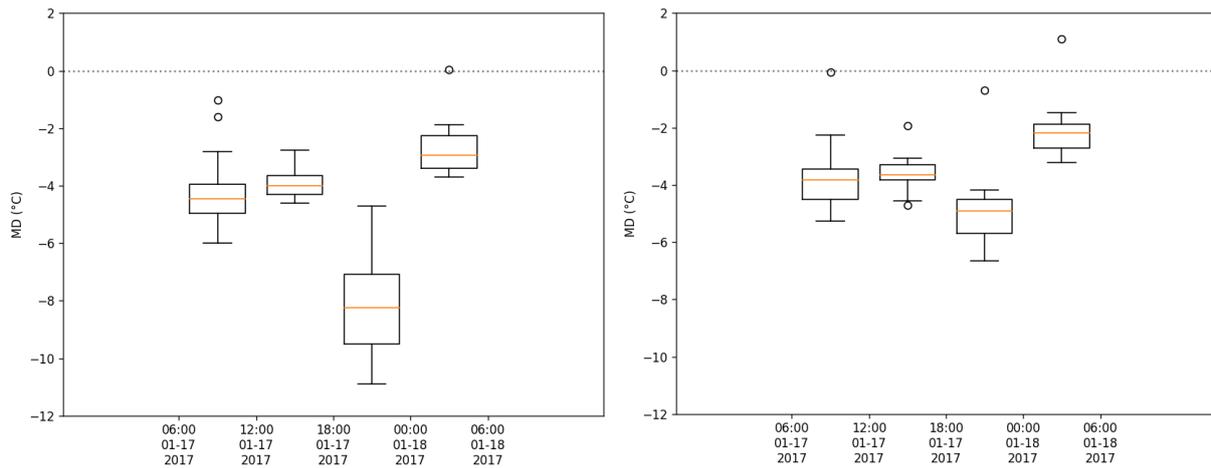


Abb. 3.1.3: Vergleich der Mean Deviation zwischen der modellierten und gemessenen Temperatur in Sechsstunden-Zeiträumen während VAL01. Links die Daten der Child Domain Stationen, rechts die der Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Quelle: TUBklima.

Wie in Tab. 3.1.1 zu erkennen ist, sind die Werte aller statistischen Gütemaße in den mit der höheren Modellauflösung gerechneten Child Domains entgegen der Erwartung schlechter als die in den mit niedrigerer Auflösung.

Tab. 3.1.1: Die Werte der statistischen Gütemaße, aggregiert über den gesamten Validierungszeitraum, jeweils die Medianwerte. Child: Stationen in den Child Domains. ParentC: Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Quelle: TUBklima

Gütemaß	Child	ParentC
RSMD (Root Mean Square Deviation)	5.77 K	4.09 K
r-pears (Pearson-Korrelationskoeffizient)	0.49	0.71
skv (Skillvarianz)	168.86 %	102.83 %
MD (Mean Deviation)	-5.12 K	-3.79 K

Abb. 3.1.4 zeigt den mittleren absoluten Fehler (MAE), dargestellt sind vier unterschiedliche Baukörper auf dem Gelände der TU Berlin gemittelt über sechs verschiedene Zeitintervalle (06-09 UTC, 10-13 UTC, 14-17 UTC, 18-21 UTC, 22-01 UTC und 02-05 UTC) vom 17.01 bis zum 18.01.2017. Den größten Fehler mit bis zu 2.8 K zeigen alle Baukörper zwischen 18 und 21 Uhr (orange) und den geringsten Fehler (1.3 K) im Zeitintervall zwischen 02 Uhr bis 05 Uhr (grün) des Folgetages. Bezüglich der Baukörper lässt sich kein systematischer Fehler identifizieren.

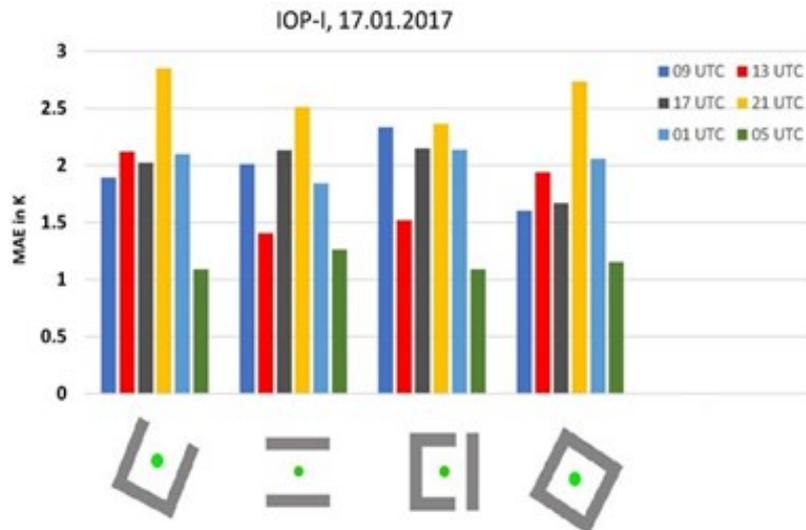


Abb. 3.1.4: Mittlere MAE [K] der sechs Zeitintervalle (06-09 UTC, 10-13 UTC, 14-17 UTC, 18-21 UTC, 22-01 UTC und 02-05 UTC) vom 17. Januar 2017 der vier Baukörper auf dem Gelände der Technischen Universität Berlin. Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).

Aufgrund der hohen Stationsdichte im Berliner Stadtgebiet wurde eine Evaluierung bezüglich der 'Local Climate Zones' (LCZ) für die 2 m Temperatur durchgeführt. Abb. 3.1.5 zeigt den mittleren absoluten Fehler in den entsprechenden LCZs entsprechend der räumlichen Modellauflösung von 16 m und der zeitlichen Auflösung von 5 min mit der zusätzlichen Child-1- Domain in der Modellauflösung von 2 m (in gelb dargestellt).

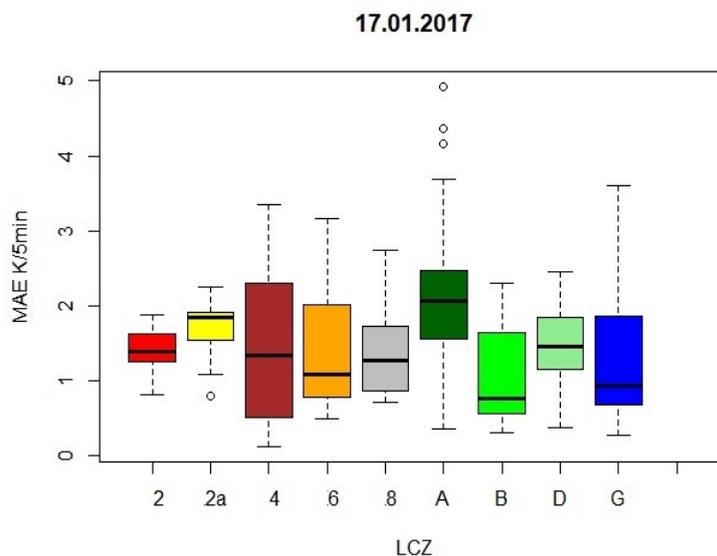


Abb. 3.1.5: MAE der 2 m Temperatur in den LCZs von Berlin vom 17.01.2017. Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).

Die LCZ A - Wald (dunkelgrün) zeigt durch den Boxplot einen Ausreißer mit bis zu 5 K bei einem Medianwert von 2 K. Den geringsten Median zeigt die LCZ G - Wasser (blau) mit 0.8 K, allerdings zeigt diese LCZ auch extreme Ausreißer mit bis zu 3.8 K.

Anhand der LCZ-Auswertung konnte gezeigt werden, dass der Innenstadtbereich (LCZ 2) die geringsten Schwankungen im Fehlerbereich aufweist, d.h. die Temperatur wird in einer dichten Bebauung vom Modell gut dargestellt.

Für die Wintersituation (VALM01) sind die Modellergebnisse meist kühler als die Messungen, z.T. ergeben sich Unterschiede von bis zu 3 K. Diese niedrigere Temperatur in der Simulation ist zu einem Großteil auf den dynamischen Antrieb mit COSMO zurückzuführen. Der Verlauf der Temperaturprofile stimmt jedoch insgesamt gut überein. Ein Beispiel für den 18.01.2017 um 4:00 UTC ist in Abb. 3.1.6 dargestellt. In der zweiten Version der Simulation (VALM01v2) ist insbesondere mittags eine weitere Verbesserung der Übereinstimmung der vertikalen Temperaturverläufe festzustellen.

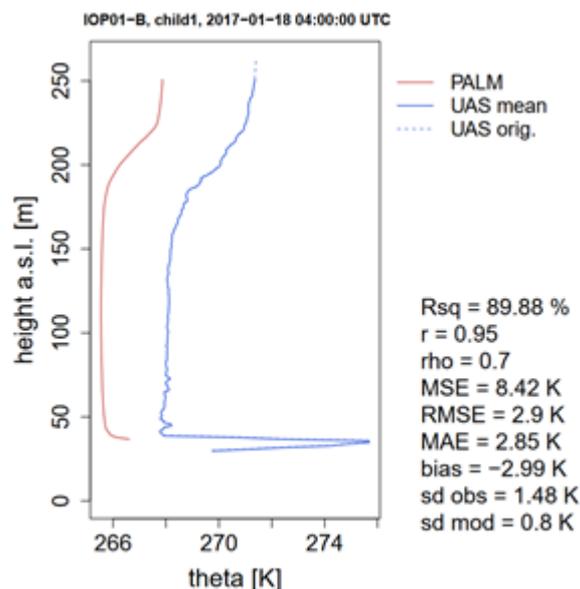


Abb. 3.1.6: Beispiel am Standort Gutmuths für den Vergleich von Vertikalprofilen der potenziellen Temperatur am 18.01.2017 um 4:00 UTC, VALM01v1/VALR01. Gütemaße:  $Rsq$ =erklärte Varianz,  $r$ =Korrelationskoeffizient nach Pearson,  $\rho$ = Korrelationskoeffizient nach Spearman,  $MSE$ =mean square error,  $RMSE$ =root mean square error,  $MAE$ =mean absolute error,  $bias$ =Abweichung der Mittelwerte,  $sd\ obs$ =Standardabweichung der Beobachtung,  $sd\ mod$ = Standardabweichung des Modells. (Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck, UAgeo)

Aus Abb. 3.1.7 geht hervor, dass PALM am Tag die Lufttemperaturen von bis zu 2 °C unterschätzt, mit maximalen Abweichungen von bis zu 3 °C während der Mittagszeit. Der beobachtete Tagesgang wird von PALM jedoch gut abgebildet.

Air temperature at Ernst-Reuter-Platz (VALR01 vs. VALM01)

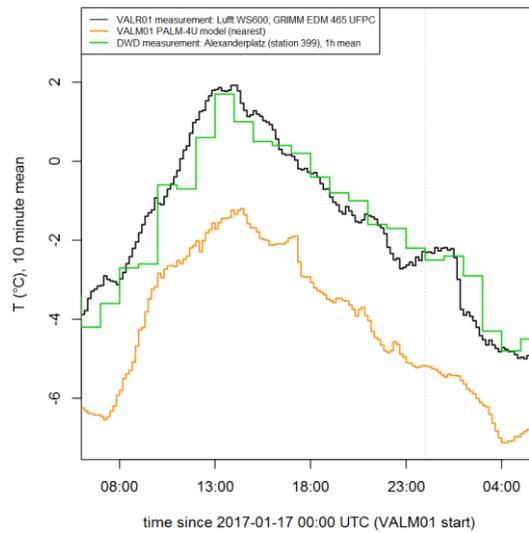
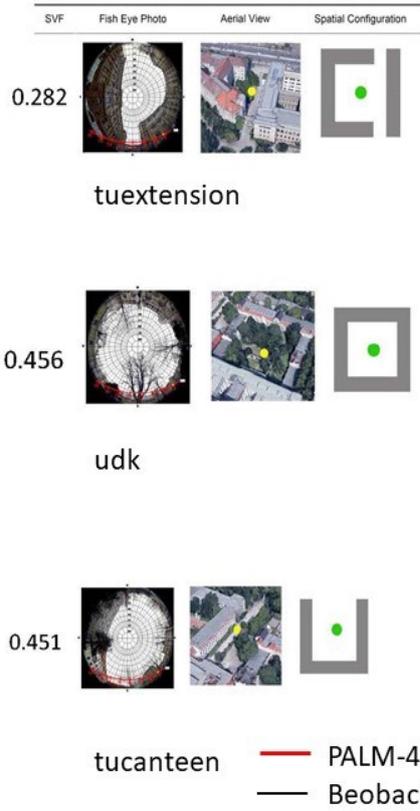


Abb. 3.1.7: 10-Minuten-Mittelwerte der beobachteten Lufttemperatur (schwarz), der simulierten Lufttemperatur (orange) und die stündlich gemittelte Lufttemperatur an der DWD-Station Berlin-Alexanderplatz (grün) während der VAL01-Simulationsperiode (17.01.2017 06:00 UTC bis 18.01.2017 06:00 UTC). Quelle: HUBgeo.

Ein Evaluierungsbeispiel zeigt Abb. 3.1.8 (Mitte) des Messplatzes auf dem Innenhof der Universität der Künste (udk), Berlin vom 17.01.2017. Im Ergebnis zeigte sich, dass das Modell systematisch über den gesamten Tag hinweg zu niedrige Temperaturwerte an allen Stationen modellierte. Zum Sonnenhöchststand ist das Modell bis zu 3 K zu kalt. Grundsätzlich folgt PALM-4U aber dem beobachteten Tagesgang mit einer sehr guten Korrelation von 0.95. Auf der rechten Seite der Abb. 3.1.8 wird durch ein quantil-quantil-Diagramm (qq-Plot) die PALM-4U Verteilung mit der Messung verglichen. Die Abweichungen zwischen Modell und Beobachtung zeigen bei kälteren Temperaturen eine Differenz von -2 K und für wärmere Temperaturen beträgt die Differenz bis zu -3 K.

**TU Campus Charlottenburg**

17.01.2017 (06 bis 06 UTC)



**2m Temperatur**

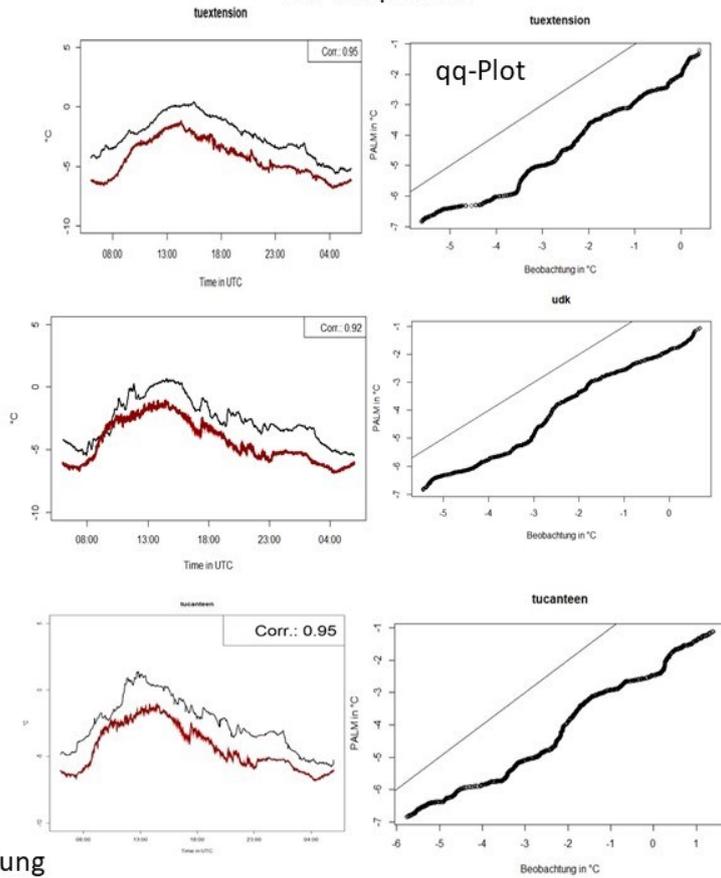


Abb. 3.1.8: Vergleich der Messung (VALR01) der 2 m Temperatur in der Child-1-Domain mit den Modellergebnissen (VALM01) vom 17.01.2017 um den Ernst-Reuter-Platz. Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).

## Sommerlauf VALM02 bzw- VALM02v2

Für die modellierte Validierungsperiode VALM02 erfolgte im Rahmen der IOP-4 am Standort Ernst-Reuter-Platz in Berlin (tuerpl) die Erhebung von Messdaten VALR02 im Zeitraum vom 16.07.2018 6:00 UTC bis 17.07.2018 6:00 UTC. Diese stündlich aufgezeichneten Vertikalprofile wurden mittels Hexakopter-Radiosonden-Messsystem bis 300 m über Grund aufgezeichnet. Weiterhin standen Vertikalprofile ebenfalls bis ca. 300 m über Grund für die drei Standorte Flugplatz Tempelhof, Sportanlage Gutsmuths sowie Hertzallee zur Verfügung. Hierbei kamen am Flugplatz Tempelhof und der Sportanlage Gutsmuths Starrflügler am Standort Hertzallee Hexacopter zum Einsatz.

Außerdem wurde an einem Baumstamm in Berlin-Steglitz in einer Höhe von 4 m gemessen. Die räumliche Modellauflösung betrug zum einen 16 m in der Parent-Domain und 2 m in der Child-2 Domain (Berlin-Steglitz), die zeitliche Auflösung lag bei 1 min.

Für die Betrachtung der Genauigkeit des Modells bei der Lufttemperatur wurden alle Stationen (siehe Abb. 1.2.2, des [UC]<sup>2</sup> Evaluierungsberichts - Teil 1) in der Parent Domain betrachtet (Abb. 3.1.9).

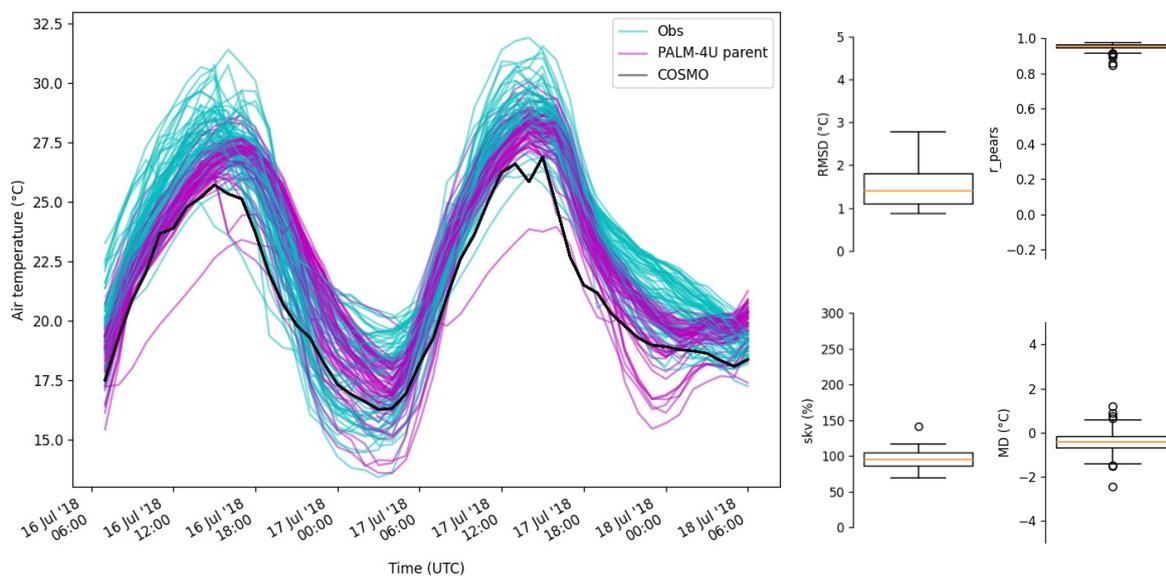


Abb. 3.1.9: Vergleich des modellierten (PALM-4U parent) und gemessenen (Obs) Temperaturverlaufs für die Messstationen in der Berliner Parent Domäne während des Sommerlaufs. Zusätzlich wird der COSMO-Antrieb für die Lufttemperatur während der Modelllaufzeit dargestellt. Es wurden pro Zeitschritt die Antriebe der vier Seiten der untersten Ebene des Modells gemittelt. Gütemaße (Medianwerte): RMSD: 1.41 K,  $r_{\text{pears}}$ : 0.95, skv: 95.0 %, MD: -0.43 K. Quelle: TUBklima.

Tagsüber zeigten die Modellwerte tendenziell niedrigere Werte im Vergleich zu den gemessenen Werten. Dies deutet darauf hin, dass das Modell eine systematische Unterbewertung der Tageswerte aufweist. Dies kann, wie beim Winterlauf, am zu kühlen

COSMO-Antrieb liegen. Allerdings ist die Abweichung des Antriebs hier im Sommerlauf lange nicht so stark wie im Winter. Die Mean Deviation weist hier wesentlich kleinere Werte auf (vgl. Abb. 3.1.2 und Abb. 3.1.9). Bei den nächtlichen Temperaturen zeigten die Modellwerte eine bessere Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. In den meisten Fällen lagen die Modellwerte im Bereich der gemessenen Werte. Allerdings wurden auch einige Stationen identifiziert, bei denen das Modell zu kühl gerechnet hat. Dies bedeutet, dass das Modell die nächtlichen Temperaturen an diesen Orten unterschätzt hat.

Die Frage, ob die Übereinstimmung zwischen den Modellwerten und den Messungen in der Child Domain, die mit höherer Auflösung gerechnet wird, besser als in der Parent Domain ist, kann bei Betrachtung der Mean Deviation nicht eindeutig beantwortet werden (Abb. 3.1.10). Und dies, obwohl die je Messstation herangezogenen Child-Gitterpunkte näher an der Messstation sind als die der Parent Domain.

Die Mediane der Child Domain liegen in drei Sechs-Stunden-Zeiträumen näher an der 0-K-Linie. Gleichzeitig gibt es drei weitere Sechs-Stunden-Zeiträume, in denen die Mediane der Parent-Stationen in Child Domains näher an der 0-K-Linie liegen. In den übrigen Zeiträumen gibt es keine signifikanten Unterschiede.

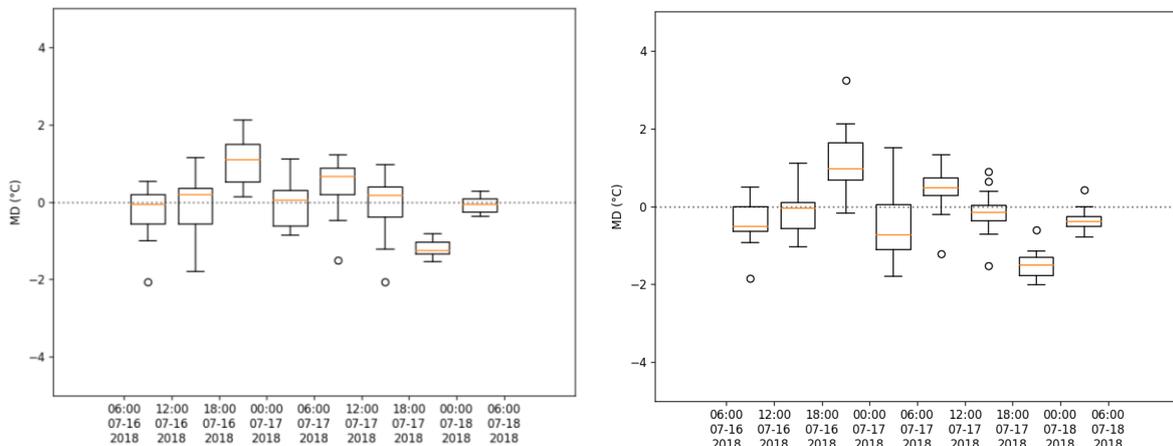


Abb. 3.1.10: Vergleich der Mean Deviation zwischen der modellierten und gemessenen Temperatur in Sechs-Stunden-Zeiträumen während VAL02. Links die Daten der Child Domain Stationen, rechts die der Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Quelle: TUBklima.

Tab. 3.1.2 zeigt insgesamt eine Verbesserung aller statistischen Gütemaße in den mit der höheren Modellauflösung gerechneten Child Domains.

Tab. 3.1.2: Die Werte der statistischen Gütemaße, aggregiert über den gesamten Validierungszeit-raum, jeweils die Medianwerte. Child: Stationen in den Child Domains. ParentC: Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Quelle: TUBklima

Gütemaß	Child	ParentC
RSMD (Root Mean Square Deviation)	0.92 K	1.06 K
r-pears (Pearson-Korrelationskoeffizient)	0.97	0.96
skv (Skillvarianz)	102.62 %	106.2 %
MD (Mean Deviation)	0.02 K	0.28 K

Die Abweichung zwischen PALM-4U und den Beobachtungen im Klimagarten des Geografischen Instituts der Humboldt-Universität zu Berlin ist gering und die Abweichungen sind über den gesamten Zeitraum hinweg weniger als 3 °C (Abb. 3.1.11).

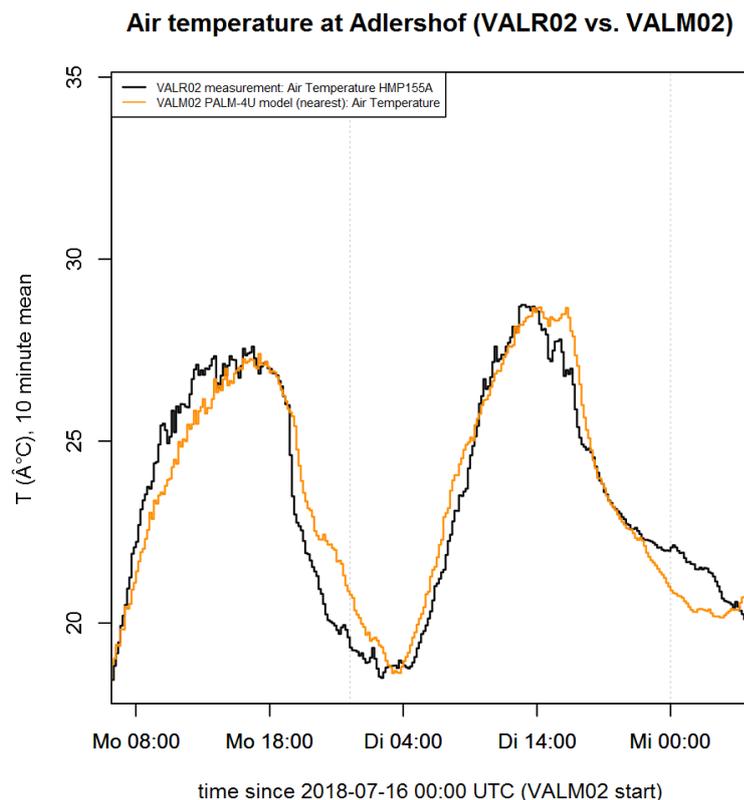


Abb. 3.1.11: 10-Minuten-Mittelwert der beobachteten (schwarz) und simulierte Lufttemperatur (orange) während der VAL02-Simulationsperiode (16.07.2018 06:00 UTC bis 18.07.2018 06:00 UTC). Quelle: HUBgeo.

Abb. 3.1.12 (links) zeigt den Tagesgang der 4 m Temperatur im Vergleich PALM-4U (rot) zur Messung (schwarz) unter einem Baum in der Herderstraße in Berlin-Steglitz. Sehr gut zu erkennen ist die Abweichung zwischen Modell und Beobachtung im Zeitraum zwischen 15:00

und 04:00 UTC in der ersten Nacht. Am zweiten Tag der Modellevaluierung zeigt sich nahezu eine perfekte Übereinstimmung zwischen Modell und Beobachtung. Die qq-Plot Darstellung (Abb. 3.1.12, rechts) zeigt für beide Tage, dass PALM-4U mit bis zu 1.8 K zu warm ist.

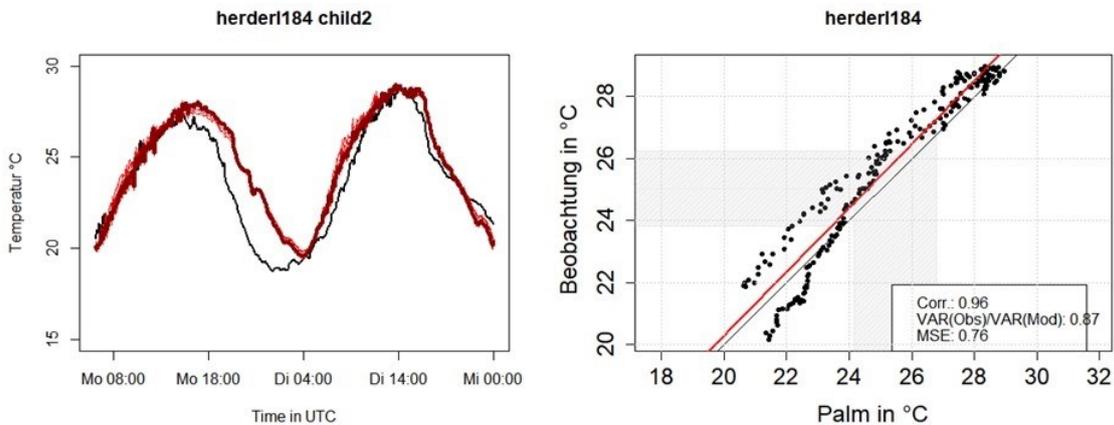


Abb. 3.1.12: Tagesgang der 4 m Temperatur unter einem Baum in der Child-2 -Domain und rechts die zugehörige qq-Verteilung zwischen PALM-4U (rot) und der Beobachtung (schwarz). Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).

Als ein weiterer Parameter für die Auswertung wurde die Differenz zwischen PALM-4U und der Beobachtung gewählt und über den Tagesverlauf hinweg als Boxplot dargestellt. Um die Variabilität der Modelldaten besser erfassen zu können, wurde unterschieden zwischen der räumlichen Modellauflösung von 2 m und 16 m.

Im Ergebnis, in der Child-1 und Child-2-Domain (Abb. 3.1.13, obere Reihe), zeigte sich bei den Abweichungen vom Modell zu den beobachteten Werten ein nahezu identischer Tagesgang. PALM-4U ist vormittags bis zu 2 K zu kalt und spät abends/nachts bis zu 2 K zu warm. Die Temperaturdifferenz unter den Bäumen (untere Reihe, links) zeigt den gleichen Tagesgang wie bereits in der Child-1 und Child-2 Domain, allerdings ist die Streuung der Daten sehr gering. Somit werden die Bäume im PALM-4U Modell gut abgebildet.

### Child 1 und Child 2 (Auflösung 2m)

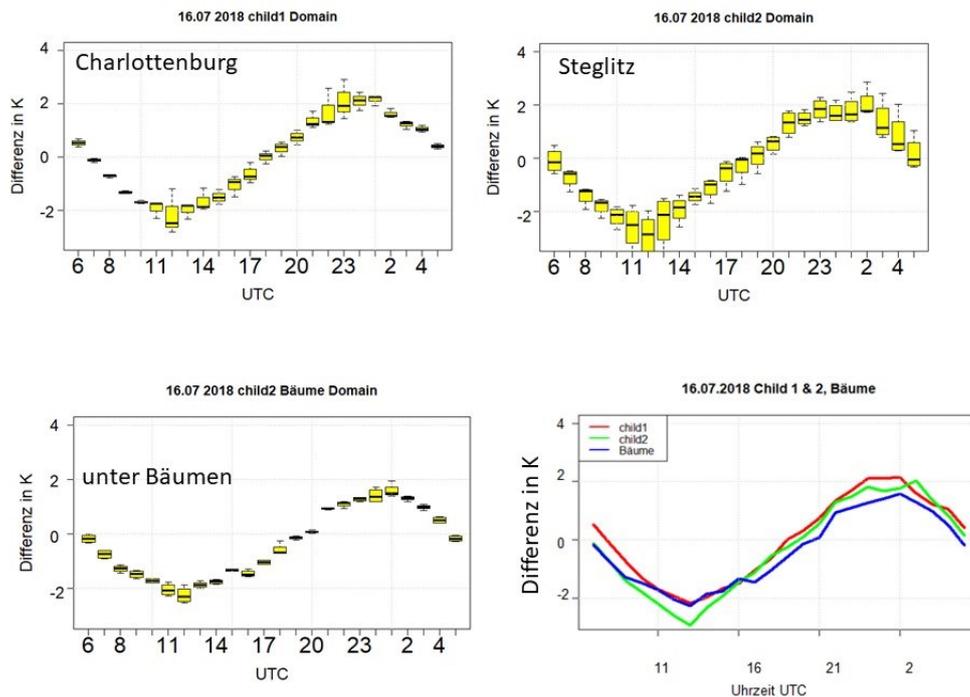


Abb. 3.1.13: Temperaturdifferenz (PALM-4U-Beobachtung) vom 16.07.2018 in der Child-1- und Child-2 Domain sowie unter Bäumen. Die Boxplot Darstellung zeigt den Wertebereich der Differenzen aller Stationen in den entsprechenden Child-Domain's (obere Abb.) sowie unter den Bäumen (unten links). Abb. unten rechts zeigt den Verlauf der entsprechenden Mittelwerte für jede Stunde (Child-1 (rot), Child-2 (grün) und Bäume (blau)) als Differenzwert zwischen PALM-4U und Beobachtung. Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).

Für eine anwendungsorientierte Auswertung wurden alle Messstationen in der Parent Domain anhand ihres ‚Sky View Factors‘ (SVF) bezüglich der 2 m Temperatur ausgewertet. Der SVF beschreibt den Grad der Horizontüberhöhung, dieser ist ein dimensionsloser Parameter zwischen 0 und 1, d.h. die komplette obere Himmelhälfte ist am Standort sichtbar (SVF=1) bzw. unsichtbar (SVF=0). Bei einer größeren Horizont einschränkung wird die effektive langwellige Ausstrahlung vermindert und somit kommt es zu höheren Nachttemperaturen in dicht bebauten Stadtgebieten im Vergleich zum Umland.

An jeder vom TP3 betriebenen Messstation wurde der SVF anhand eines Fisheye Fotos bestimmt, der bei dieser Auswertung in Klassen eingeteilt wurde (SVF: <0.29, <0.39, <0.49, <0.59, >0.60). Der SVF aller Messstationen in der Parent Domain variiert von 0.039 (z.B. Tegel Wald, LCZ A) bis zu einem SVF größer 0.611, z.B. der Elisabeth-Aue in der Local Climate Zone D.

Abb. 3.1.14 zeigt die Standardabweichung der Beobachtung gegen die Standardabweichung des PALM-4U aller Stationen mit einem SVF kleiner 0.29 (linke Abb.) bzw. im Wertebereich des SVF zwischen 0.49 und 0.59 (rechte Abb.). Es zeigt sich eine gute Korrelation von 0.85 bis 0.9. Des Weiteren ist die Varianz der beobachteten Messungen gegen die Varianz des

Modells größer 1, d.h. die Varianz des Modells ist kleiner als die Beobachtung; dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmendem SVF.

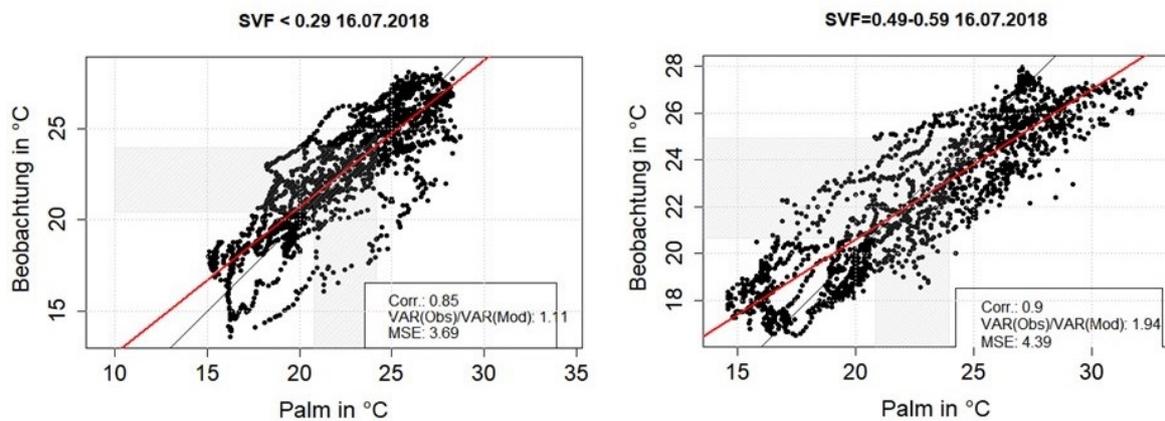


Abb. 3.1.14: Streudiagramm der Stationsdaten gegenüber PALM-4U für alle Stationen im Bereich des SVF < 0.29 (links) sowie im Bereich zwischen 0.49 und 0.59 (rechts) vom 16.07.2018 in der Parent Domain für die 2 m Temperatur. Der grau schattierte Bereich zeigt den Bereich  $\pm$  einer Standardabweichung um den jeweiligen Mittelwert. (Rot: Regressionsgerade von der Beobachtung zu PALM-4U und Schwarz: Winkelhalbierende zwischen Beobachtung und PALM-4U). Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).

Abb. 3.1.15 zeigt die Standardabweichung der gemessenen spezifischen Feuchte gegen die Standardabweichung des PALM-4U aller Stationen mit einem SVF kleiner 0.29 (linke Abb.) bzw. im Wertebereich des SVF zwischen 0.49 und 0.59 (rechte Abb.). Es zeigt sich eine Korrelation um 0.66. Des Weiteren ist die Varianz der Beobachtung gegen die Varianz des Modells kleiner 1, d.h. die Varianz des Modells ist größer als die Beobachtung; dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmendem SVF.

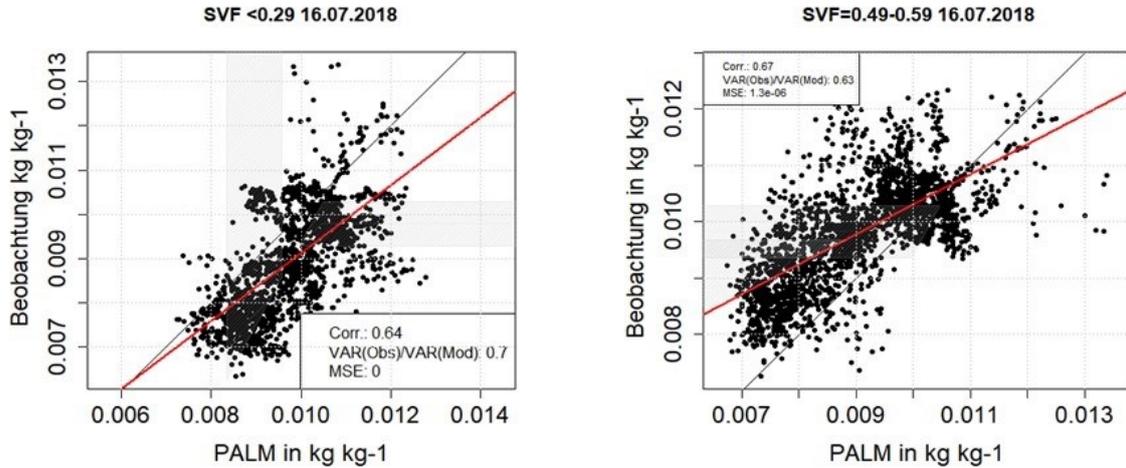


Abb. 3.1.15: Streudiagramm der Stationsdaten gegenüber PALM-4U für alle Stationen im Bereich des SVF < 0.29 (links) sowie im Bereich zwischen 0.49 und 0.59 (rechts) vom 16.07.2018 in der Parent Domain für die 2 m spezifische Feuchte. Der grau schattierte Bereich zeigt den Bereich  $\pm$  einer Standardabweichung um den jeweiligen Mittelwert. (Rot: Regressionsgerade von der Beobachtung zu PALM-4U und Schwarz: Winkelhalbierende zwischen Beobachtung und PALM-4U). Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).

Die Standardabweichung der Beobachtung gegen die Standardabweichung des PALM-4U-Modells unterteilt nach den LCZs von Berlin zeigen Abb. 3.1.16 und Abb. 3.1.17. Dabei wurde der erste Tag (16.07.2018) mit dem zweiten Tag (17.07.2018) verglichen.

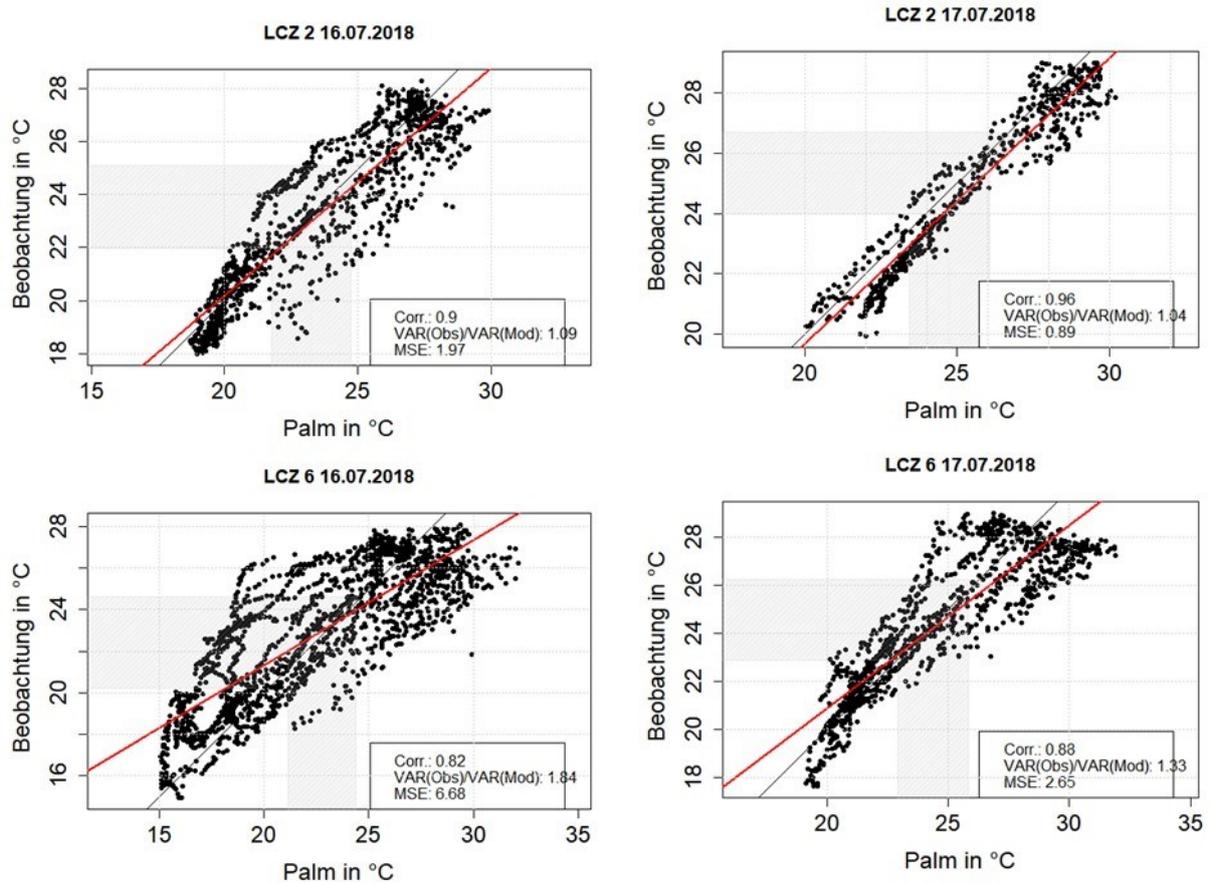


Abb. 3.1.16: Streudiagramm der Stationsdaten gegenüber PALM-4U für alle Stationen im Bereich der LCZ 2 (obere Abb.) und LCZ 6 (untere Abb.) vom 16.07.2018 (Tag 1) und vom 17.07.2018 (Tag 2) in der Parent Domain. Der grau schattierte Bereich zeigt den Bereich  $\pm$  einer Standardabweichung um den jeweiligen Mittelwert. (Rot: Regressionsgerade von der Beobachtung zu PALM-4U und Schwarz: Winkelhalbierende zwischen Beobachtung und PALM-4U). Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).

Bei den LCZs 2, 6 (Abb. 3.1.16), welche Häuser umfassen, zeigt sich eine verbesserte Korrelation von 0.92 bis 0.97 am zweiten Tag. Des Weiteren ist die Varianz der Messwerte größer als die Varianz der Modellwerte. Dieser Effekt nimmt am zweiten Tag bei allen LCZs ab, d.h. das Modell hat sich in seiner Variabilität verbessert. Den identischen Verlauf zeigen auch die LCZ A und G (Abb. 3.1.17), die reine Wald- und Wassergebiete in der Stadt sind. Die Korrelation wird am zweiten Tag größer und das Verhältnis der Varianz der beobachteten Messungen und der Varianz des Modells ist größer 1, wohingegen es sich am zweiten Tag auf nahezu 1 bewegt. Auch hier verbessert sich die Variabilität des Modells.

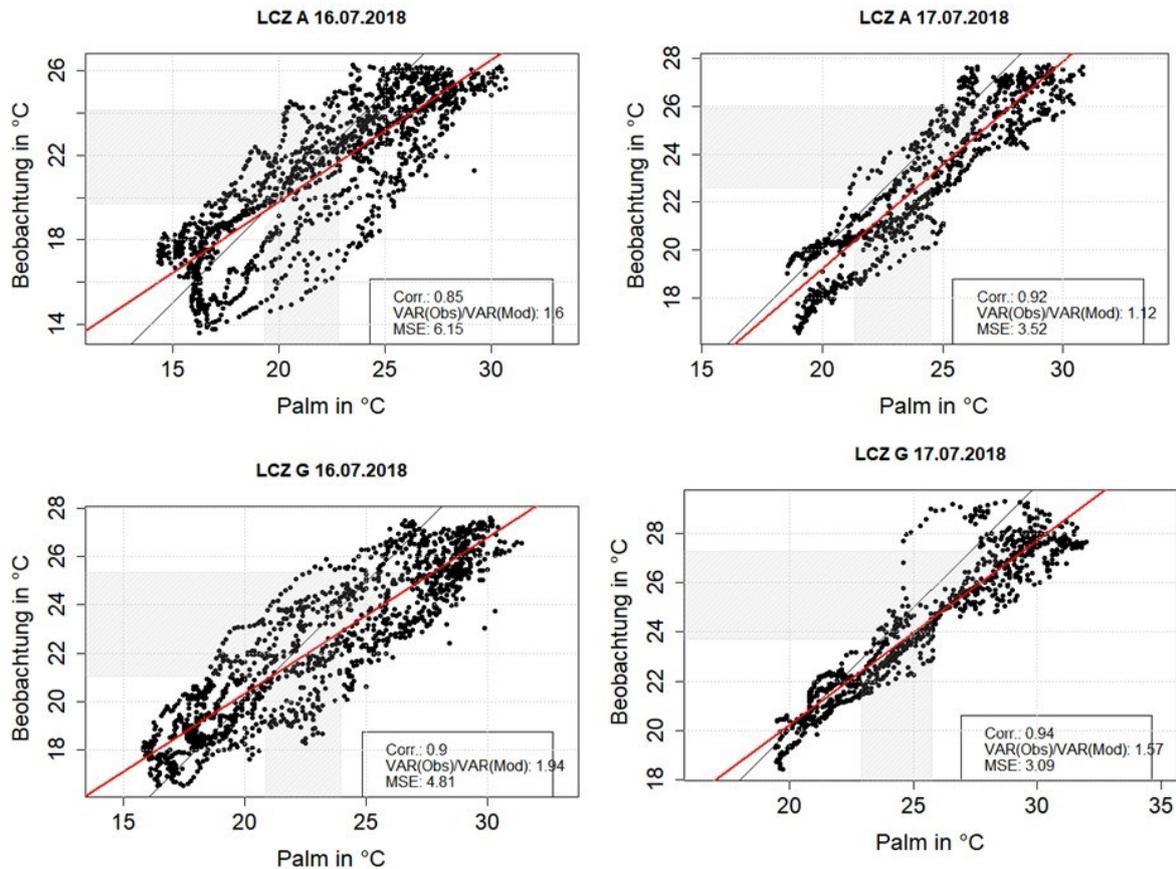


Abb. 3.1.17: Streudiagramm der Stationsdaten gegenüber PALM-4U für alle Stationen im Bereich der LCZ A (obere Abb.) und G (untere Abb.) vom 16.07.2018 (Tag 1) und Tag 2 (17.07.2018) in der Parent Domain. Der grau schattierte Bereich zeigt den Bereich  $\pm$  einer Standardabweichung um den jeweiligen Mittelwert. (Rot: Regressionsgerade von der Beobachtung zu PALM-4U und Schwarz: Winkelhalbierende zwischen Beobachtung und PALM-4U). Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).

Abb. 3.1.18 zeigt den Vergleich von modellierter und gemessener Temperatur für alle Aufstiegsstunden der Radiosonden von VALM02/VALR02 im Sommer 2018 in Berlin. Zu den meisten Zeiten am Tage, aber auch in der zweiten Nachthälfte, weist der Modelloutput geringere Temperaturwerte auf als die Messung. Ausnahmen sind in der ersten Nachthälfte, insbesondere zwischen 20:00 und 23:00 UTC festzustellen, wo sich die Simulation stets wärmer zeigt als die Messung. Die überwiegende Unterschätzung der Messung ist größtenteils auf den dynamischen Antrieb der Modellsimulation mit COSMO-Daten zurückzuführen.

Überschätzungen der Messung betragen im Maximum etwa 2.5 K (20:00 UTC), Unterschätzungen wurden dagegen bis maximal 1.3 K (16.7.2018, 06:00 UTC) ermittelt.

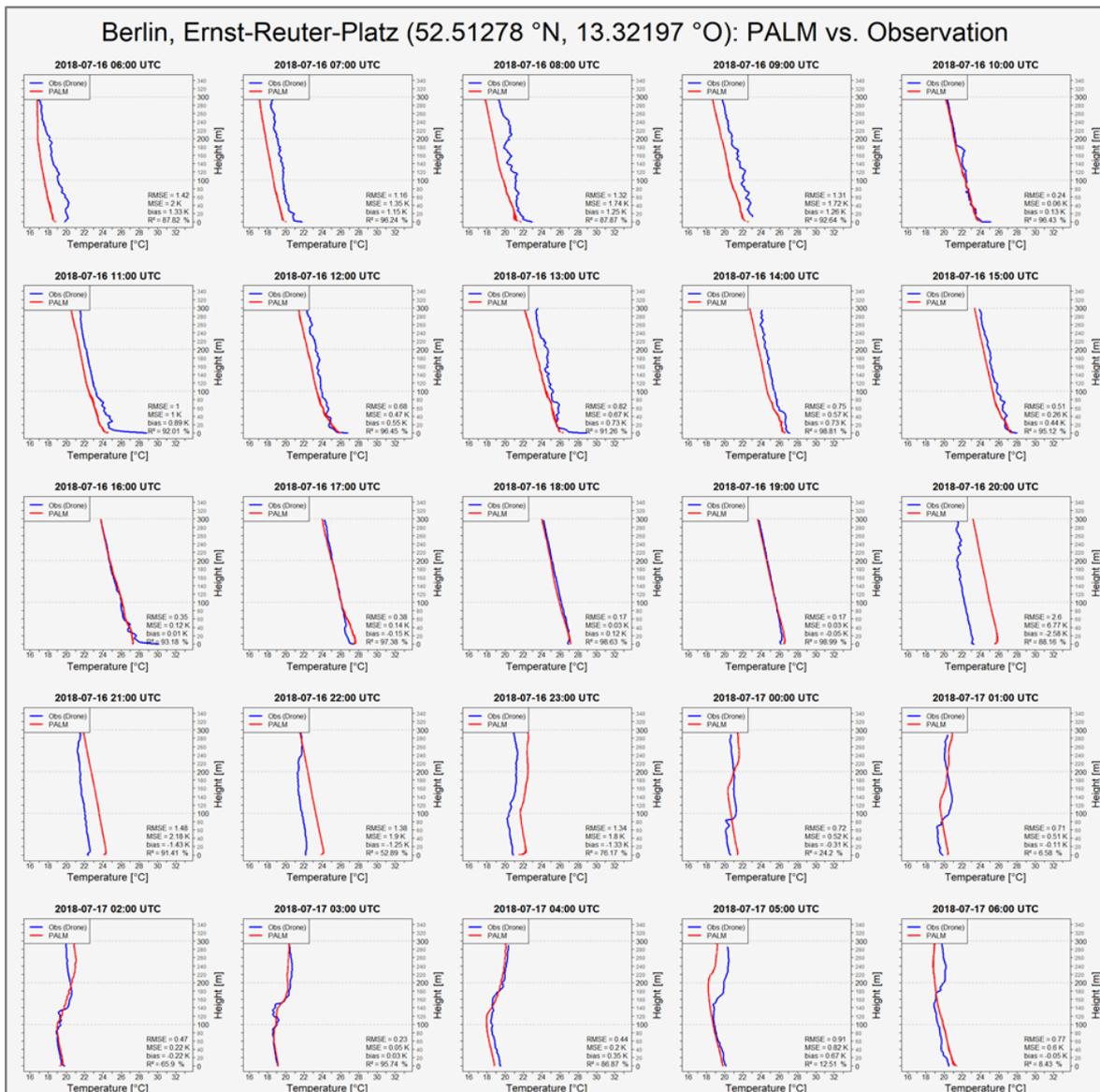


Abb. 3.1.18: Stündlicher Vergleich der Vertikalprofile von modellierter (PALM) und gemessener (OBS (Drohne)) Temperatur für den Standort Berlin, Ernst-Reuter-Platz (tuerpl) vom 16.07.2018 06:00 UTC bis 17.07.2018 06:00 UTC. Gütemaße: RMSE=root mean square error, MSE=mean squared error, bias=Abweichung der Mittelwerte,  $R^2$ =Bestimmtheitsmaß. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).

Bezüglich der Kurvenverläufe zeigt sich eine vor allem tagsüber, aber auch um 03:00 und 04:00 UTC in der Nacht ersichtliche, sehr hohe Übereinstimmung bei einem Bestimmtheitsmaß von weit über 80 % (Abb. 3.1.19, rechts). Die geringsten Übereinstimmungen sind dagegen in der ersten Nachthälfte nach Sonnenuntergang sowie am Morgen nach Sonnenaufgang zu beobachten. Während der Transition wurden bereits in früheren Untersuchungen Abweichungen zwischen Modell und Messung festgestellt (z.B. Gehrke et al., 2021 oder Kadasch et al., 2021). Morgens um 06:00 UTC (17.07.) ist die Höheninversion im Modell bereits abgebaut und die untere Grenzschicht gut durchmischt. Die Messung zeigt hingegen noch immer eine Inversion in ca. 160 m auf. Gleichwohl in Gehrke et

al. (2021) der umgekehrte Fall zu beobachten war, dass die stabile Schicht in der PALM-Simulation noch vorhanden war, während sie in der Messung bereits abgebaut wurde, scheint die Modellierung des exakten Zeitpunkts des Temperaturanstieges infolge einsetzender Konvektion nicht trivial. Darüber hinaus ist allgemein festzuhalten, dass die Modellierung gegenüber der Messung deutlich geglätteter auftritt und weniger Details aufzeigt als die vertikal feiner aufgelöste Messung (Abb. 3.1.18).

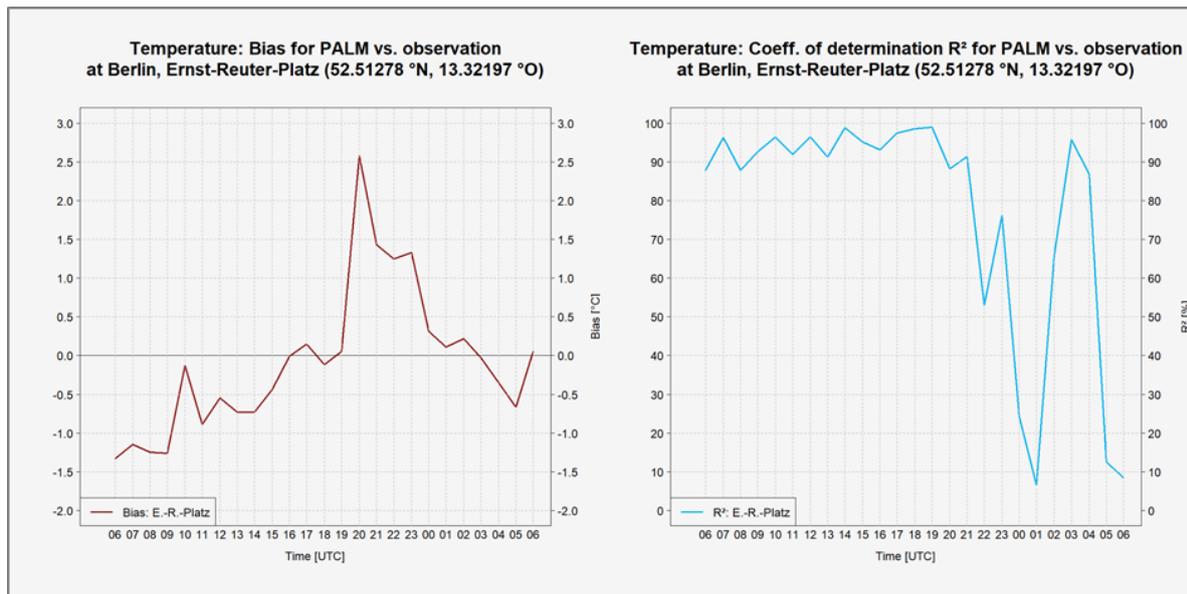


Abb. 3.1.19: Bias (links) und  $R^2$  (rechts) der Temperatur für Modell und Beobachtung im Tagesgang. Der betrachtete Zeitraum umfasst den 16.07.2018 06:00 UTC bis 17.07.2018 06:00 UTC für den Ernst-Reuter-Platz in Berlin. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).

Die gegenüber der Messung geringer simulierten Temperaturwerte sind flächendeckend festzustellen. Der Bias beträgt hierbei zwischen 1.5 K und -1.6 K, der Median der mittleren Abweichungen liegt bei ca. -0.8 K für den Standort Gutsmuths, ca. -0.6 K für den Standort Tempelhofer Feld und ca. -0.5 K für den Standort Hertzallee. Details aus der Messung werden im Modell nicht sichtbar.

Der vertikale Verlauf der Profile stimmt häufig sehr gut überein mit hohen erklärten Varianzen von bis zu 97%. Es gibt jedoch auch einzelne Uhrzeiten mit sehr geringem  $R^2$ . Abb. 3.1.20 zeigt zwei Beispiele.

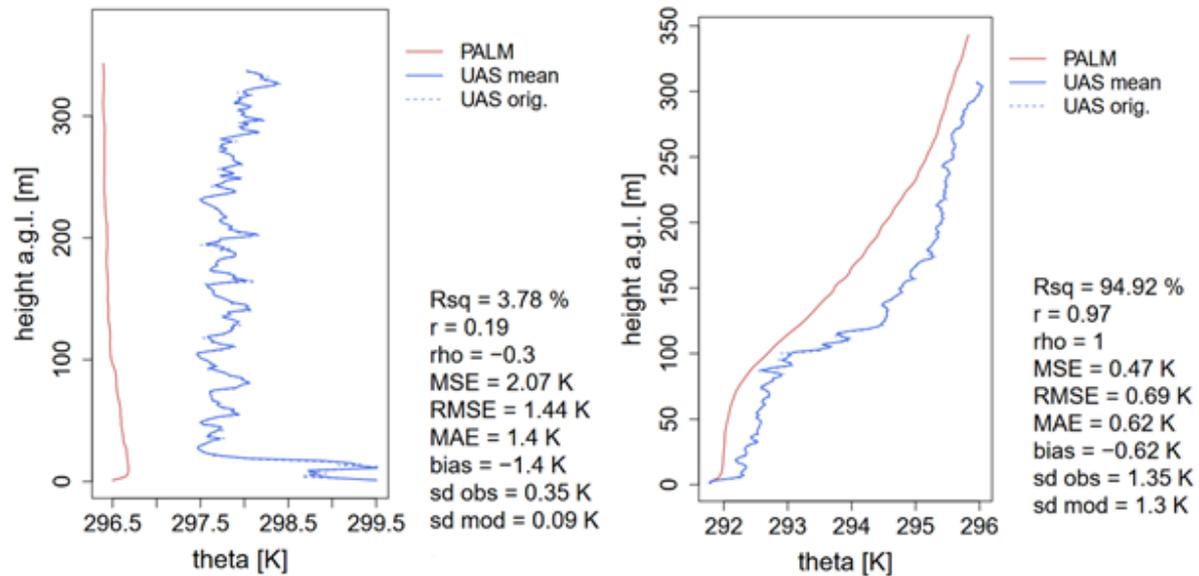


Abb. 3.1.20: Beispiele am Standort Gutschmuths für den Vergleich von Vertikalprofilen der potenziellen Temperatur der Modellierung und Messungen für ausgewählte Uhrzeiten aus VALM02v1/VALR02, links: 12 Uhr, rechts 2 Uhr. ( $Rsq$ =erklärte Varianz,  $r$ =Pearson Korrelationskoeffizient,  $\rho$ =Spearman Korrelationskoeffizient,  $MSE$ =mean square error,  $RMSE$ =root mean square error,  $MAE$ =mean absolute error,  $sd$ =Standardabweichung). Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo).

Der paarweise Vergleich der stündlichen gemessenen Profile mit dem entsprechenden PALM-4U Output an den drei Standorten Tempelhofer Feld, Gutschmuths und Hertzallee zeigt, dass die Übereinstimmung im Allgemeinen nachts und morgens besser ist als am Tag.

Die Tagesgänge der Profile im Modell und der Messung verdeutlichen nochmals die gute Übereinstimmung (Abb. 3.1.21) und zeigen einen typischen Tagesgang der potenziellen Temperatur für einen Sommertag mit Hochdruckeinfluss (16.-18.07.2018, VALM02v2). Während morgens im Modell noch eine Inversion ab 220 m sichtbar ist, ist dies in der Messung nicht der Fall. Danach folgt vormittags eine Erwärmung der Grenzschicht vom Boden her, die in der Messung deutlich sichtbar, im Modell jedoch etwas schwächer ausgeprägt ist. Nachmittags sind sowohl im Modell als auch in der Messung eine neutrale, gut durchmischte Schichtung mit einem mit der Höhe fast konstantem Temperaturprofil zu beobachten. Abends kommt es durch Ausstrahlung zu einer Abkühlung und es bildet sich eine Inversion. In der Messung beginnt dieser Prozess ab 19:00 UTC. Im Modell ist es zu dieser Zeit noch wärmer, die Inversion bildet sich etwas später. Nachts findet eine weitere Abkühlung von der Erdoberfläche aus statt mit einem residual layer über der Inversion. Am zweiten Tag (18.07.2018) war es ab dem Mittag zu windig, so dass bis abends keine

Messflüge am Standort Gutsmuths stattfinden konnten.

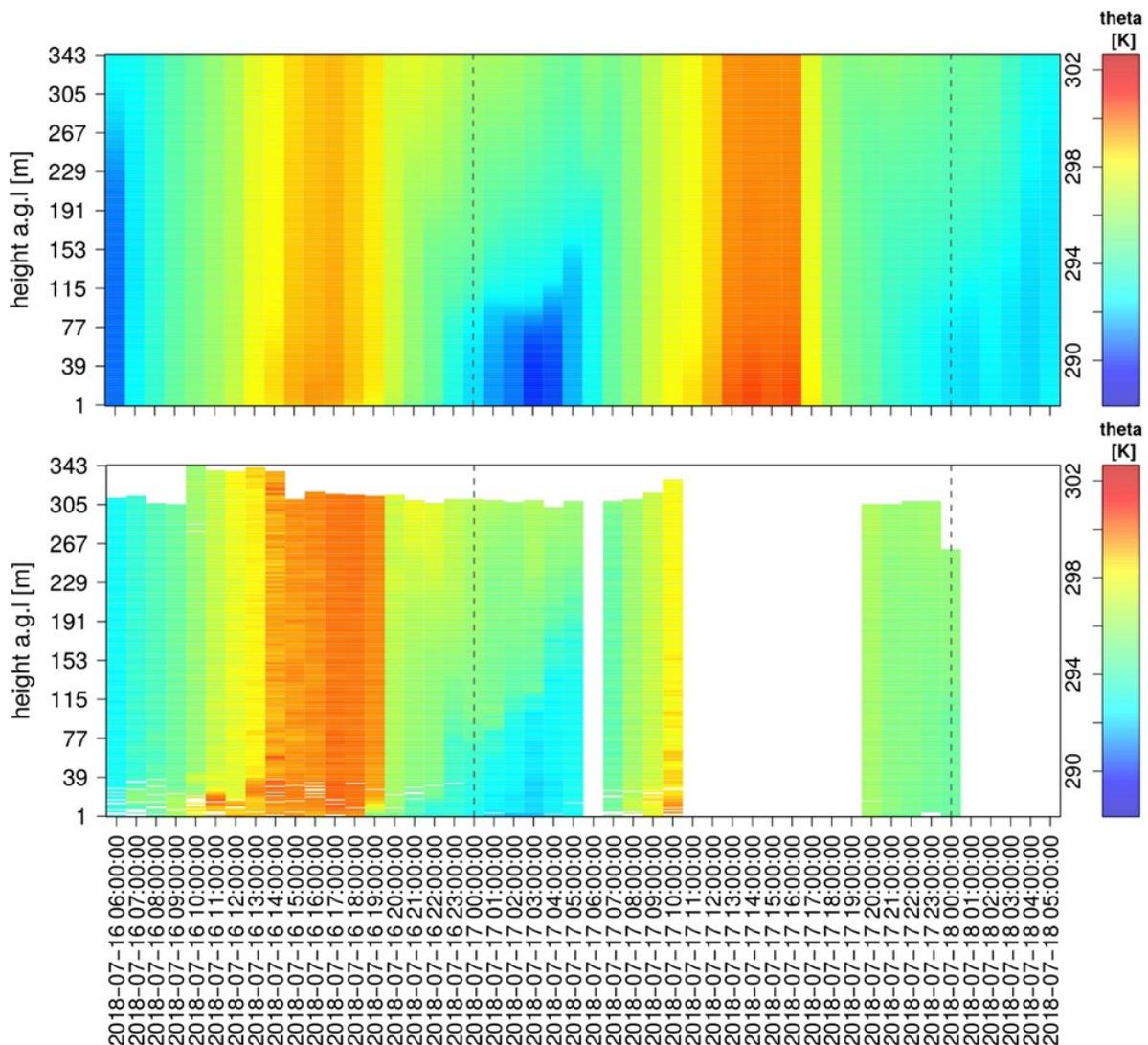


Abb. 3.1.21: Tagesgang der Vertikalprofile der potenziellen Temperatur am Standort Gutsmuths für den Zeitraum 16. bis 18. Juli 2018, oben: PALM-4U, unten: Messung, VALM02v2/VALR02. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo).

Vergleicht man die Evaluierungsergebnisse von VALM02v2 mit der ersten Version der Sommersimulation (VALM02v1), so fällt auf, dass zu einigen Uhrzeiten eine Verbesserung der Übereinstimmung erfolgt, insbesondere bei der Temperatur. Bei der potentiellen Temperatur ist das Modell Vormittags bis in den frühen Nachmittag in VALM02v2 etwas wärmer als in VALM02v1, was zu einer Reduktion des RMSE um bis zu 0.9 K führt. Zu manchen Uhrzeiten ist PALM-4U in der zweiten Version etwas kühler als in der ersten, was allerdings teilweise am Standort Gutsmuths ebenfalls zu einer Verringerung der Abweichung führt. An den Standorten Hertzallee und Tempelhofer Feld kommen hingegen vermehrt Vergrößerungen des RMSE zustande. Nachts fällt auf, dass zwar die Abweichung in VALM02v2 zunimmt, der vertikale Verlauf des Profils und damit die Schichtung aber besser

übereinstimmt. Beim Mischungsverhältnis sind die Änderungen der Gütemaße relativ gering. Vormittags kommt es aufgrund von tendenziell trockeneren Verhältnissen in VALM02v2 verglichen mit VALM02v1 zu einer Vergrößerung der Abweichung zu den Messungen. Tagsüber und abends ist die zweite Version des Laufs feuchter als die erste, was mit leichten Verbesserungen der Übereinstimmung mit den beobachteten Vertikalprofilen einhergeht (vgl. Abb. 3.1.22). Am Standort Hertzallee kommt zudem in VALM02v1 in 200m Höhe häufig ein auffälliger, unrealistischer “Knick” in den Vertikalprofilen der betrachteten Variablen vor, der in VALM02v2 nicht mehr zu sehen ist.

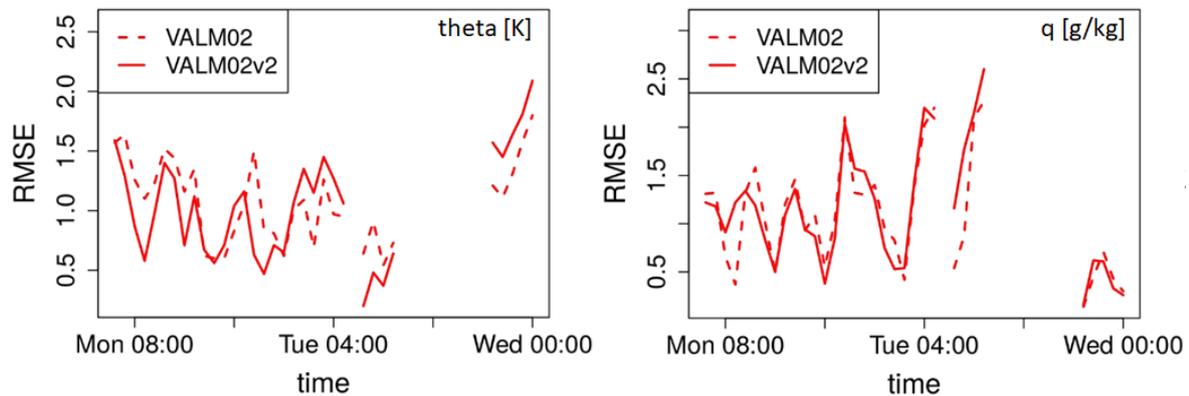


Abb. 3.1.22: Vergleich des RMSE zu verschiedenen Uhrzeiten für die Vertikalprofile der potentiellen Temperatur (K) (links) und des Mischungsverhältnisses (g/kg) (rechts) für VALM02v1 und VALM02v2 am Standort Gutmuths, Childdomain. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo).

## Lufttemperatur Stuttgart

### VALM04

VALM04 beschreibt eine Validierungsperiode in Stuttgart, für welche im Rahmen der IOP-4 im Zeitraum vom 08.07.2018 06:00 UTC bis 09.07.2018 06:00 UTC verschiedene Stationsmessungen und am Standort Marienplatz (marienpl) ebenfalls Vertikalsondierungen bis 300 m ü.G. durchgeführt wurden (VALR04).

In Abb. 3.1.23 sind drei Zeitreihen von modellierten (dargestellt mit roten und schwarzen Linien für Child1- bzw. Parent-Domäne) und gemessenen Lufttemperaturen (dargestellt mit grünen Linien) an der Messstation in Bad Cannstatt gezeigt. Es ist ersichtlich, dass die simulierten Lufttemperaturen von 05:00 bis 09:00 UTC am 8. und 9. Juli mit der gemessenen Lufttemperatur sehr gut korrelieren; sowohl die zeitliche Variabilität stimmt sehr gut überein und die Differenz der gemessenen und simulierten Mittelwerte von  $\pm 0,6$  °C stimmen sehr gut überein. Sowohl die gemessenen als auch die simulierten Lufttemperaturen begannen ab etwa 08:00 UTC stark anzusteigen mit unterschiedlichen maximalen Spitzenwerten von etwa 29 °C (MOD\_c1) und 27 °C (MOD\_pa) um etwa 15:00 UTC im Vergleich zu den gemessenen (OBS), welche ihr Maximum von 26 °C eine Stunde später um 16:00 UTC erreichten. Ebenso war die simulierte Nachmittags- und Nachttemperatur von 16:00 bis 00:00 UTC mit einem ungefähren Mittelwert von 25 °C höher als die gemessene Temperatur von etwa 23 °C. Während die gemessenen und simulierten Lufttemperaturen vom Nachmittag bis zum nächsten Morgen abnahmen, blieb die simulierte Lufttemperatur höher als die gemessene. Auch am 9. Juli zeigten die simulierten Lufttemperaturen einen ähnlichen Trend wie am Vortag, mit höheren Tagestemperaturen im Vergleich zu den gemessenen.

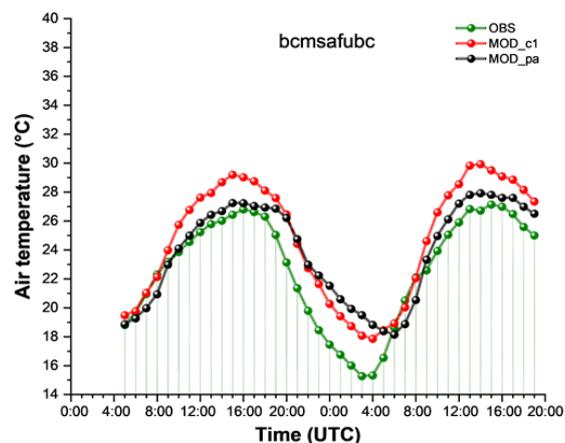


Abb. 3.1.23: Vergleich der Lufttemperatur der Simulationsergebnisse (VALM04, grün) und der stationären Messungen in Bad Cannstatt, Stuttgart für die Child- (orange) und Parent-Domain (schwarz). Quelle: USifk.

Ähnliche Ergebnisse wurden für die Validierung der Lufttemperatur Ergebnisse an der Messstation Schwabenzentrum in Stuttgart erzielt, wie in Abb. 3.1.24 dargestellt.

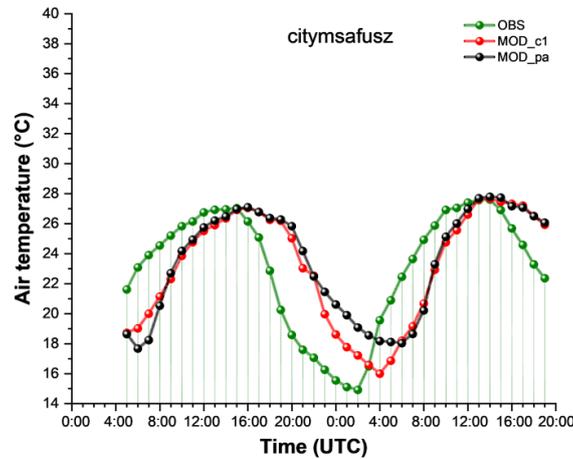


Abb. 3.1.24: Vergleich der Lufttemperatur der Simulationsergebnisse (VALM04, grün) und der stationären Messungen in Schwabenzentrum, Stuttgart für die Child- (orange) und Parent-Domain (schwarz). Quelle: USifk.

Die unterschiedliche Effizienz der vertikalen Durchmischung wird auch beim Vergleich der gemessenen und simulierten Temperaturprofile sichtbar. Während die beobachteten und simulierten Temperaturen bis zu einer Höhe von 1000 m übereinstimmen, sind ab 1500 m die simulierten Temperaturen um 1 bis 2 K höher als gemessen (Abb. 3.1.25).

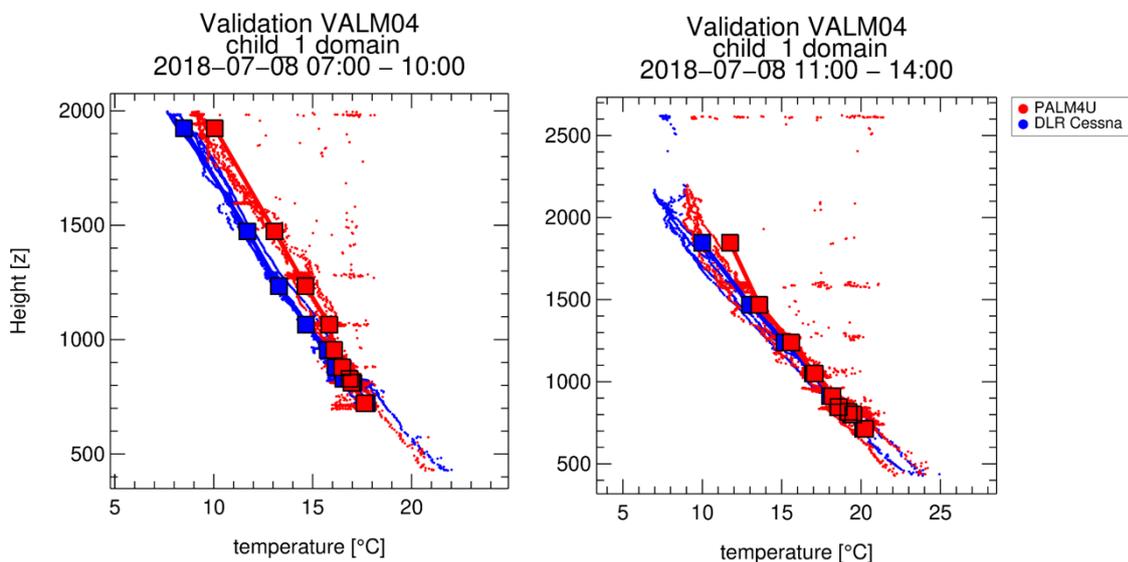


Abb. 3.1.25: Vergleich von mit PALM 4U modellierten (rot) und gemessenen (blau) Temperaturprofile am 08.07.2018. Quelle: FZJiek8

Das Temperaturprofil für den 09.07.2018 morgens zeigt den niedrigen Temperaturgradienten bis in eine Höhe von 1000 m, der auch Auswirkungen auf das NO<sub>2</sub>-Mischungsverhältnis und die Ozonkonzentration hat (s. Kapitel 3.6.2). Hier konnte, abgesehen

von einem konstanten Offset der Temperatur, kein Unterschied zwischen gemessenem und simuliertem Temperaturprofil festgestellt werden, während bei dem Flug zur Mittagszeit die Beobachtungen in Bodennähe mit den simulierten Temperaturen übereinstimmen. In größerer Höhe wurde die Temperatur von PALM-4U überschätzt. Bemerkenswert sind einzelne Messwerte mit stark erhöhter Temperatur in großen Höhen (Abb. 3.1.26).

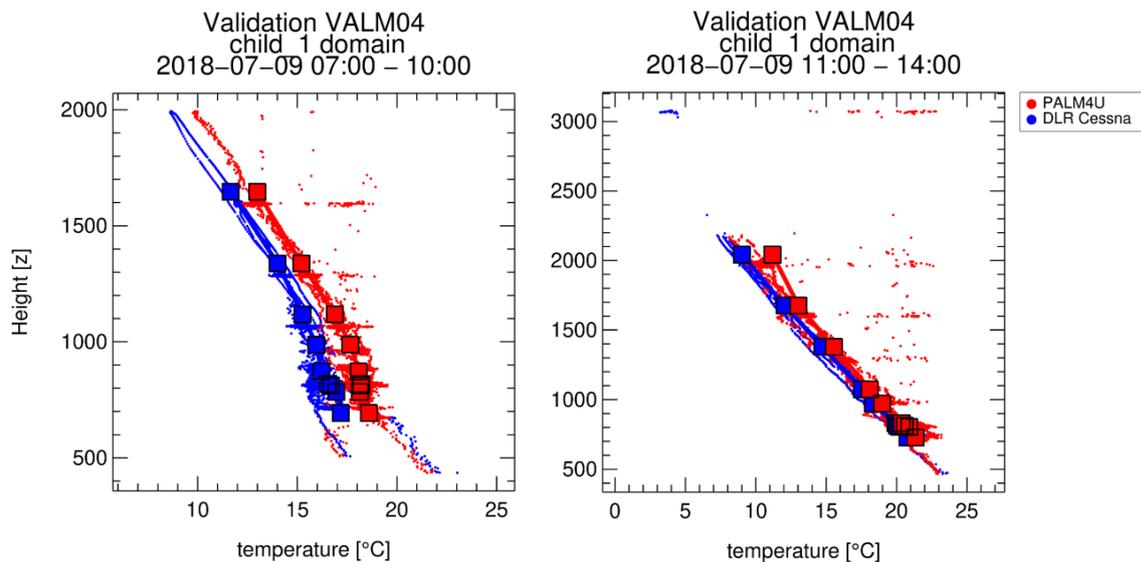


Abb. 3.1.26: Vergleich von mit PALM 4U modellierten (rot) und gemessenen (blau) Temperaturprofile am 09.07.2018. Quelle: FZJiek8.

Der Vergleich von modellierter und gemessener Temperatur für alle Aufstiegsstunden der Radiosonden von VALM04/VALR04 im Sommer 2018 in Stuttgart ist in Abb. 3.1.27 aufgetragen. Anders als bei VALM02/VALR02 überwiegen in der Stuttgarter Validierungsperiode die Stunden, zu denen das Modell die Messung überschätzt. Eine Unterschätzung findet dagegen, ähnlich wie in VALM02/VALR02, vor allem in den Morgenstunden statt (Abb. 3.1.28, links; vgl. Abb. 3.1.19, links), mit dem Maximum bei ca. 1.6 K (08:00 UTC). Die höchsten Beträge der Überschätzung des Modells gegenüber der Messung wurden mit Werten zwischen ca. 1.5 K und 2.0 K in den Nachtstunden ermittelt.

Der Vergleich der Kurvenverläufe von Modell und Messung bestätigt die Beobachtungen aus der Berliner Validierungsperiode: Den Bestimmtheitsmaßen von abermals weit über 80 % am Tage und in der zweiten Nachthälfte stehen erneut deutlich geringere Korrelationen nach Sonnenuntergang sowie Sonnenaufgang gegenüber (Abb. 3.1.28, rechts). Somit scheint die Umkehr von stabiler zu neutraler Schichtung und entgegengesetzt vom Modell im Vergleich zur Messung leicht verzögert einzusetzen.

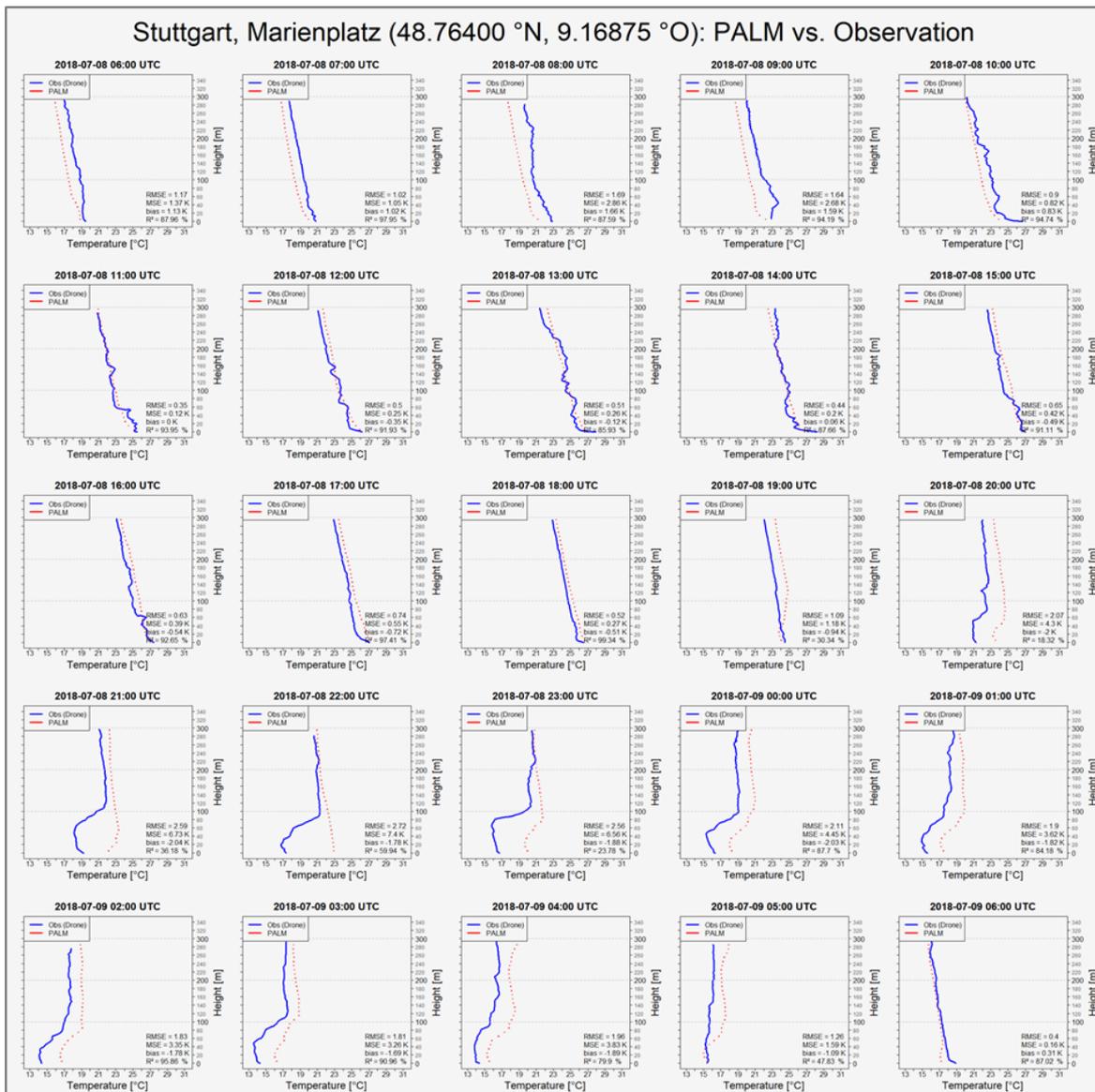


Abb. 3.1.27: Stündlicher Vergleich der Vertikalprofile von modellierter (PALM) und gemessener (OBS (Drohne)) Temperatur für den Standort Stuttgart, Marienplatz (marienpl) vom 08.07.2018 06:00 UTC bis 09.07.2018 06:00 UTC. Gütemaße: RMSE=root mean square error, MSE=mean squared error, bias=Abweichung der Mittelwerte, R<sup>2</sup>=Bestimmtheitsmaß. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).

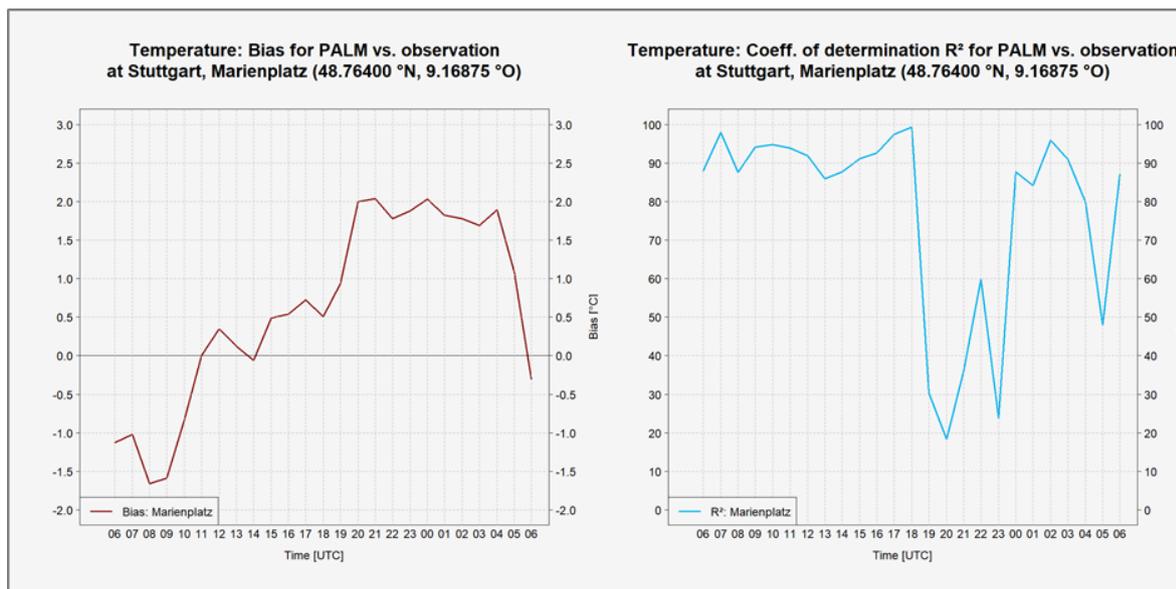


Abb. 3.1.28: Bias (links) und  $R^2$  (rechts) der Temperatur für Modell und Beobachtung im Tagesgang. Der betrachtete Zeitraum umfasst den 08.07.2018 06:00 UTC bis 09.07.2018 06:00 UTC für den Marienplatz in Stuttgart. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).

### PALM-4U v22.10

Es wurden ERA5 Daten vom Copernicus Climate Change Service verwendet und mit dem Weather Research and Forecast Modell (WRF v4.1.5) auf räumliche Skalen von 5 km und 1 km verfeinert. In Abb. 3.1.29 ist die Modelltopografie sowie die bodennahe Strömung und Lufttemperatur für das WRF Modell Setup abgebildet. Aus diesen verfeinerten Daten wurden mit dem wrf\_interface dynamische Treiber für PALM-4U erstellt.

Beispielhaft sind geländefolgende Horizontalschnitte der potenziellen Temperatur um 06:00 UTC in Abb. 3.1.30 gezeigt. Die Abb. zeigt, dass sowohl die Kälte in den Tälern, z.B. im Neckartal, als auch die emissionsgetriebenen Erhöhungen der Partikelkonzentrationen nahe großer Verkehrsadern im Modell simuliert worden sind.

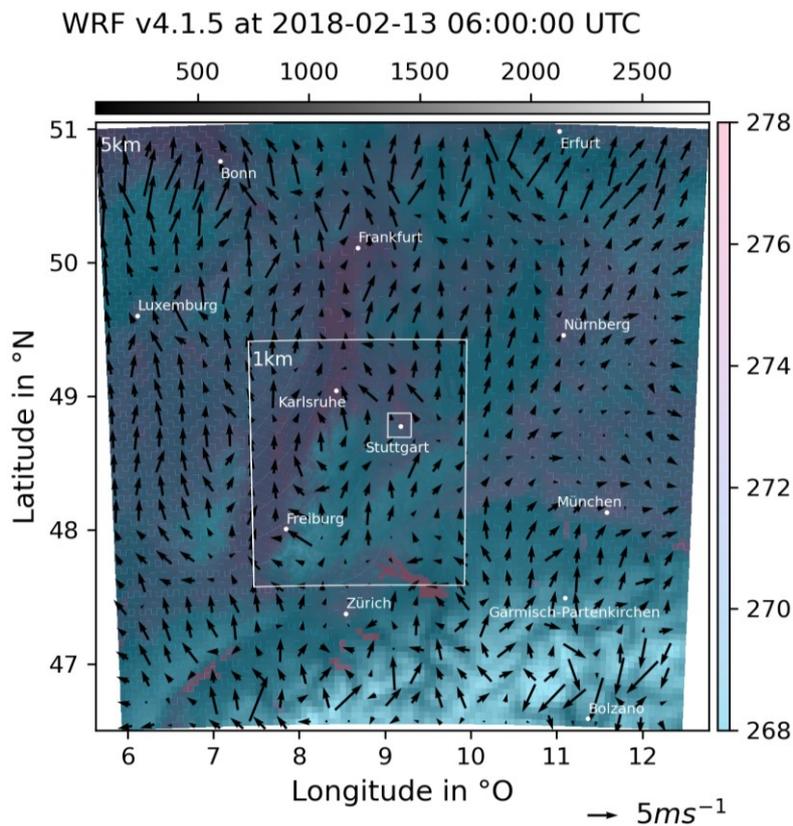


Abb. 3.1.29: WRF Ergebnisse für bodennahe Temperatur und Wind am 13. Februar 2018 um 06:00:00 UTC, unterlegt durch die Modelltopografie, mit einigen Städten markiert zur Orientierung. Quelle: IMK-TRO Sachbericht 2022.

Der Vergleich zwischen WRF und PALM-4U zeigt, dass große Strukturen von WRF sinnvoll abgebildet werden (Abb. 3.1.29). Die relative Wärme des Rheingrabens ist gut zu erkennen. Feinere Strukturen, z.B. das Neckartal, sind jedoch in diesen Daten kaum sichtbar, im Gegensatz zu den PALM-4U Ergebnissen in Abb. 3.1.30. Dies ist angesichts der Gitterweiten zu erwarten, da die relevanten Prozesse mit den Gitterweiten von 40 m und 10 m auch im Winter abzubilden sind.

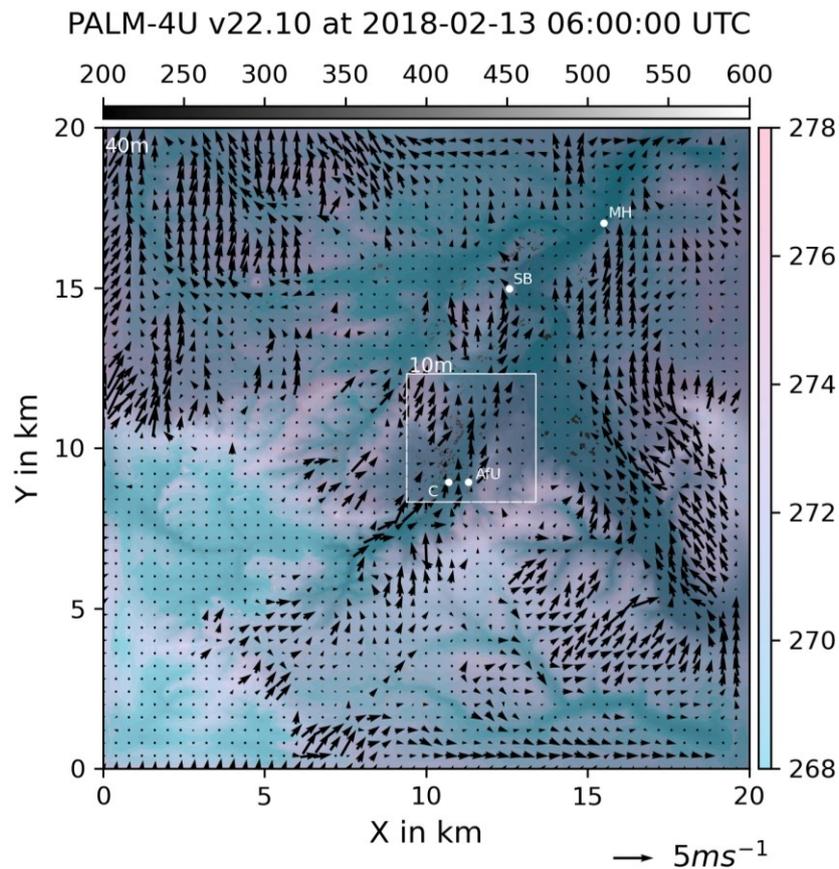


Abb. 3.1.30: PALM-4U Ergebnisse für den selben Zeitpunkt wie in Abb. 3.1.29. Gezeigt sind Wind und Temperatur 15 m über der Oberfläche. Quelle: IMK-TRO Sachbericht 2022.

### Lufttemperatur Augsburg

Für die Stadt Augsburg zeigen Vergleiche für die Simulation im Zeitraum 04.06.2019 12:00 UTC bis 06.06.2019 06:00 UTC ebenfalls eine gute Übereinstimmung des zeitlichen Verlaufs der Vertikalprofile der potenziellen Temperatur in PALM-4U und UAV-Messungen. Diese sind in Abb. 3.1.31 für den innerstädtischen Standort Prinzregentenplatz für den Zeitraum einer Messkampagne dargestellt. Morgens ist zunächst sowohl im Modell als auch in den Messungen noch eine Inversion mit darüber liegendem residual layer des Vortages zu sehen, wobei dies in der Messung deutlicher ausgeprägt ist. Es folgt eine parallel ablaufende Erwärmung der urbanen Grenzschicht im Laufe des Vormittags, die zur Bildung einer Mischungsschicht am Tag führt. In den Messungen sind zu dieser Zeit feinere Strukturen erkennbar, die im Modell nicht abgebildet werden. Nachmittags fallen sowohl in PALM-4U als auch in der Messung höhere Temperaturen in Bodennähe verglichen mit den darüberliegenden Schichten auf. Die abendliche Abkühlung setzt im Modell etwas früher ein und es werden am späten Abend kühlere Temperaturwerte in Bodennähe erreicht. Nachts

kommt es in der Simulation nochmals zu einer Erwärmung in höheren Schichten, die in den Messungen nicht auftritt.

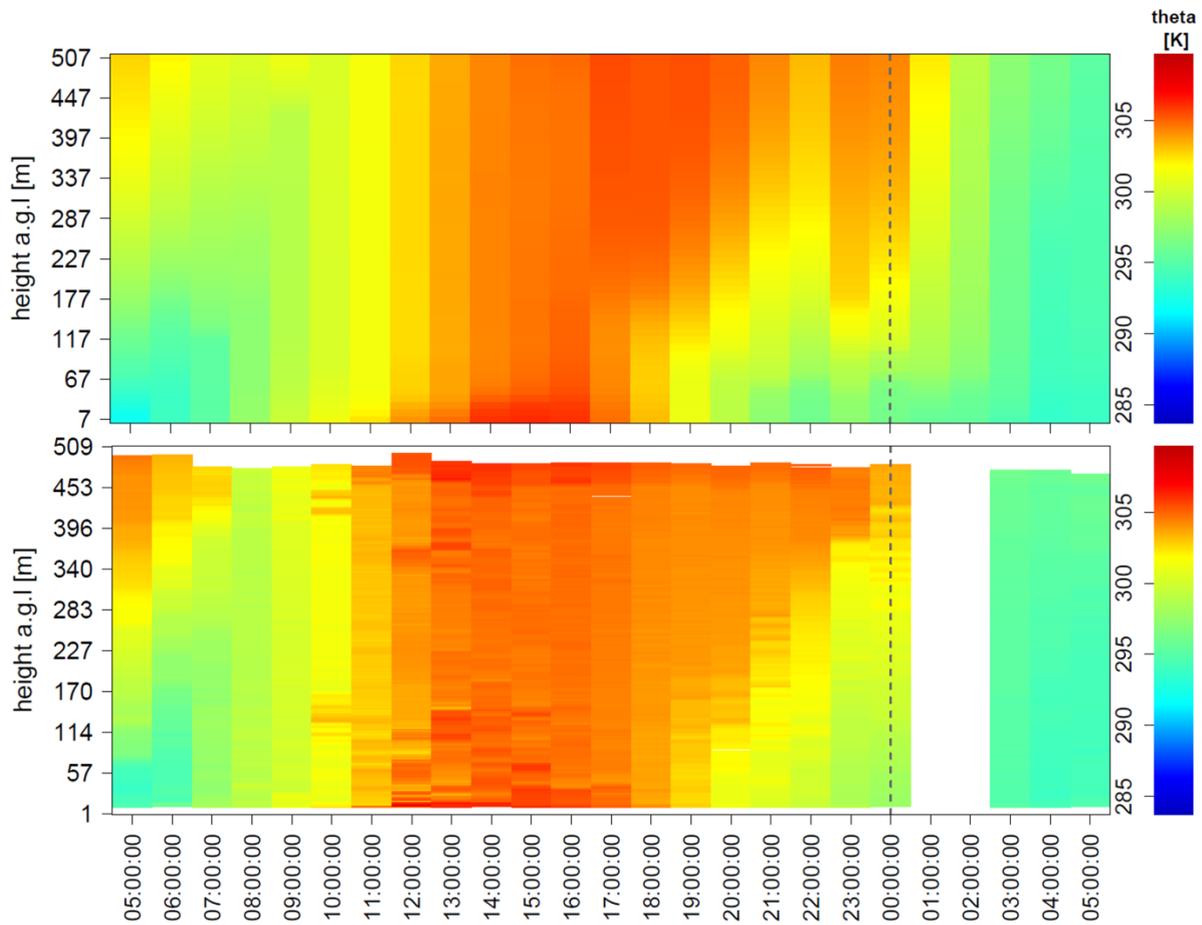


Abb. 3.1.31: Zeitreihen von Vertikalprofilen der potenziellen Temperatur im Zeitraum vom 05.06.2019 5:00 UTC bis 06.06.2019 5:00 UTC für einen innerstädtischen Standort in Augsburg, oben: PALM-4U, unten: Messungen mit einem Hexacopter. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo).

Insgesamt sind die modellierten Temperaturen kühler als die Messungen (vgl. Abb. 3.1.32, links). Für den Vergleich der stündlichen Vertikalprofile an drei Standorten ergeben sich mittlere Abweichungen von  $-0.5$  K. Der Vergleich von Zeitreihen eines stationären Messnetzes mit 43 Standorten im Stadtgebiet von Augsburg ergibt einen mittleren Bias von  $-1.9$  K. Boxplots des Bias für den stationsweisen Vergleich der Messungen mit PALM-4U zeigen zudem, dass die Beträge der beobachteten Abweichungen teilweise unter 1 K liegen, in einigen Fällen jedoch über 2.5 K. Diese sind somit im Stadtgebiet sehr heterogen. Die erklärten Varianz weisen mit einem Median von ca. 94% insgesamt sehr hohe Werte auf (vgl. Abb. 3.1.32, rechts).

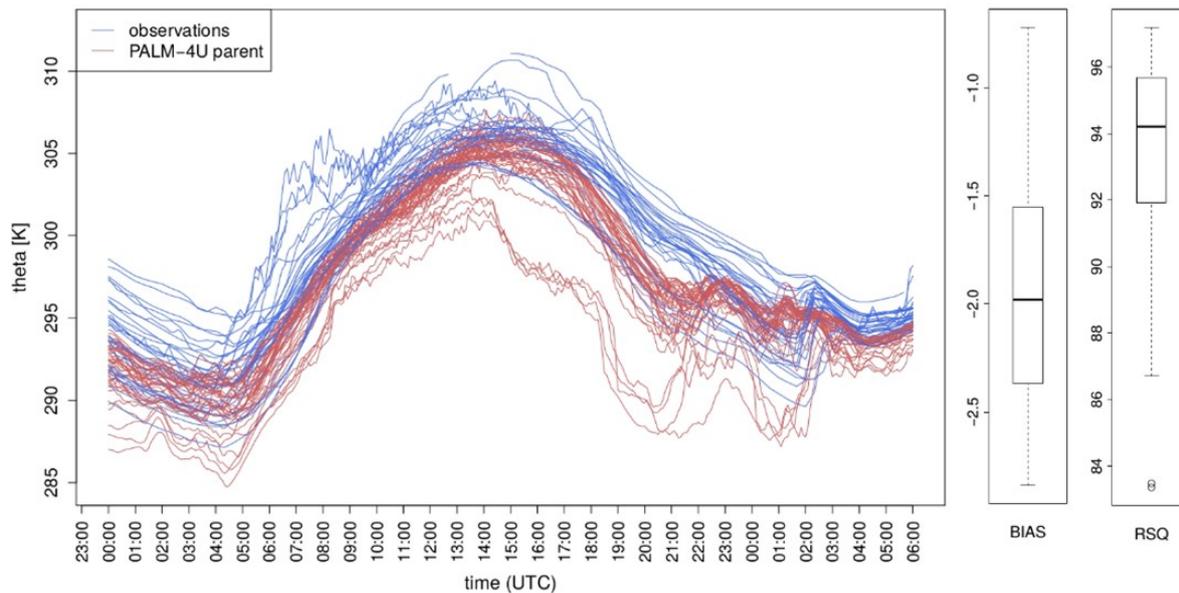


Abb. 3.1.32: Links: Zeitreihe der potenziellen Temperaturen für den 05.06.2019 - 06.06.2019 (thermische Referenzsituation) in Augsburg, blau: Messungen an 43 Stationen, rot: entsprechende Werte aus der PALM-4U Simulation, Parent Domain. Rechts: Boxplots der mittleren Abweichungen (Bias) und der erklärten Varianz (Rsq) für den paarweisen Vergleich der Messungen mit dem Modelloutput. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo).

Für den Zeitraum 25.06.2019 12:00 UTC bis 27.06.2019 00:00 UTC sind die modellierten Temperaturen ebenfalls niedriger als die gemessenen (vgl. Abb. 3.1.33, links). Für den Vergleich der Modellergebnisse mit Zeitreihen aus dem stationären Messnetz ergibt sich ein Mittelwert des Bias über alle Messstandorte von -2.3 K. Boxplots des Bias für den stationsweisen Vergleich der Messungen mit PALM-4U zeigen zudem eine große Spannweite der beobachteten Abweichungen. Die erklärten Varianzen weisen insgesamt hohe Werte auf, der Median liegt hier bei ca. 97% (vgl. Abb. 3.1.33, rechts). Zudem sind die Abweichungen für die thermische Belastungssituation größer als für den Referenzzeitraum (vgl. Abb. 3.1.32), was auf die unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen an den beiden simulierten Tagen zurückzuführen sein kann.

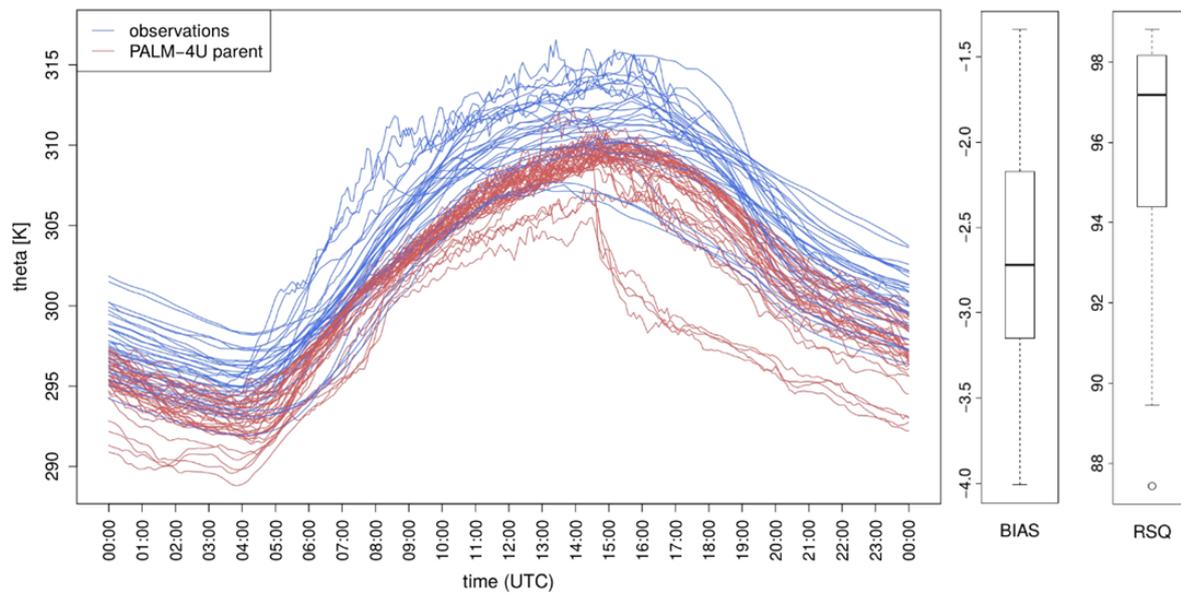


Abb. 3.1.33: Links: Zeitreihe der potenziellen Temperaturen für den 26.06.2019 (thermische Belastungssituation) in Augsburg, blau: Messungen an 43 Stationen, rot: entsprechende Werte aus der PALM-4U Simulation, Parent Domain. Rechts: Boxplots der mittleren Abweichungen (Bias) und der erklärten Varianz (Rsq) für den paarweisen Vergleich der Messungen mit dem Modelloutput. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo).

Ein Vergleich der potenziellen Temperaturen aufgeteilt nach Local Climate Zones zeigt für Augsburg, dass sowohl im Modell als auch in stationären Messungen die bebauten LCZs höhere Werte aufweisen als diejenigen, die überwiegend von Vegetation geprägt sind. Hierbei ist in beiden Fällen die LCZ “compact mid-rise” am wärmsten und auch die Abstufung der weiteren durch lockere bzw. niedrigere Bebauung charakterisierten LCZ stimmt in Modell und Messung überein. Bei den natürlichen Klassen ist in beiden Fällen die LCZ “dense trees” deutlich kühler als “scattered trees” (vgl. Abb. 3.1.34). Dies zeigt, dass innerstädtische Temperaturdifferenzen in PALM-4U in treffender Weise wiedergegeben werden. Es ist jedoch zu beachten, dass nicht alle LCZs durch eine ausreichende Anzahl an Messstandorten vertreten sind und in wenigen LCZs keine Messungen vorhanden sind.

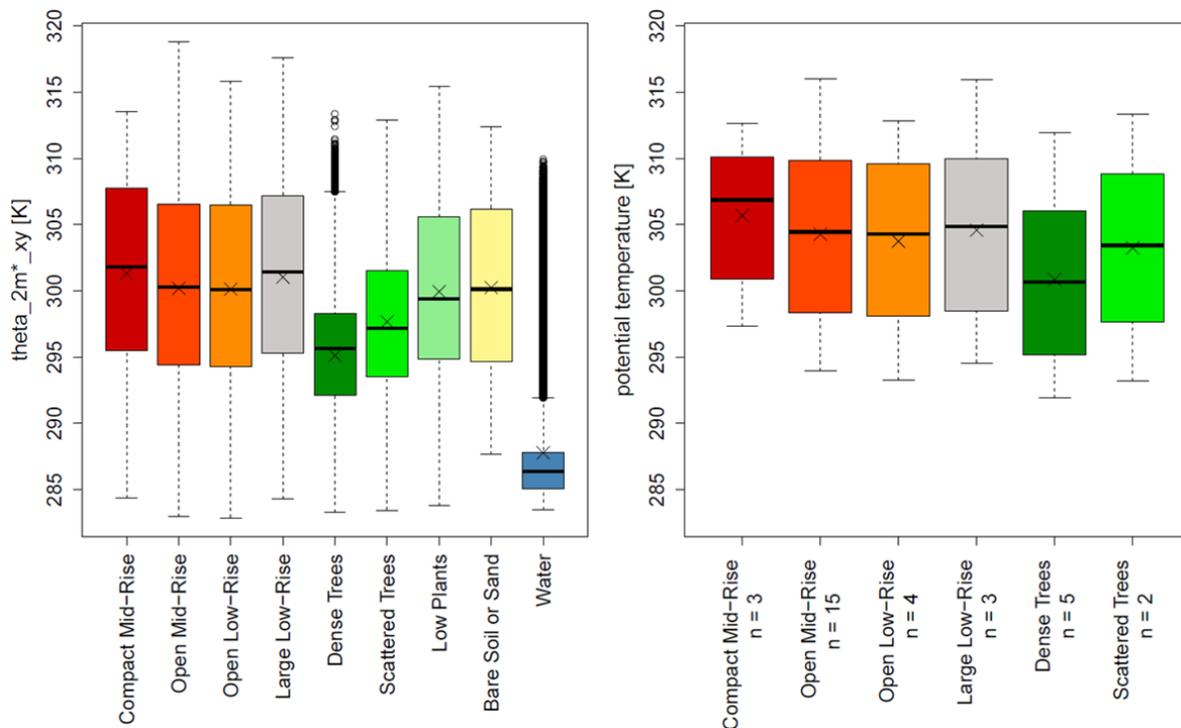


Abb. 3.1.34: Boxplots der potenziellen Temperatur in Augsburg aufgeteilt nach Local Climate Zones (LCZs). Das  $x$  kennzeichnet den jeweiligen Mittelwert. Links: potentielle Temperatur in 2m Höhe über Grund aus PALM-4U. Rechts: potentielle Temperatur aus einem stationären Messnetz, die Zahlen auf der x-Achse geben die Anzahl der Messstandorte in der jeweiligen LCZs an. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo).

### Lufttemperatur Hannover

Vom 06.08.2020 04:00 UTC bis 07.08.2020 04:00 UTC fanden Sondermessungen mit zwei gleichartigen Hexakopter-Radiosonden-Messsystemen an den Standorten Maschsee und Altenbekener Damm in der Südstadt Hannovers statt, die zur Evaluierung einer eigenen PALM-4U-Simulation „VALM\*TP12 (Phase2)“ herangezogen werden.

Abb. 3.1.35 und 3.1.36 zeigen den Vergleich von modellierter und gemessener Temperatur für alle Aufstiegsstunden für die Standorte Maschsee und Altenbekener Damm in der Südstadt in Hannover für den Zeitraum vom 06.08.2020 04:00 UTC bis 07.08.2020 04:00 UTC. Es zeigt sich, dass die PALM-Simulation die Messung nahezu zu allen betrachteten Zeiten unterschätzt (Ausnahme: 04:00 und 05:00 UTC am Standort Maschsee). Diese Unterschätzung ist offenkundig erneut auf den verwendeten dynamischen COSMO-Treiber des PALM-Modells zurückzuführen, der bereits in den VALM-Rechnungen in Berlin und Stuttgart zum Einsatz kam. Die Amplitude des Bias ist jedoch bei Beträgen bis maximal 2.2 K (Maschsee) und 3,0 K (Altenbekener Damm) deutlich höher als noch in den VALM-Episoden (Abb. 3.1.37, links), was auf ein abgeändertes Modell-Setup zurückzuführen sein könnte. Weiterhin fällt auf, dass der Bias des gewässernahen Standorts am Maschsee am Vormittag

geringer ausfällt als jener des ca. 250 m vom Wasser entfernten und von Siedlungsraum umgebene Standorts am Altenbekener Damm. Zu den restlichen Tageszeiten ist der Bias an beiden Standorten nahezu identisch.

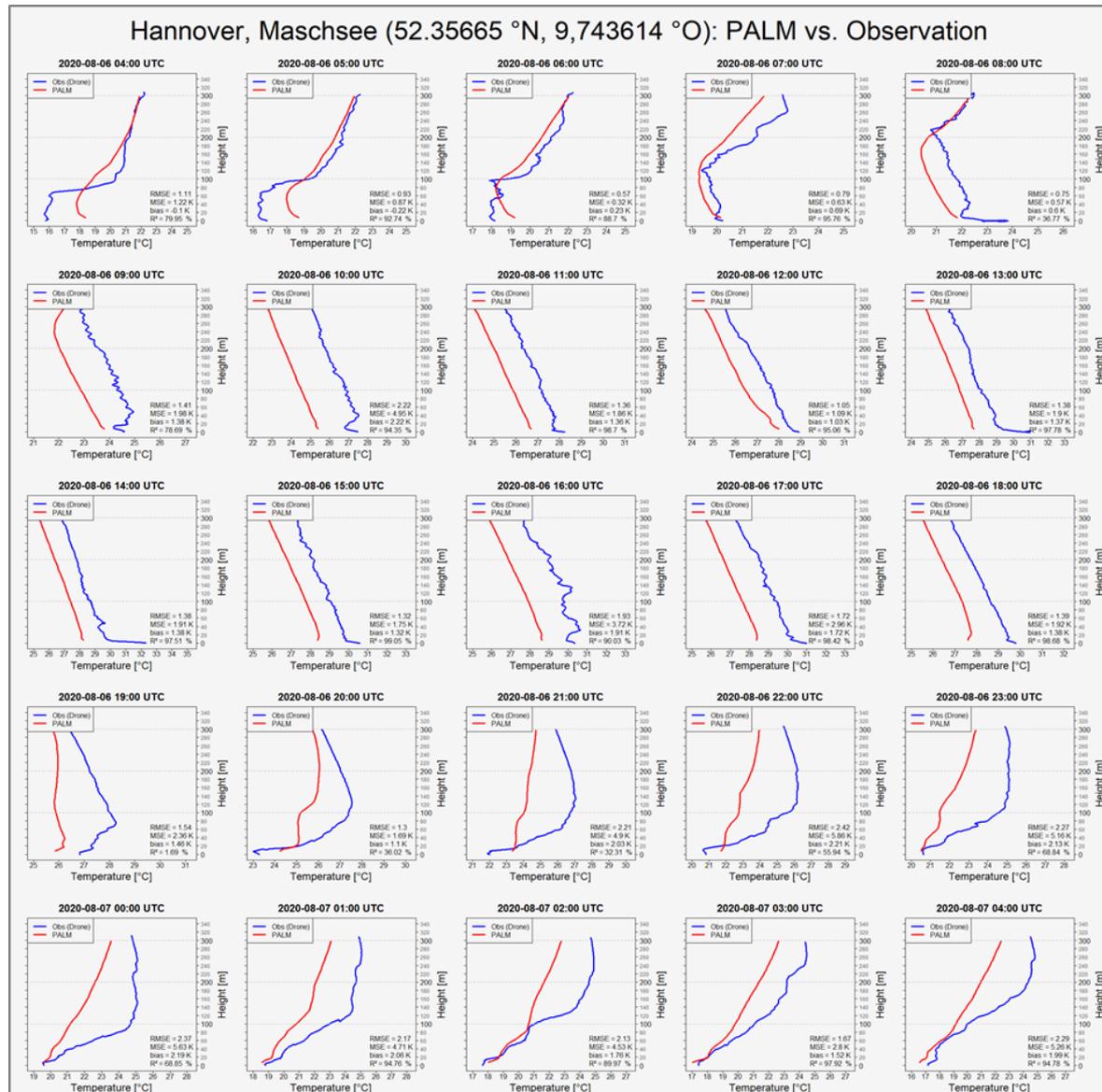


Abb. 3.1.35: Stündlicher Vergleich der Vertikalprofile von modellierter (PALM) und gemessener (OBS (Drohne)) Temperatur für den Standort Hannover, Maschsee vom 06.08.2020 04:00 UTC bis 07.08.2020 04:00 UTC. Gütemaße: RMSE=root mean square error, MSE=mean squared error, bias=Abweichung der Mittelwerte,  $R^2$ =Bestimmtheitsmaß. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).

Gleiches gilt für die Kurvenverläufe von Modell und Messung, die zu den gleichen Tageszeiten besonders gut oder weniger gut zusammenpassen (Abb. 3.1.37, rechts). So ist wie bereits während der Berliner und Stuttgarter Validierungsperioden zu beobachten, dass die Übereinstimmung der Kurvenverläufe zu Zeiten nach Sonnenauf- oder -untergang weniger gut übereinstimmen.

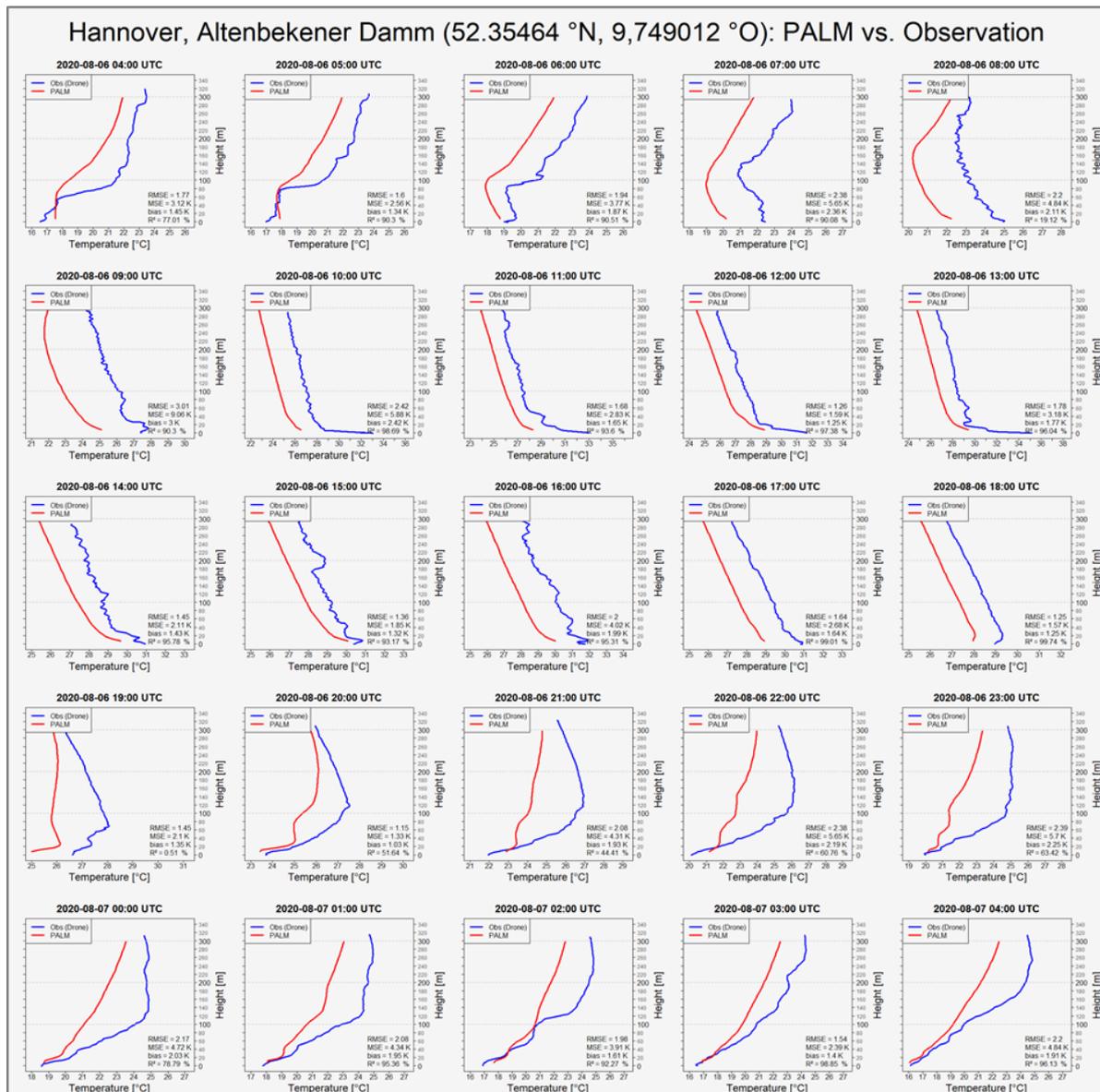


Abb. 3.1.36: Stündlicher Vergleich der Vertikalprofile von modellierter (PALM) und gemessener (OBS (Drohne)) Temperatur für den Standort Hannover, Altenbekener Damm vom 06.08.2020 04:00 UTC bis 07.08.2020 04:00 UTC. Gütemaße: RMSE=root mean square error, MSE=mean squared error, bias=Abweichung der Mittelwerte, R²=Bestimmtheitsmaß. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).

Zu den restlichen Tageszeiten wird dagegen erneut eine überwiegende Übereinstimmung der Verläufe von weit über 80 % getroffen (Abb. 3.1.36, rechts).

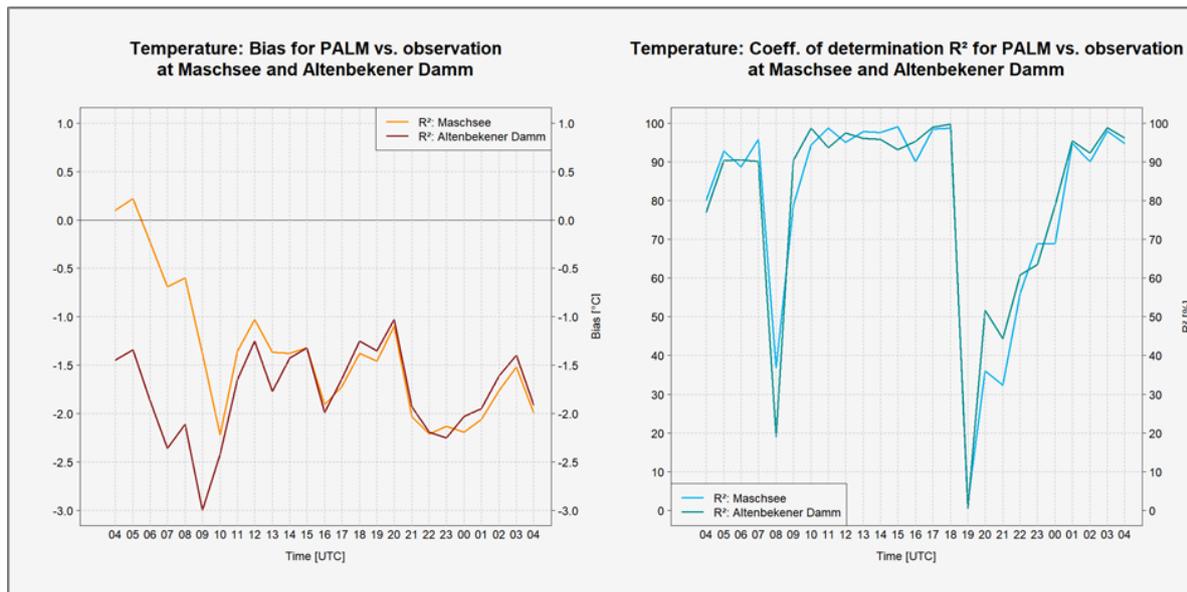


Abb. 3.1.37: Bias (links) und  $R^2$  (rechts) der Temperatur für Modell und Beobachtung im Tagesgang. Der betrachtete Zeitraum umfasst den 06.08.2020 04:00 UTC bis 07.08.2020 04:00 UTC für die Standorte Maschsee und Altenbekener Damm in Hannover. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).

Für den Vergleich von Mess- und Modelldaten einer eigenen, dritten Validierungsperiode vom 06.08.2020 04:00 UTC bis 07.08.2020 04:00 UTC in Hannover wurden aus den dreidimensionalen Daten des Modelloutputs über die Koordinaten der Stationsstandorte (E\_UTM, N\_UTM) die passenden Gitterzellen auf 2.5 m und 7.5 m Höhe ausgeschnitten und auf das Messniveau von 4 m interpoliert. Zusätzlich fand eine zeitliche Interpolation (time und ntime) auf die 10-minütigen Messintervalle statt.

Die Auswertungen zur Evaluierung von PALM-4U mit den Messdaten aus dem Sommer 2020 am Maschsee zeigten im Tagesverlauf gute Übereinstimmungen der an fünf Wetterstationen gemessenen Temperatur und der modellierten Temperatur (Abb. 3.1.38). Am Tage zeigt sich, dass mit steigender Entfernung vom Maschsee in die Bebauung der Südstadt hinein („Übergang Wasser – Stadt“) die Temperaturen größtenteils ansteigen. Nachts ist ein ähnlicher Effekt auszumachen, wobei die Sonderstellung der Station am Maschsee ersichtlich wird. Wasser verhält sich durch seine geringe Wärmeleitfähigkeit und seine hohe spezifische Wärmekapazität sehr träge und kühlt in der Nacht weniger stark aus als andere Materialien, wodurch es sich sowohl in der Messung als auch im Modell ähnlich warm zeigt, wie die weit im Siedlungsraum befindliche „Station 400“. Der abendliche Peak im Kurvenverlauf der Messung der gewässernahen „Station 000“ hängt mit dem versiegelten Umfeld der Station zusammen. Dieser Temperaturanstieg ist im passenden Graphen der Modellierung ebenfalls zu erahnen, wenn auch deutlich weniger stark ausgeprägt als in der Messung, bei einer

Differenz von mehr als 3.5 K zwischen Modell und Messung. Es wird ersichtlich, dass das Modell die Messung in allen Tagstunden zwischen 06:00 und 20:00 UTC unterschätzt und in den Nachtstunden teils ähnliche Wertebereiche getroffen werden, teils eine Überschätzung der Messung auftritt. Die tagsüber zu kühl modellierten Werte stehen wie bereits bei den Validierungsepisoden in Berlin und Stuttgart mit dem dynamischen Treiber aus COSMO-Daten in Verbindung, der auch in der Hannoverschen Modellsimulation Verwendung fand.

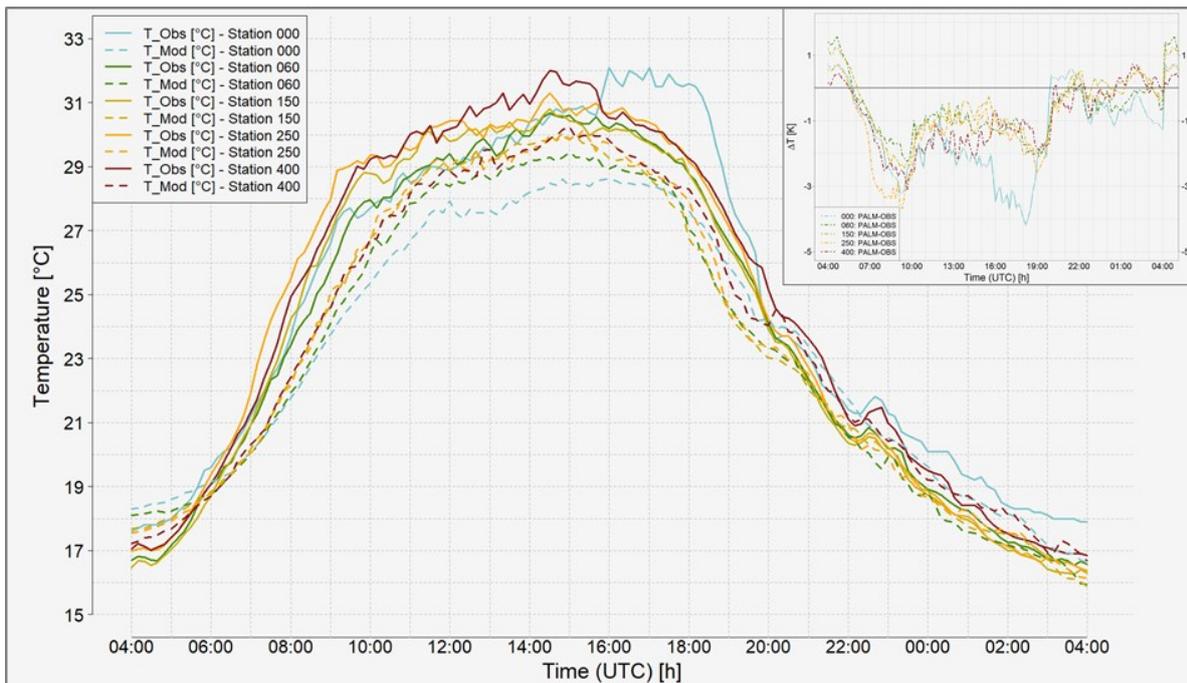


Abb. 3.1.38: Vergleich der 10-Minuten-Mittelwerte von modellierter („PALM“) und gemessener („OBS“) Temperatur für den Standort Hannover, Südstadt für fünf temporär installierte Klimamessstationen vom 06.08.2020 04:00 UTC bis 07.08.2020 04:00 UTC. Rechts oben ist die Temperaturdifferenz von Modell (PALM) und Beobachtung (OBS) im Tagesgang aufgetragen. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).

Abb. 3.1.39 zeigt ein Streudiagramm der 10-Minutenmittelwerte der gemessenen Temperatur aller Stationen (OBS) gegen jene der modellierten Temperatur (PALM). Hierbei zeigt sich erneut, dass das Modell die Messung oberhalb von Temperaturwerten von ca. 18.7 °C größtenteils unterschätzt, unterhalb dieses Schwellwertes dagegen zumeist eine Überschätzung der Messung stattfindet. Neben einem mittleren Bias von 0.95 K bescheinigt das hohe Bestimmtheitsmaß von 97.3 % die große Korrelation zwischen Modell und Messung für den untersuchten Fall.

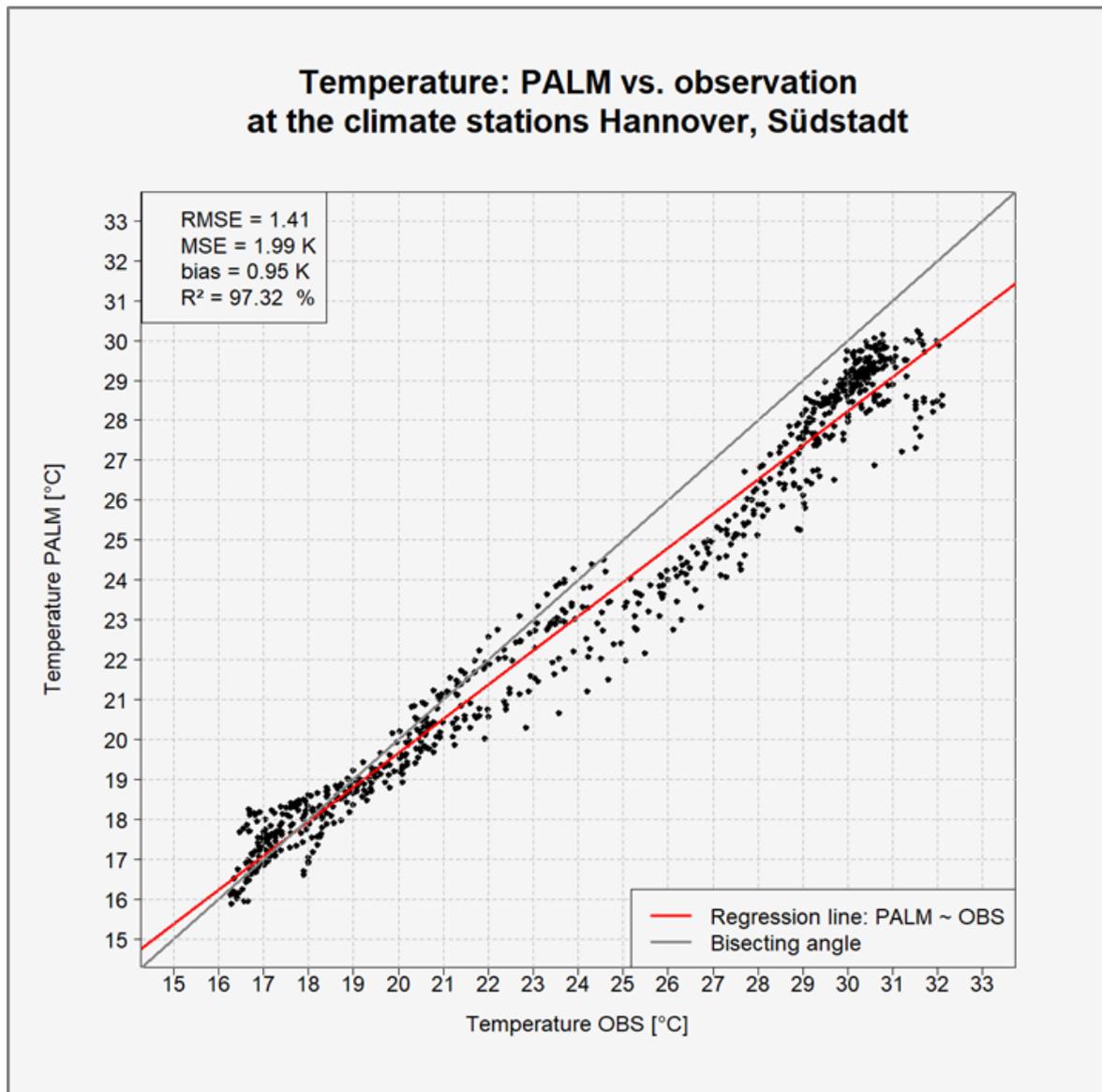


Abb. 3.1.39: Vergleich der 10-Minuten-Mittelwerte von modellierter (PALM) und gemessener (OBS (Klimamessstationen)) Temperatur für den Standort Hannover, für fünf temporär installierte Klimamessstationen vom 06.08.2020 04:00 UTC bis 07.08.2020 04:00 UTC. Gütemaße: RMSE=root mean square error, MSE=mean squared error, bias=Abweichung der Mittelwerte, R<sup>2</sup>=Bestimmtheitsmaß. Rot: Regressionsgerade PALM-OBS, grau: Winkelhalbierende. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).

## Luftfeuchte Berlin

### Winterlauf VALM01 bzw- VALM01v2

Für die Betrachtung der Genauigkeit des Modells bei der spezifischen Feuchte wurden alle Stationen in der Parent Domain betrachtet (Abb. 3.1.40). Tagsüber lagen die Modellwerte tendenziell unter den gemessenen Werten. Hier deutet sich eine systematische Unterschätzung der Tages-werte durch das Modell an. Nachts zeigten die Feuchtwerte des

Modells eine bessere Übereinstimmung mit den Messwerten. Insgesamt liegen die Modellwerte enger beieinander als die Messwerte und zeigen eine größere Amplitude im Tagesgang.

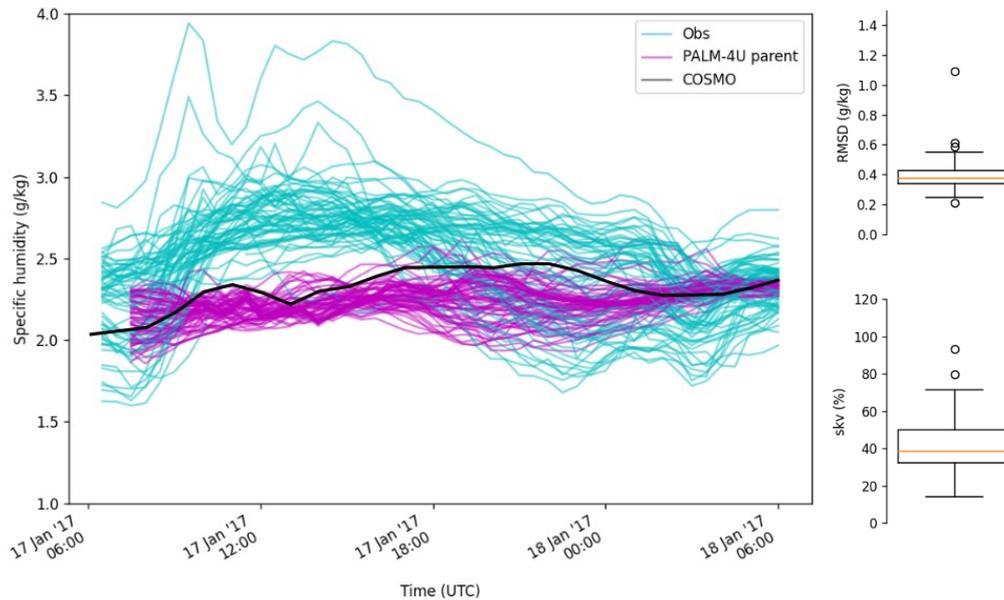


Abb. 3.1.40: Vergleich des modellierten (PALM-4U parent) und gemessenen (Obs) Verlaufs der spezifischen Feuchte für die Messstationen in der Berliner Parent Domäne während des Winterlaufs. Zusätzlich wird der COSMO-Antrieb für die spezifische Feuchte während der Modellaufzeit dargestellt. Es wurden pro Zeitschritt die Antriebe der vier Seiten der untersten Ebene des Modells gemittelt. Gütemaße (Medianwerte): RMSD: 0.38 g/kg,  $r_{\text{pears}}$ : -0.09, skv: 38.31 %, MD: -0.30 g/kg. Quelle: TUBklima.

Die Modelldaten von PALM-4U in der Parent Domain zeigen im Gegensatz zu den gemessenen spezifischen Feuchtwerten keinen Tagesgang und eine wesentlich geringere Variation. Nach den Messungen steigen die Werte der spezifischen Feuchte tagsüber deutlich an, um dann zum Abend hin wieder abzusinken. Die Modelldaten verlaufen hingegen weitgehend konstant.

Bei der Betrachtung des COSMO-Antriebs für die spezifische Feuchte ist zu erkennen, dass PALM-4U hier stark den Antriebsdaten folgt, die auch keinen Tagesgang erkennen lassen (Abb. 3.1.40).

Bei der Analyse der spezifischen Feuchte zeigt sich bei der erhöhten Auflösung in der Child Domain (s. Abb. 3.1.41) keine deutliche Verbesserung der Modelldaten. Die Medianwerte unterscheiden sich kaum zwischen der Child Domain und den Parent-Stationen, die sich innerhalb der Child Domain befinden.

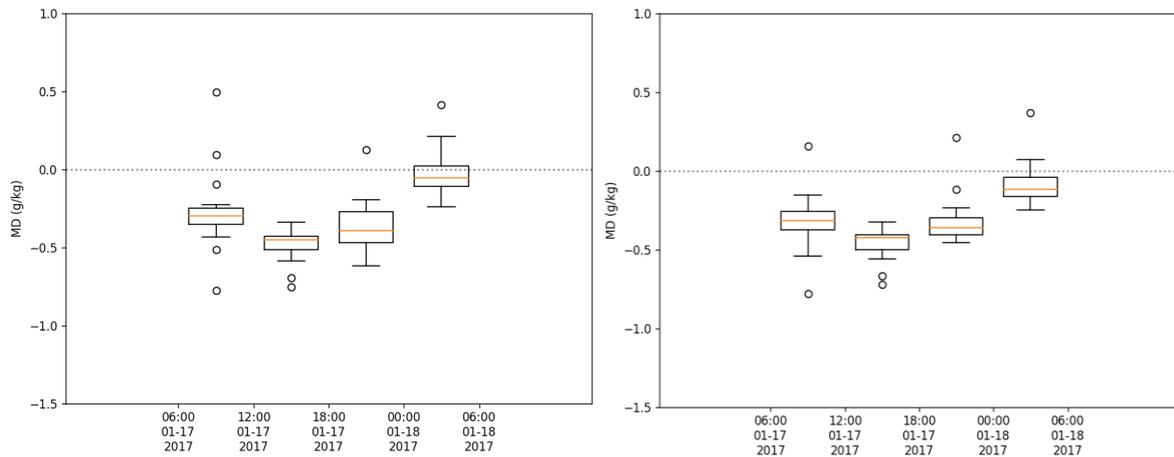


Abb. 3.1.41: Vergleich der Mean Deviation zwischen der modellierten und gemessenen spezifischen Feuchte in Sechs-Stunden-Zeiträumen während VALM01/VALR01. Links die Daten der Child Do-main Stationen, rechts die der Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Quelle: TUBklima.

Die Werte der statistischen Gütemaße verändern sich in den mit der höheren Modellauflösung gerechneten Child Domains kaum. Nur die Skillvarianz weist einen deutlich besseren Wert auf.

Tab. 3.1.3: Die Werte der statistischen Gütemaße, aggregiert über den gesamten Validierungszeit-raum, jeweils die Medianwerte. Child: Stationen in den Child Domains. ParentC: Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Quelle: TUBklima.

Gütemaß	Child	ParentC
RSMD (Root Mean Square Deviation)	0.37 g/kg	0.36 g/kg
r-pears (Pearson-Korrelationskoeffizient)	-0.23	0.20
skv (Skillvarianz)	90.68 %	43.72 %
MD (Mean Deviation)	-0.30 g/kg	0.30 g/kg

PALM-4U zeigt in der spezifischen Feuchte eine systematische Unterschätzung. Trotzdem ist das Modell in der Lage, den Tagesgang wie die Beobachtungen grob zu reproduzieren (Abb. 3.1.42).

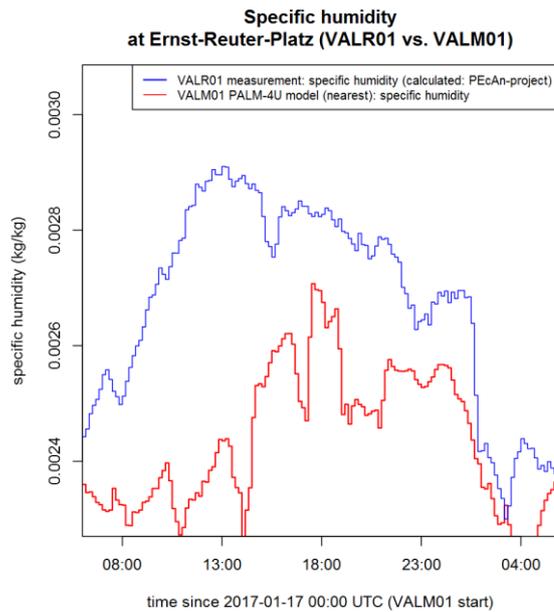


Abb. 3.1.42: 10-Minuten-Mittelwerte der aus den Beobachtungen berechneten spezifischen Luftfeuchte (blau) und die simulierte spezifische Luftfeuchte (rot) während des VALM01-Simulationszeitraums (17.01.2017 06:00 UTC bis 18.01.2017 06:00 UTC). Quelle: HUBgeo.

Ebenso wird die Tagesamplitude in etwa korrekt wiedergegeben. Die Modellwerte unterschätzen die Beobachtungen bis zum Nachmittag. Gegen 13:00 UTC tritt im Modell (Abb. 3.1.43, rote Linie) durchweg ein starker, kurzfristiger Rückgang der spezifischen Feuchte auf, der in der Realität nicht zu beobachten ist. Bei der qq-Verteilung zeigt sich, dass Modell und Beobachtung im Bereich der niedrigsten und höchsten Werte in einer guten Übereinstimmung sind. Im mittleren Messbereich ( $0.0024 \text{ kg kg}^{-1}$ ) ist, verglichen zur Beobachtung, die spezifische Feuchte des Modells eher zu gering.

17.01.2017 (06 bis 06 UTC)

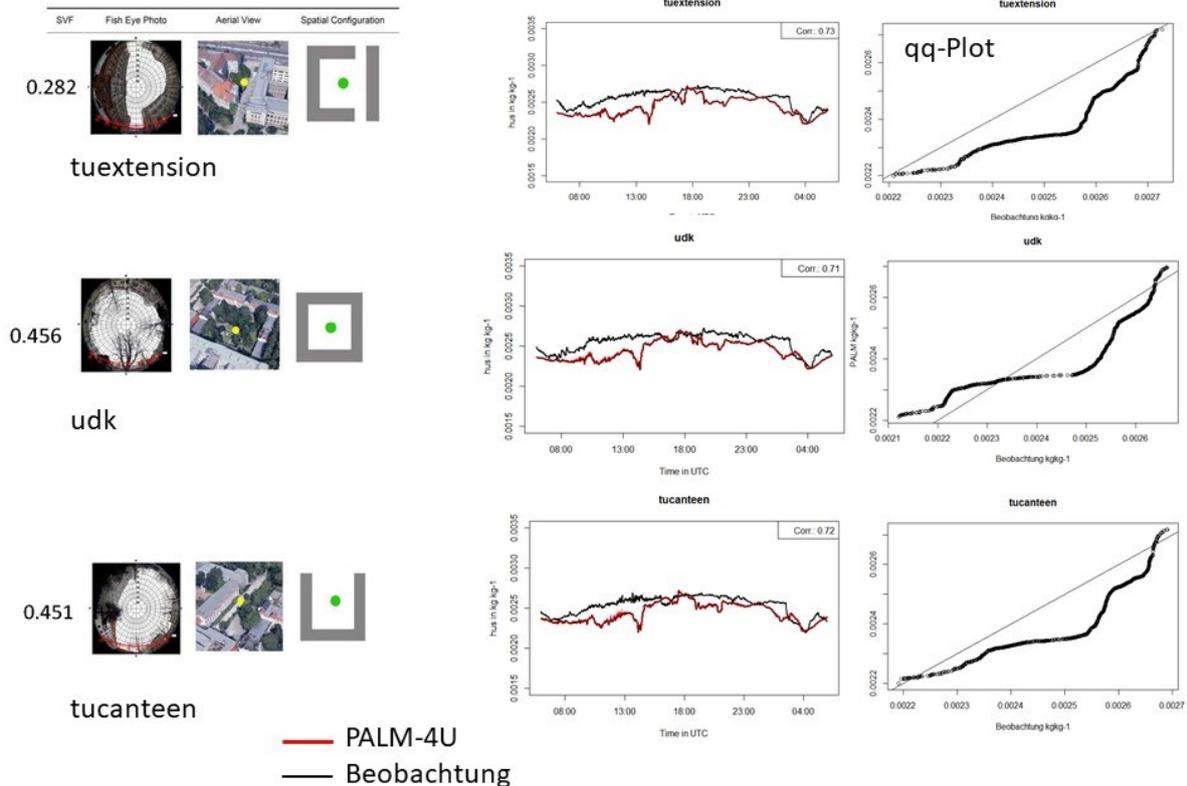


Abb. 3.1.43: Vergleich der 2 m spezifischen Feuchte (VALR01) in der Child-1-Domain mit den Modellergebnissen (VALM01) vom 17.01.2017 um den Ernst-Reuter-Platz. Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).

Beim Mischungsverhältnis weist das Modell meist niedrigere Werte als die Messung auf. Die größten Abweichungen im Wertebereich treten am Tag auf, nachts sind die Werte von PALM-4U und den Messflügen ähnlicher, wie auch im Beispiel in Abb. 3.1.44 zu erkennen ist. Insgesamt passt der Verlauf der Profile zu einigen Uhrzeiten gut zusammen, insbesondere vormittags und abends. Es gibt jedoch auch Uhrzeiten, zu denen die Profile zumindest in einzelnen Höhenabschnitten gegensätzlich verlaufen.

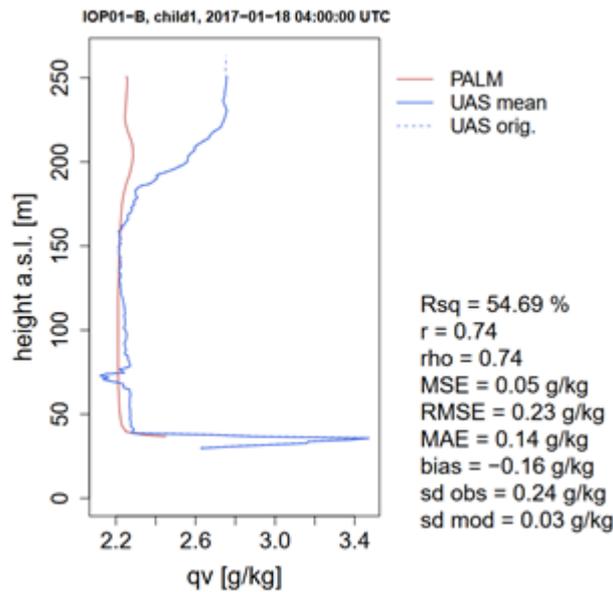


Abb. 3.1.44: Beispiele am Standort Gutschmuths für den Vergleich von Vertikalprofilen der potenziellen Temperatur (links) und des Mischungsverhältnisses (rechts), jeweils am 18.01.2017 um 4:00 UTC, VALM01v1/VALR01. Gütemaße:  $Rsq$ =erklärte Varianz,  $r$ =Korrelationskoeffizient nach Pearson,  $\rho$ = Korrelationskoeffizient nach Spearman,  $MSE$ =mean square error,  $RMSE$ =root mean square error,  $MAE$ =mean absolute error,  $bias$ =Abweichung der Mittelwerte,  $sd\ obs$ =Standardabweichung der Beobachtung,  $sd\ mod$ = Standardabweichung des Modells. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo).

### Sommerlauf VALM02 bzw- VALM02v2

Für die Betrachtung der Genauigkeit des Modells bei der spezifischen Feuchte wurden alle Stationen in der Parent Domain betrachtet (Abb. 3.1.45). Tagsüber lagen die Modellwerte tendenziell unter den gemessenen Werten. Hier deutet sich eine systematische Unterschätzung der Tages-werte durch das Modell an. Nachts zeigten die Feuchtwerte des Modells eine bessere Überein-stimmung mit den Messwerten. Insgesamt liegen die Modellwerte enger beieinander als die Mess-werte und zeigen eine größere Amplitude im Tagesgang.

Auch hier folgt PALM-4U dem Verlauf des COSMO-Antriebs, der die gemessene spezifische Feuchte unterschätzt (Abb. 3.1.45).

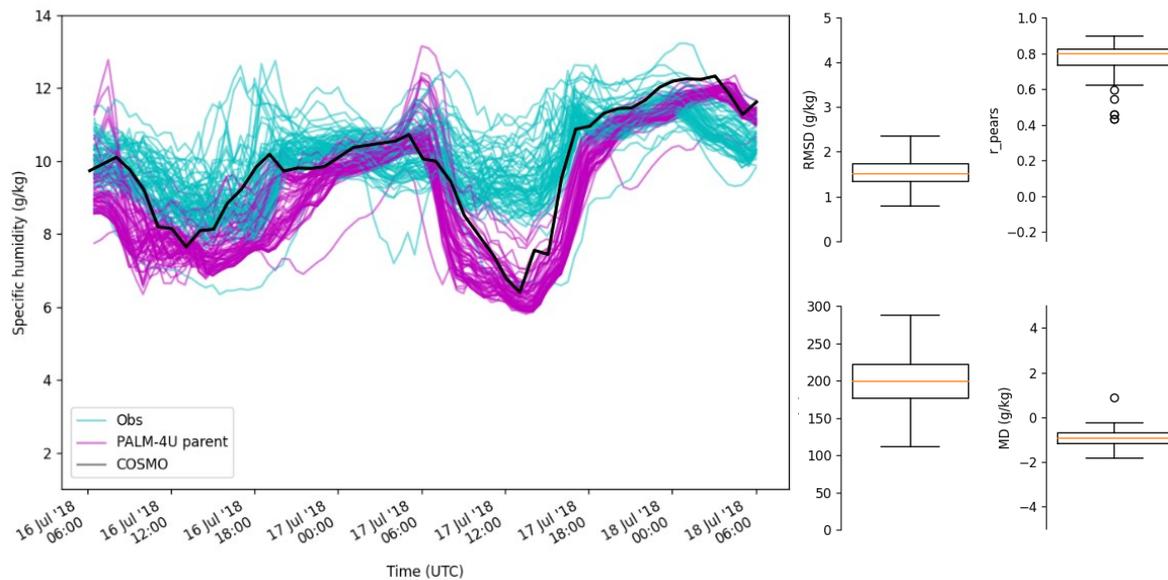


Abb. 3.1.45: Vergleich des modellierten (PALM-4U parent) und gemessenen (Obs) Verlaufs der spezifischen Feuchte für die Messstationen in der Berliner Parent Domain während des Sommer-laufs. Zusätzlich wird der COSMO-Antrieb für die spezifische Feuchte während der Modellaufzeit dargestellt. Es wurden pro Zeitschritt die Antriebe der vier Seiten der untersten Ebene des Modells gemittelt. Gütemaße (Medianwerte): RMSD: 1.51 g/kg,  $r_{\text{pears}}$ : 0.80, skv: 199.54 %, MD: -0.94 g/kg. Quelle: TUBklima.

Wie bei der Betrachtung der Temperaturen zeigt sich bei der spezifischen Feuchte keine eindeutige Verbesserung der Modelldaten bei der erhöhten Auflösung in der Child Domain (Abb. 3.1.46, links). Die Medianwerte weichen zwischen Child Domain und Parent-Stationen, die in der Child Domain liegen, kaum ab. Allerdings ist die Spannweite der Daten und der Interquartilsabstand in den Boxplots der Child Domain geringer.

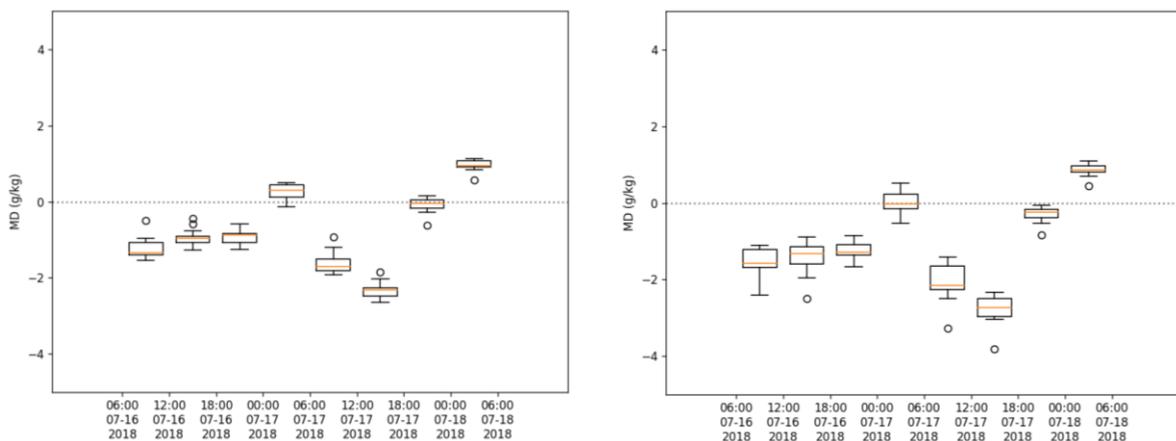


Abb. 3.1.46: Vergleich der Mean Deviation zwischen der modellierten und gemessenen spezifischen Feuchte in Sechs-Stunden-Zeiträumen während VAL02. Links die Daten der Child Do-main Stationen, rechts die der Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Quelle: TUBklima.

Die Werte aller statistischen Gütemaße verbessern sich in den mit der höheren Modellauflösung gerechneten Child Domains.

Tab. 3.1.4: Die Werte der statistischen Gütemaße, aggregiert über den gesamten Validierungszeit-raum, jeweils die Medianwerte. Child: Stationen in den Child Domains. ParentC: Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Quelle: TUBklima.

<b>Gütemaß</b>	<b>Child</b>	<b>ParentC</b>
<b>RSMD</b> (Root Mean Square Deviation)	1.37 g/kg	1.62 g/kg
<b>r-pears</b> (Pearson-Korrelationskoeffizient)	-0.81	0.80
<b>skv</b> (Skillvarianz)	208.80 %	216.91 %
<b>MD</b> (Mean Deviation)	-0.73 g/kg	-1.05 g/kg

In Abb. 3.1.47 ist der Vergleich von modellierter und gemessener spezifischer Feuchte für alle Aufstiegsstunden der Radiosonden von VALM02/VALR02 im Sommer 2018 in Berlin aufgetragen.

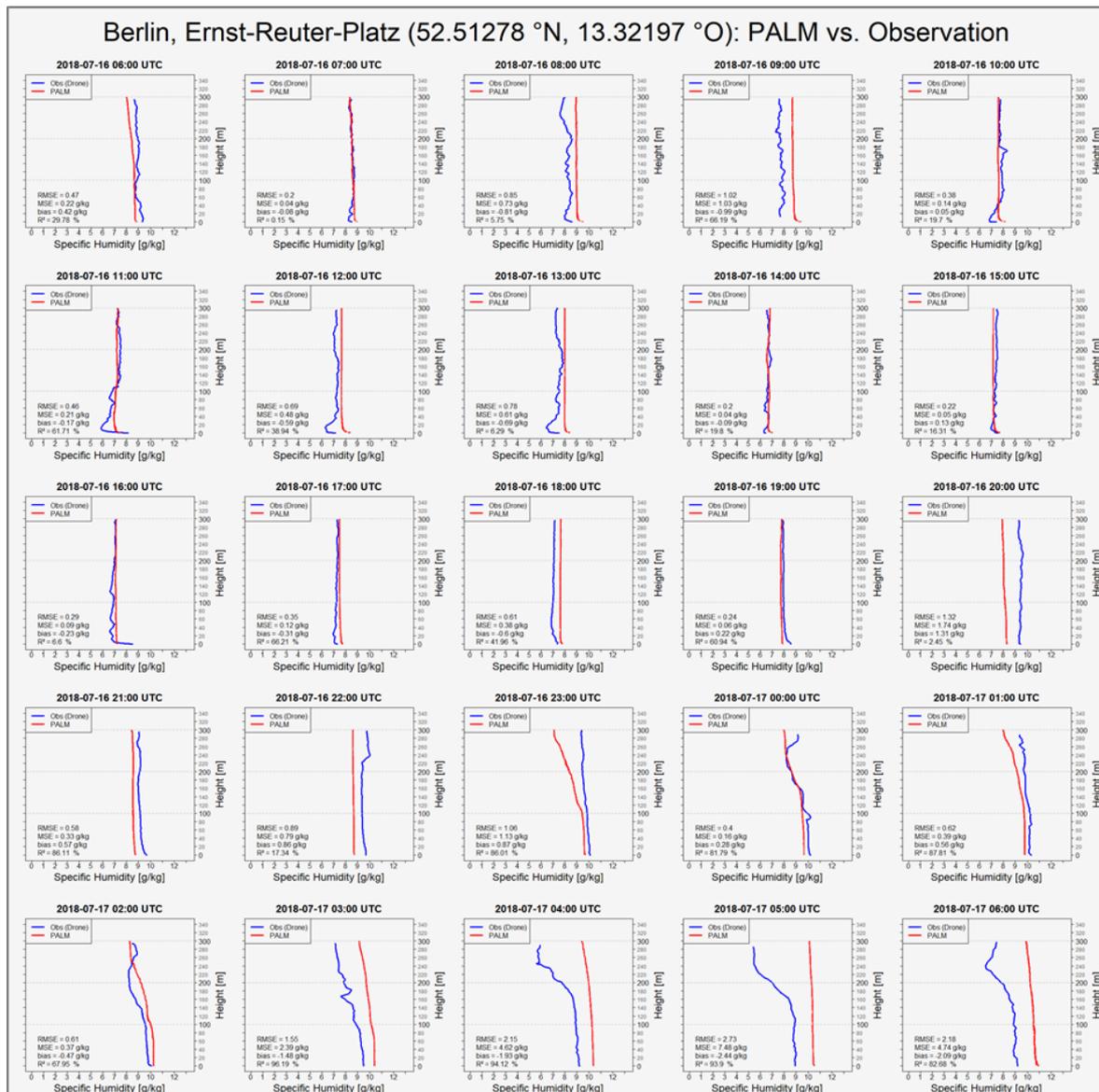


Abb. 3.1.47: Stündlicher Vergleich der Vertikalprofile von modellierter (PALM) und gemessener (OBS (Drohne)) spezifischer Feuchte für den Standort Berlin, Ernst-Reuter-Platz (tuerpl) vom 16.07.2018 06:00 UTC bis 17.07.2018 06:00 UTC. Gütemaße: RMSE=root mean square error, MSE=mean squared error, bias=Abweichung der Mittelwerte, R<sup>2</sup>=Bestimmtheitsmaß. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).

Insgesamt ähneln sich die Modell- und Messkurven optisch zu nahezu allen Zeiten sehr stark, wengleich diese Erkenntnis aufgrund des nahezu senkrechten Verlaufs beider Graphen nicht immer durch das Bestimmtheitsmaß bestätigt werden kann (vgl. Abb. 3.1.48, rechts). Übereinstimmungen mit Bestimmtheitsmaßen größer 80 % betreffen vor allem die Nachtstunden.

Die größten Abweichungen zwischen Modell und Messung sind in den Morgenstunden des 17.07.2018 ab 04:00 UTC zu beobachten, in denen ein ab einer Höhe von ca. 150 m auftretender Feuchteinbruch um ca. 3 g/kg nicht vom Modell wiedergegeben wurde. Im

Mittel überschätzt das Modell die Messung zu diesen Zeiten um 1.5 bis 2.5 g/kg. Weitere geringere Überschätzungen der spezifischen Feuchte bis 1 g/kg werden darüber hinaus in den Tagstunden registriert, während der Parameter in der ersten Nachthälfte durchgängig geringfügig unterschätzt wird, bei einem Maximum von knapp 1.3 g/kg (Abb. 3.1.48, links). Eine Erklärung hierfür liegt im dynamischen Antrieb, der in der ersten Nachthälfte noch trockenere, in der zweiten Nachthälfte feuchtere Werte vorgab.

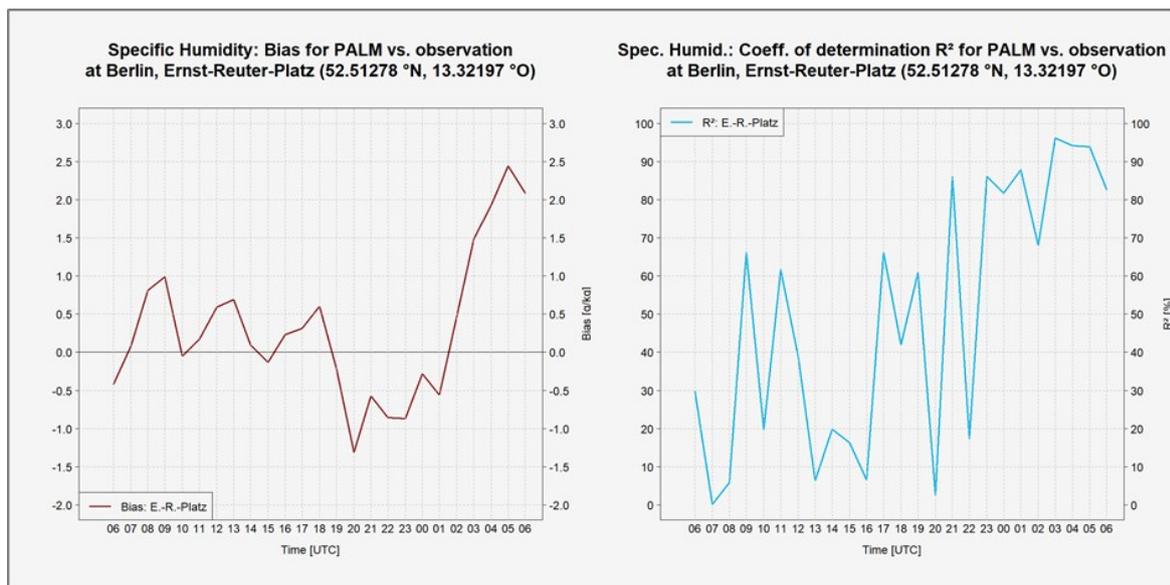


Abb. 3.1.48: Bias (links) und  $R^2$  (rechts) der Spezifischen Feuchte für Modell und Beobachtung im Tagesgang. Der betrachtete Zeitraum umfasst den 16.07.2018 06:00 UTC bis 17.07.2018 06:00 UTC für den Ernst-Reuter-Platz in Berlin. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).

Abb. 3.1.49 zeigt die beobachtete und simulierte relative Luftfeuchte in 2 m Höhe am Klimagarten der HU in Berlin-Adlershof. Auch hier wird die beobachtete tägliche Variation von PALM-4U erfasst. Im Vergleich zu VALM01 liegt die mit PALM simulierte relative Luftfeuchtigkeit unterhalb von 100 %. Allerdings überschätzt PALM die relative Luftfeuchtigkeit in der Nacht um bis zu 20 %.

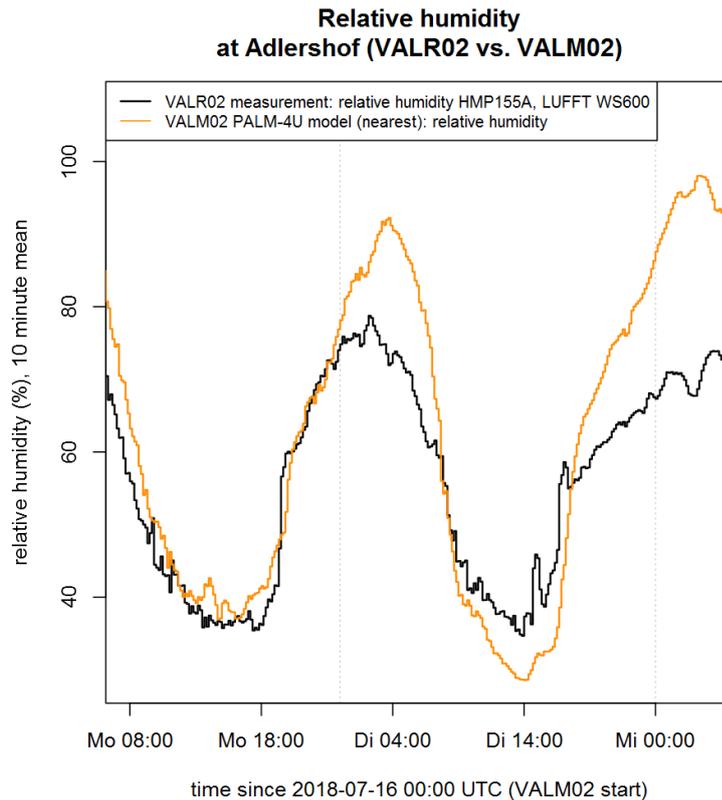


Abb. 3.1.49: 10-Minuten-Mittelwert der beobachteten (schwarz) und simulierte Luftfeuchtigkeit (orange) während der VAL02-Simulationsperiode (16.07.2018 06:00 UTC bis 18.07.2018 06:00 UTC). Quelle: HUBgeo.

Beim Mischungsverhältnis zeigen sich auch in der Sommersimulation (VALM02v1) im allgemeinen niedrigere Werte im Modell verglichen mit der Messung. An den Standorten Tempelhofer Feld und Gutmuths ist PALM-4U nachts hingegen feuchter als die Messung. Die mittleren Abweichungen betragen zwischen 2.0 g/kg und -2.5 g/kg. Diese stammen teilweise aus dem dynamischen Antrieb, der trockenere Werte in der ersten Nachthälfte und feuchtere Werte in der zweiten Nachthälfte aufweist. Auch beim Mischungsverhältnis gibt es teils sehr gute Übereinstimmungen beim Verlauf der Profile mit Korrelationen von über 0.75 (Abb. 3.1.50).

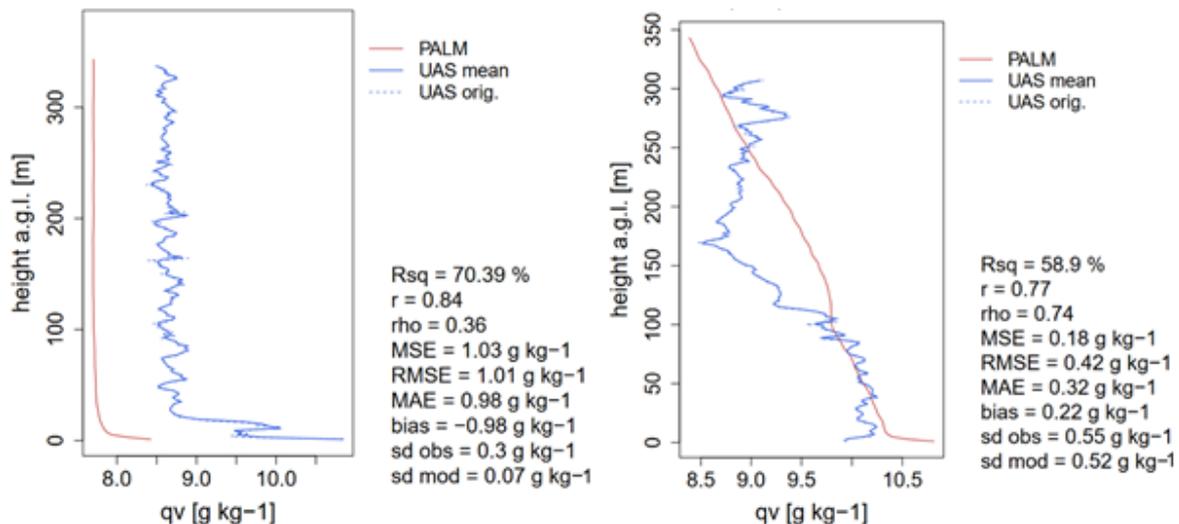


Abb. 3.1.50: Beispiele für Vertikalprofile des Mischungsverhältnisses am Standort Gutmuths um 12 Uhr (links) und 2 Uhr (rechts), VALM02v1/VALR02. (Rsq=erklärte Varianz, r=Pearson Korrelationskoeffizient, rho=Spearman Korrelationskoeffizient, MSE=mean square error, RMSE=root mean square error, MAE=mean absolute error, sd=Standardabweichung). Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo).

## Lufffeuchte Stuttgart

### VALM04

Abb. 3.1.51 zeigt eine Gegenüberstellung von modellierter und gemessener spezifischer Feuchte aller Aufstiegsstunden der Evaluierungsperiode VALM04/VALR04 im Sommer 2018 in Stuttgart. Erneut ist eine große optische Übereinstimmung beider Graphen auszumachen, die abermals aus statistischen Gründen infolge der senkrechten Verläufe nur bedingt durch  $R^2$  abgebildet werden kann (vgl. Abb. 3.1.52, rechts). Bestimmtheitsmaße über 80 % werden nur zu 23:00 und 01:00 UTC erreicht.

Zu den meisten Zeiten im betrachteten Zeitraum (06:00 bis 22:00 UTC) überschätzt das Modell die Messung geringfügig; im Maximum um 1.5 g/kg um 07:00 UTC (Abb. 3.1.52, links). In der Nacht, insbesondere der zweiten Nachthälfte, wird die spezifische Feuchte modellseitig bis knapp 1 g/kg gegen 03:00 bis 04:00 UTC unterschätzt.

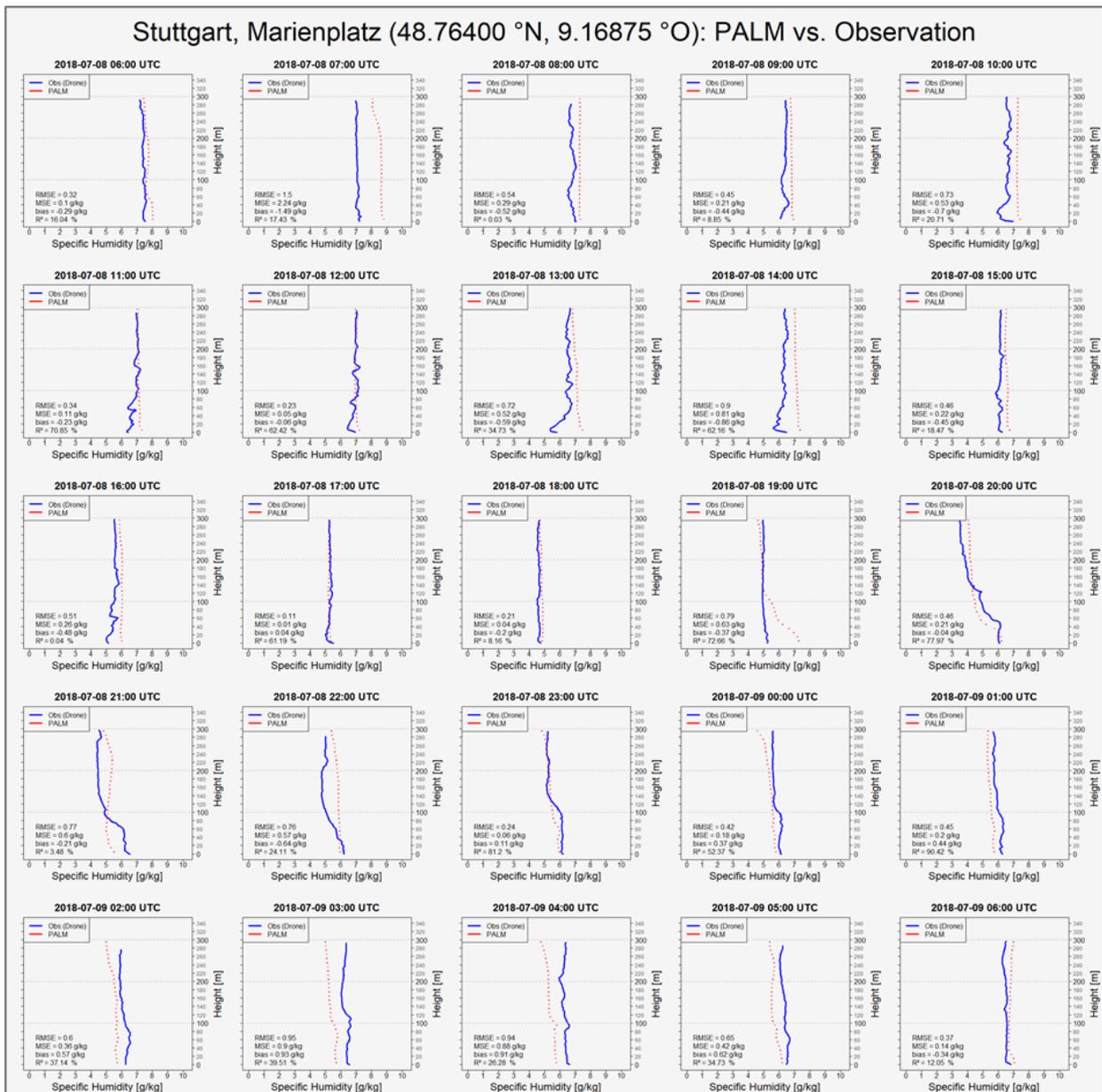


Abb. 3.1.51: Stündlicher Vergleich der Vertikalprofile von modellierter (PALM) und gemessener (OBS (Drohne)) spezifischer Luftfeuchte für den Standort Stuttgart, Marienplatz (marienpl) vom 08.07.2018 06:00 UTC bis 09.07.2018 06:00 UTC. Gütemaße: RMSE=root mean square error, MSE=mean squared error, bias=Abweichung der Mittelwerte, R<sup>2</sup>=Bestimmtheitsmaß. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).

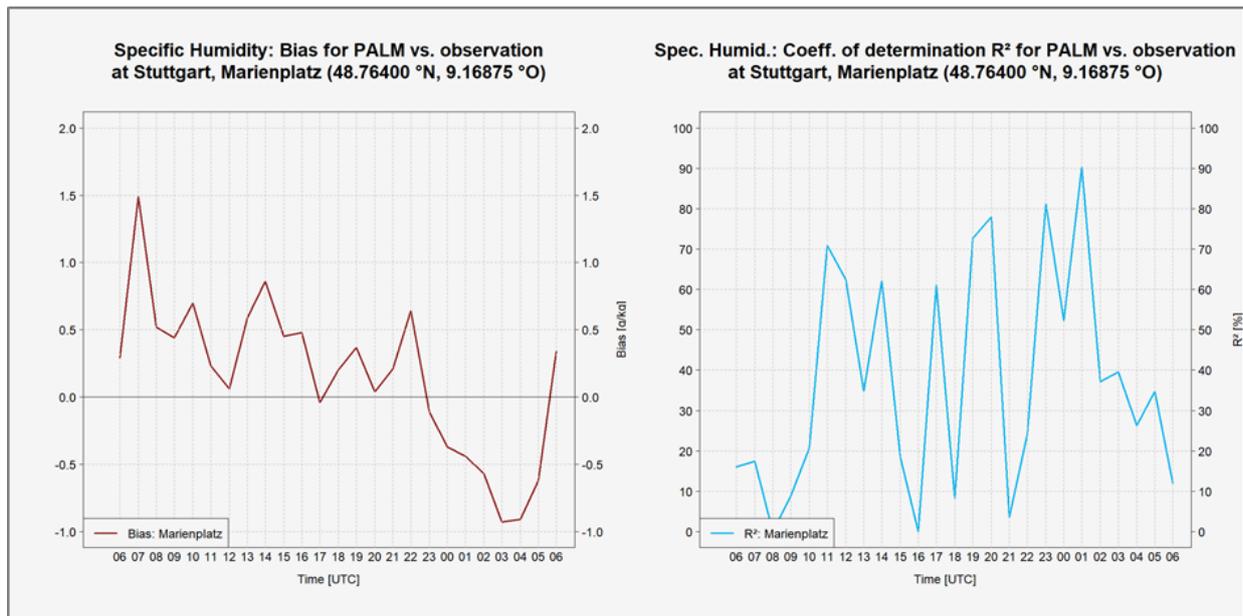


Abb. 3.1.52: Bias (links) und  $R^2$  (rechts) der Spezifischen Feuchte für Modell und Beobachtung im Tagesgang. Der betrachtete Zeitraum umfasst den 08.07.2018 06:00 UTC bis 09.07.2018 06:00 UTC für den Marienplatz in Stuttgart. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).

In Abb. 3.1.53 wird der Vergleich zwischen Simulation und Messergebnissen der relativen Luftfeuchtigkeit an der Messstation Bad Cannstatt dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die beobachteten und simulierten Ergebnisse (sowohl der Parent- als auch der Child1-Domäne) zu Beginn der Simulation gut übereinstimmen. Ab Mitternacht weichen die Werte voneinander ab. Die beobachteten Werte der relativen Luftfeuchtigkeit liegen etwa 10 % bzw. 20 % über denen der Parent- bzw. Child1-Domäne. Am nächsten Morgen begann die beobachtete relative Luftfeuchtigkeit zu sinken, während es einige Zeit dauerte, bis die relative Luftfeuchtigkeit in beiden Domänen abnahm, aber am Ende zeigten die Ergebnisse eine gute Korrelation miteinander.

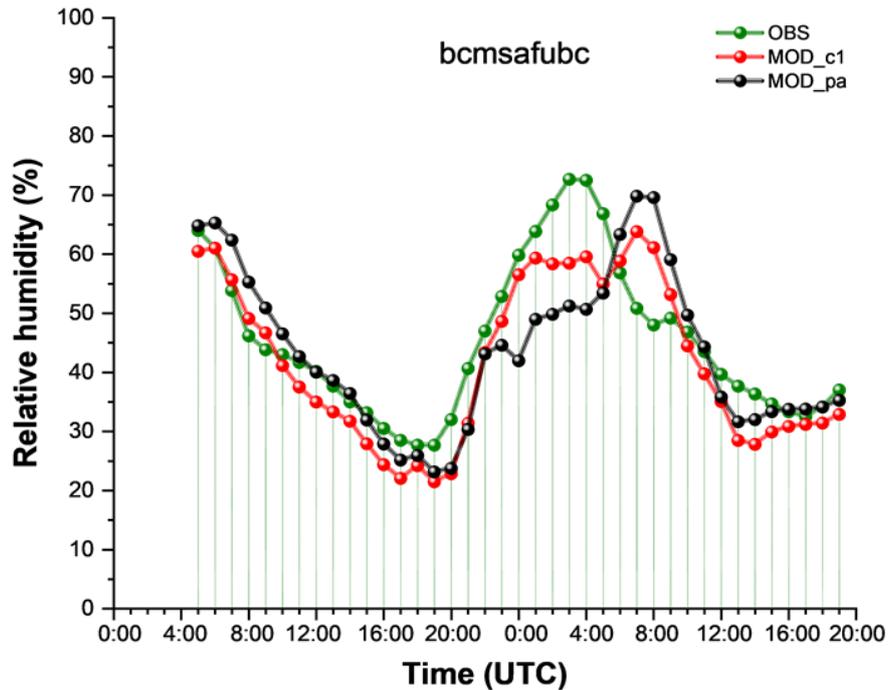


Abb. 3.1.53: Vergleich der relativen Luftfeuchtigkeit der Simulationsergebnisse (VALM04) und der stationären Messungen in Bad Cannstatt, Stuttgart.

### 3.2. Wind

In diesem Kapitel werden Messungen der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung betrachtet und mit den Modellläufen von PALM-4U verglichen.

#### Berlin

##### Winterlauf VALM01 bzw- VALM01v2

Für den Winterlauf stehen Vertikalprofile bis 300 m zur Verfügung.

Um die Genauigkeit des Modells bei der Windgeschwindigkeit zu überprüfen, wurde die Mean Deviation über alle Stationen (siehe [UC]<sup>2</sup> Evaluierungsbericht Teil 1, Abb. 3.3.1, 3.3.2 und 3.3.3) in der Parent Domain betrachtet (Abb. 3.2.1). Die Mediane aller Sechs-Stunden-Zeiträume sind kleiner als null. Das Modell weist damit eine systematische Unterschätzung der Windgeschwindigkeit auf. Die Streuung der Werte ist mit bis 1.5 m/s recht niedrig; auch die tatsächlichen Abweichungen der Medianwerte mit deutlich unter 0.5 m/s sind recht niedrig.

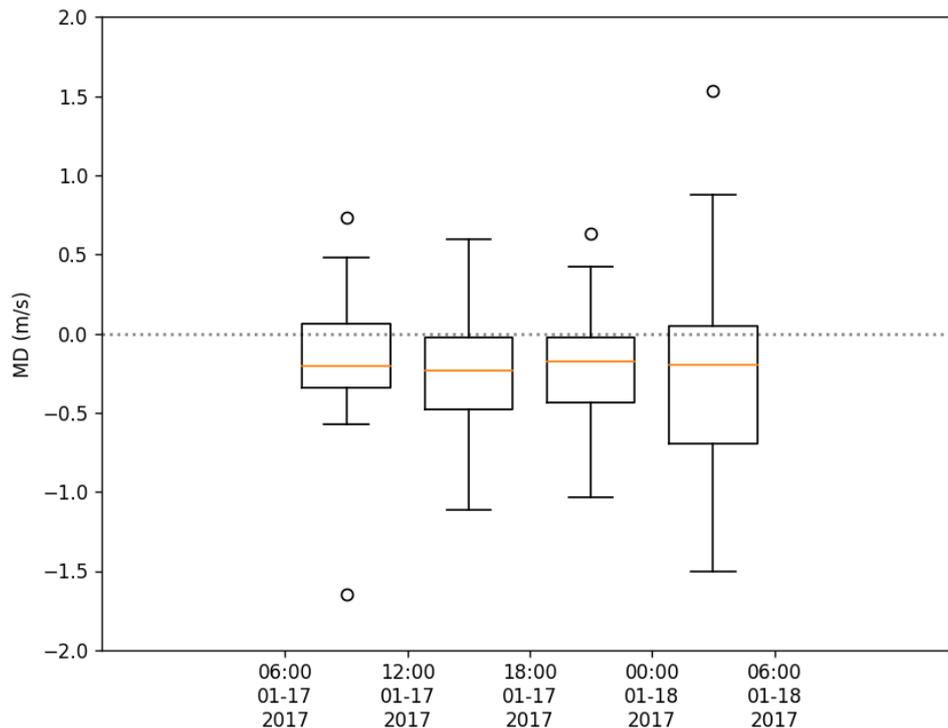


Abb. 3.2.1: Vergleich der modellierten (PALM-4U parent) und gemessenen (Obs) Windgeschwindigkeiten für die Messstationen in der Berliner Parent Domäne während des Winterlaufs. Quelle: TUBklima.

Die Boxplots für die Mean Deviation der Windgeschwindigkeit (Abb. 3.2.2) zeigen kaum Unterschiede zwischen der Child Domain und der Parent Domain. Lediglich die Streuung ist in der Child Domain in drei der vier Sechs-Stunden-Zeiträume geringer.

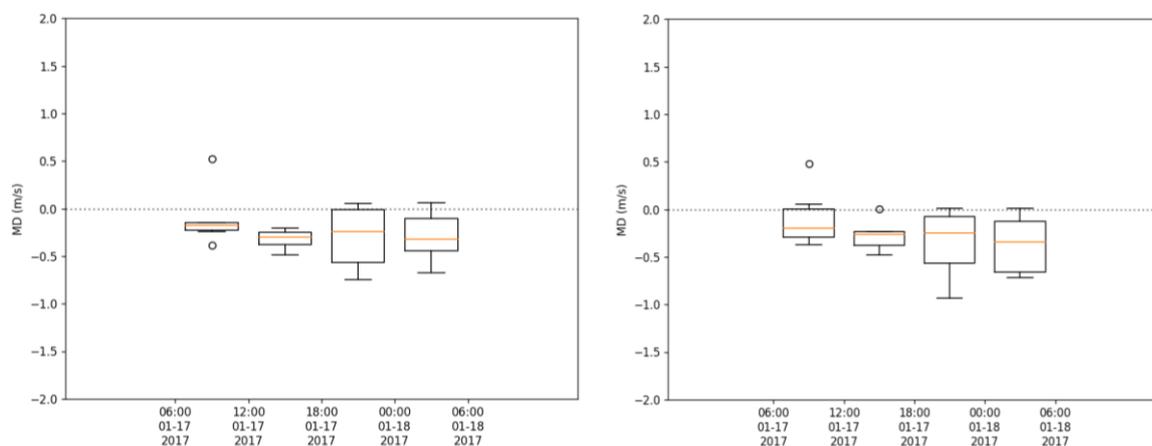


Abb. 3.2.2: Vergleich der Mean Deviation zwischen den modellierten und gemessenen Windgeschwindigkeiten in Sechs-Stunden-Zeiträumen während VALM01. Rechts die Daten der Parent Stationen, die in den Child Domains liegen, links die der Child Domain Stationen. Quelle: TUBklima.

Bis auf die Skillvarianz verbessern sich alle Gütemaße in den mit der höheren Modellauflösung gerechneten Child Domains. Die Differenz zwischen den Skillvarianzen ist jedoch nicht groß (s. Tab. 3.2.1).

Tab. 3.2.1: Die Werte der statistischen Gütemaße, aggregiert über den gesamten Validierungszeit-raum, jeweils die Medianwerte. ParentC: Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Child: Stationen in den Child Domains. Quelle: TUBklima.

Gütemaß	Child	ParentC
RSMD (Root Mean Square Deviation)	0.48 m/s	0.52 m/s
r-pears (Pearson-Korrelationskoeffizient)	0.50	0.41
skv (Skillvarianz)	81.70 %	94.41 %
MD (Mean Deviation)	-0.22 m/s	-0.29 m/s

Für die Betrachtung der Genauigkeit des Modells bei der Windrichtung wurden alle Stationen in der Parent Domain betrachtet (Abb. 3.2.3). Die Streuung der Werte ist in den meisten Sechs-Stunden-Zeiträumen recht groß, die maximale Abweichung der Mediane liegt im Bereich von nur +13°/-10°.

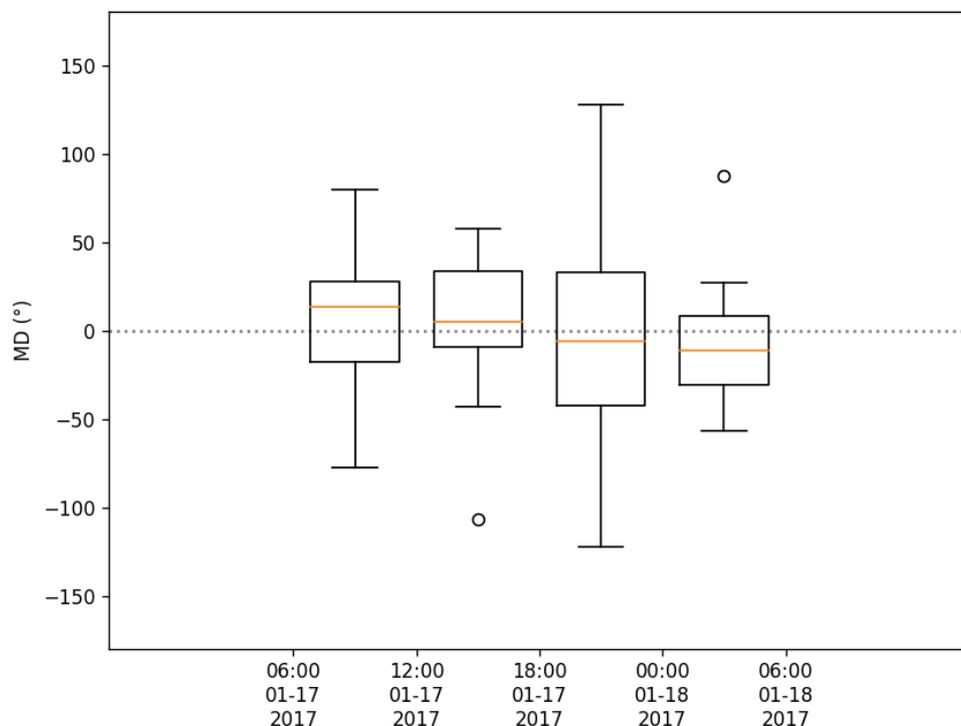


Abb. 3.2.3: Vergleich des modellierten (PALM-4U parent) und gemessenen (Obs) Verlaufs der Wind-richtung für die Messstationen in der Berliner Parent Domäne während des Winterlaufs. Quelle: TUBklima.

Die Modelldaten mit der höheren Auflösung in den Child Domains (links in Abb. 3.2.4) zeigen keine eindeutige Verbesserung gegenüber den Daten der Station der Parent Domain, die in den Child Domains liegen.

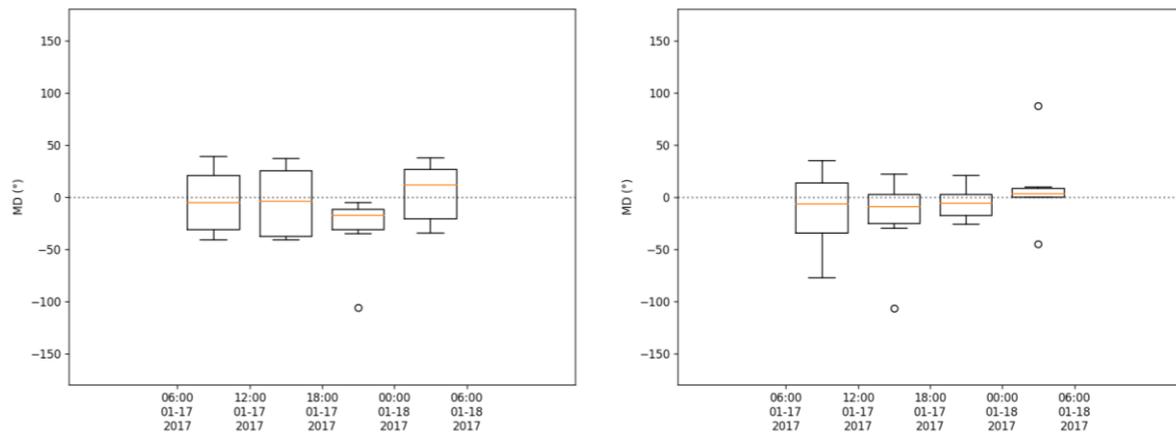


Abb. 3.2.4: Vergleich der Mean Deviation zwischen der modellierten und gemessenen Windrichtungen in Sechsstunden-Zeiträumen während VALM02. Links die Daten der Parent Stationen, die in den Child Domains liegen, rechts die der Child Domain Stationen.

Alle Gütemaße zeigen in den mit der höheren Modellauflösung gerechneten Child Domains keine signifikanten Verbesserungen (s. Tab. 3.2.2):

Tab. 3.2.2: Die Werte der statistischen Gütemaße, aggregiert über den gesamten Validierungszeit-raum, jeweils die Medianwerte. ParentC: Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Child: Stationen in den Child Domains. Quelle: TUBklima.

Gütemaß	Child	ParentC
RSMD (Root Mean Square Deviation)	70.30°	76.57°
r-pears (Pearson-Korrelationskoeffizient)	0.13	0.17
skv (Skillvarianz)	140.66 %	126.82 %

An der Südfassade des Gebäudes der TU Mathematik in Berlin-Charlottenburg am ERP-Messstandort in einer Höhe von ca. 4 m über dem Boden wurden die Windparameter ebenfalls gemessen. Die Messung der Windgeschwindigkeit erfolgte mit einem LUFFT WS600 Sensor. Abb. 3.2.5 zeigt die beobachtete und simulierte Windgeschwindigkeit sowie die Windgeschwindigkeit der DWD-Station Berlin-Alexanderplatz. Die beobachtete und simulierte lokale Windgeschwindigkeiten am ERP-Messstandort in Berlin-Charlottenburg zeigen geringe Schwankungen. PALM überschätzt jedoch die Windgeschwindigkeit in der Nacht und um die Mittagszeit um bis zu 2 m/s.

### Wind speed at Ernst-Reuter-Platz (VALR01 vs. VALM01)

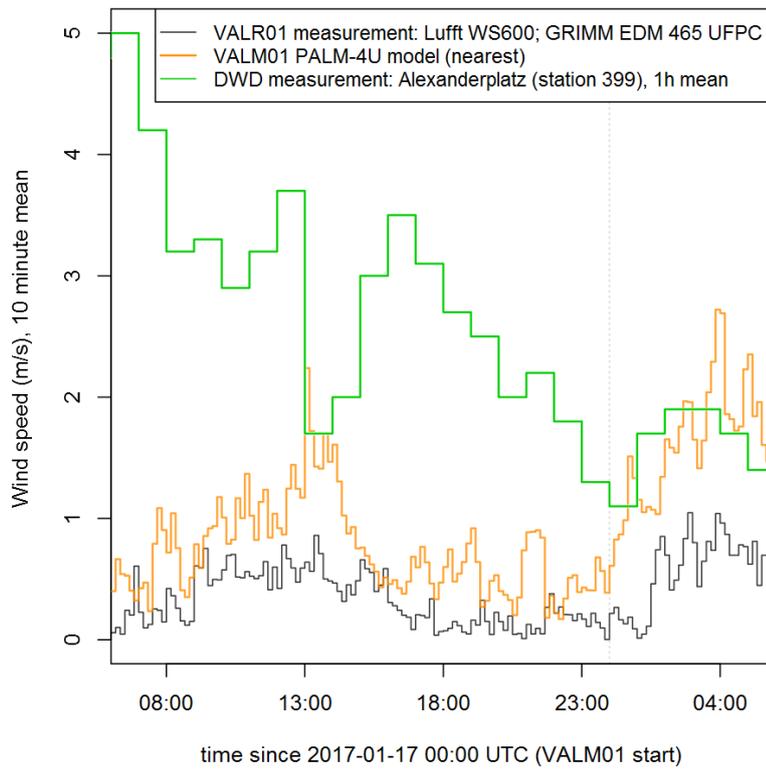


Abb. 3.2.5: 10-Minuten-Mittelwerte der beobachteten Windgeschwindigkeit (schwarz), der simulierten Windgeschwindigkeit (orange) und die stündlich gemittelte Windgeschwindigkeit an der DWD-Station in Berlin-Alexanderplatz (grün) während der VAL01-Simulationsperiode (17.01.2017 06:00 UTC bis 18.01.2017 06:00 UTC). Quelle: HUBgeo.

Die großräumige Windrichtung wird ebenfalls mit einigen Abweichungen simuliert, wobei die größte Übereinstimmung in den Vormittagsstunden zu verzeichnen ist (Abb. 3).

### Wind direction at Ernst-Reuter-Platz (VALR01 vs. VALM01)

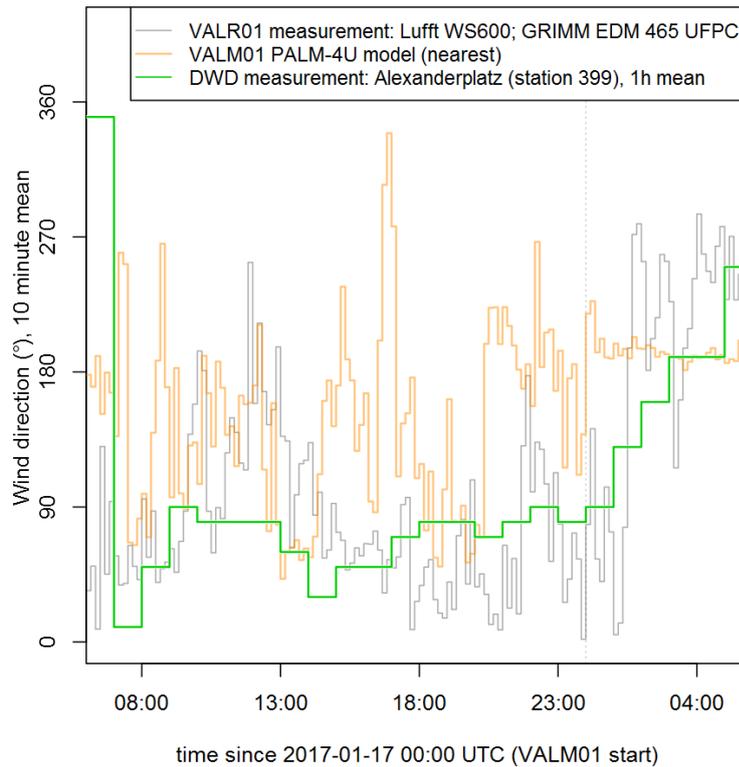


Abb. 3.2.6: 10-Minuten-Mittelwert der beobachteten Windrichtung (schwarz), simulierte Windrichtung (orange) und stündlich gemittelte Windrichtung an der DWD-Station in Berlin-Alexanderplatz (grün) während der VAL01-Simulationsperiode (17.01.2017 06:00 UTC bis 18.01.2017 06:00 UTC). Quelle: HUBgeo.

Die Vertikalprofile bis 300 m ü.G. wurden nicht direkt gemessen, sondern aus den Flugparametern der UAV berechnet, was einen weiteren Unsicherheitsfaktor mit sich bringt. Die Berechnung erfolgt für die Starrflügler über die Differenz zwischen air speed und ground speed beim Fliegen einer Spirale mit konstantem Schub. Beim Copter wird der Ausgleich der Neigung des Fluggeräts durch den Autopiloten herangezogen. Aufgrund dieser verschiedenen Methoden sind die Ergebnisse für die Standorte Tempelhofer Feld, Gutsmuths und Dahlemer Feld nicht direkt mit denen des Standorts Hertzallee vergleichbar.

Für die Wintersimulation gibt es einige Uhrzeiten, zu denen die Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit aus PALM-4U sehr gut mit denen der Messflüge übereinstimmen. Dies trifft insbesondere am Vormittag zu, die vertikalen Verläufe sind hier sehr ähnlich, das Modell weist lediglich etwas höhere Windgeschwindigkeiten auf als die Messung. In den besten Fällen werden erklärte Varianzen von bis zu 90 % und Abweichungen der Mittelwerte von 0.1 m/s erreicht. Am Nachmittag und Abend kommen teilweise deutliche Unterschiede zustande, wobei das Vorzeichen der Abweichung variiert. Insgesamt nimmt der Bias am

Standort Gutschmuths Werte zwischen -2 m/s und 1.5 m/s an, am Standort Dahlemer Feld liegt er zwischen -1.3 m/s und 0.8 m/s.

### Sommerlauf VALM02 bzw- VALM02v2

Für den Sommerlauf stehen Vertikalprofile bis 300 m und außerdem bis etwa 2.500 m zur Verfügung.

Für die Betrachtung der Genauigkeit des Modells bei der Windgeschwindigkeit wurde die Mean Deviation ebenfalls über alle Stationen in der Parent Domain betrachtet. Die Mediane aller Sechs-Stunden-Zeiträume außer einem sind größer als null. Das Modell weist damit eine systematische Überbewertung der Windgeschwindigkeit auf. Die Streuung der Werte ist mit bis über 4 m/s recht hoch, während die tatsächlichen Abweichungen der Medianwerte mit unter 1 m/s allerdings recht niedrig sind (Abb. 3.2.7).

Die Mediane der Child Domain (Abb. 3.2.8, rechts) liegen in sechs der acht Sechs-Stunden-Zeiträume näher an der 0-m/s-Linie. Außerdem sind der Interquartilsabstand und die Streuung in der Child Domain kleiner als bei den Parent-Stationen, die in den Child Domains liegen. Hier zeigt sich eine höhere Übereinstimmung zwischen den Modellwerten und den Messungen in der Child Domain als in der Parent Domain.

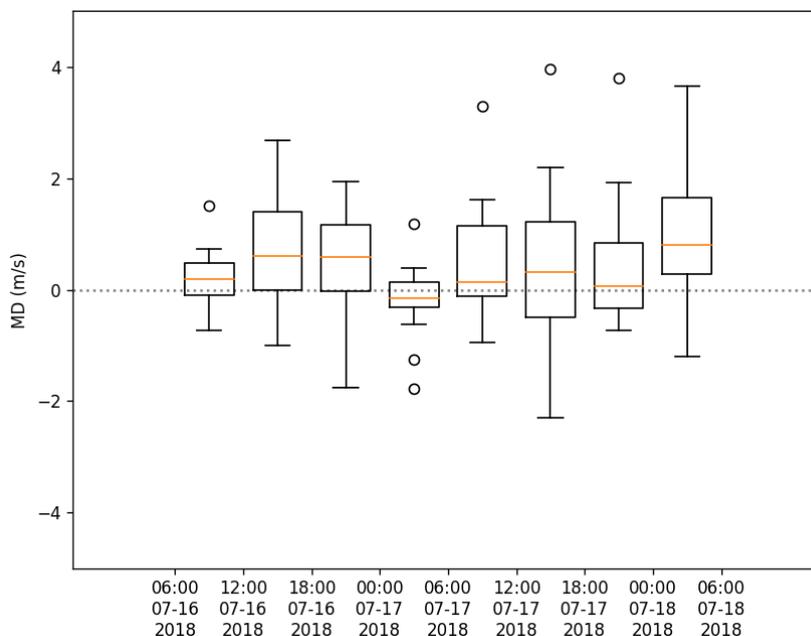


Abb. 3.2.7: Vergleich der modellierten (PALM-4U parent) und gemessenen (Obs) Windgeschwindigkeiten für die Messstationen in der Berliner Parent Domäne während des Sommerlaufs. Quelle: TUBKlima.

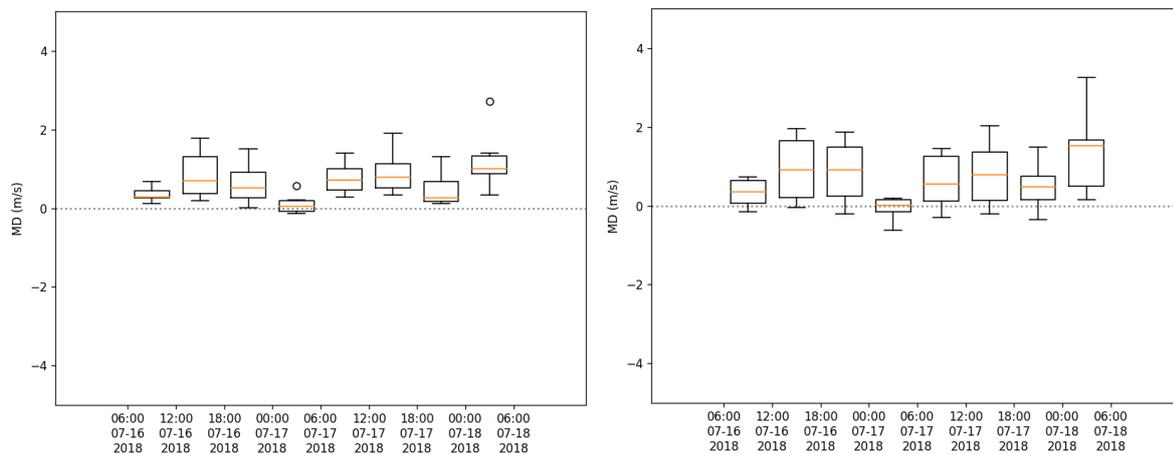


Abb. 3.2.8: Vergleich der Mean Deviation zwischen den modellierten und gemessenen Windgeschwindigkeiten in Sechs-Stunden-Zeiträumen während VALM02. Rechts die Daten der Parent Stationen, die in den Child Domains liegen, links die der Child Domain Stationen. Quelle: TUBklima.

Bis auf den Korrelationskoeffizienten verbessern sich alle Gütemaße in den mit der höheren Modellauflösung gerechneten Child Domains. Allerdings unterscheiden sich die Korrelationskoeffizienten hier nur minimal (s. Tab. 3.2.3).

Tab. 3.2.3: Die Werte der statistischen Gütemaße, aggregiert über den gesamten Validierungszeitraum, jeweils die Medianwerte. ParentC: Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Child: Stationen in den Child Domains. Quelle: TUBklima.

Gütemaß	Child	ParentC
RSMD (Root Mean Square Deviation)	0.75 m/s	1.10 m/s
r-pears (Pearson-Korrelationskoeffizient)	0.75	0.76
skv (Skillvarianz)	152.68 %	158.26 %
MD (Mean Deviation)	0.60 m/s	0.78 m/s

Bei der Windrichtung ist die Streuung der Werte in den meisten Sechs-Stunden-Zeiträumen recht groß, die maximale Abweichung der Mediane liegt allerdings im Bereich von nur +10°/-13° (Abb. 3.2.9).

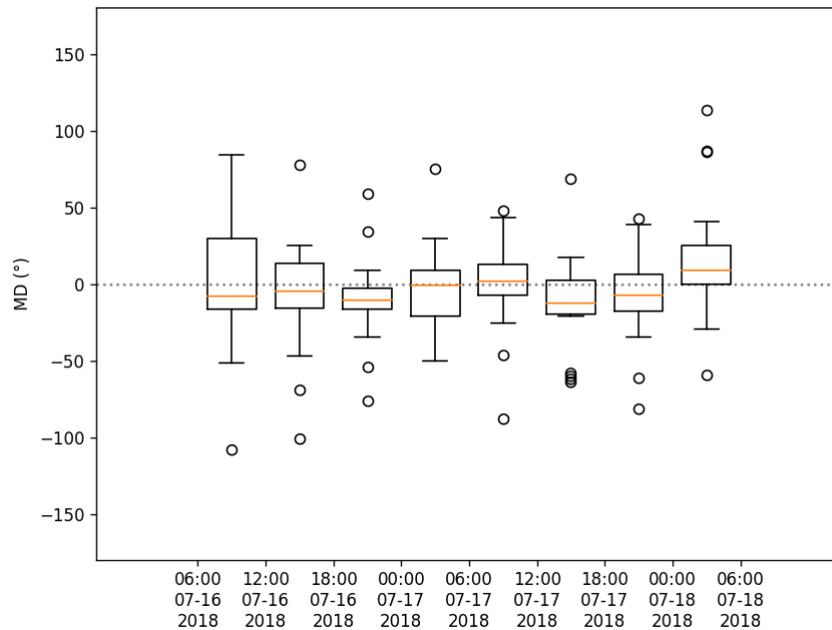


Abb. 3.2.9: Vergleich des modellierten (PALM-4U parent) und gemessenen (Obs) Verlaufs der Wind-richtung für die Messstationen in der Berliner Parent Domäne während des Sommerlaufs. Quelle: TUBklima.

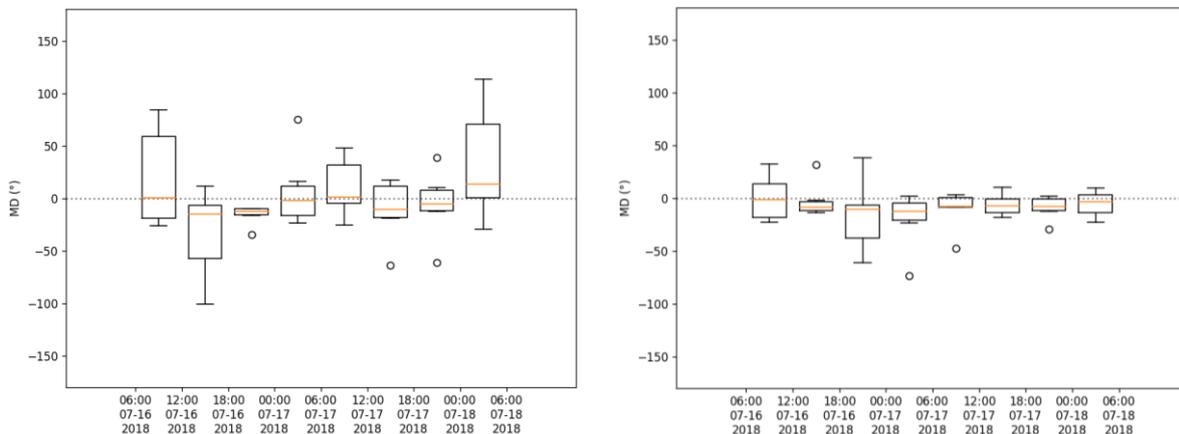


Abb. 3.2.10: Vergleich der Mean Deviation zwischen der modellierten und gemessenen Windrichtungen in Sechsstunden-Zeiträumen während VALM02. Links die Daten der Parent Stationen, die in den Child Domains liegen, rechts die der Child Domain Stationen. Quelle: TUBklima.

Die Modelldaten mit der höheren Auflösung in den Child Domains (Abb. 3.2.10, links) zeigen eine geringere Streuung als die Daten der Station der Parent Domain, die in den Child Domains liegen. Außerdem liegen die Mediane der Child Domains in den meisten Sechsstunden-Zeiträumen näher an der 0°-Linie.

Alle Gütemaße verbessern sich in den mit der höheren Modellauflösung gerechneten Child Domains, wie in Tab. 3.2.4 zu sehen ist.

Tab. 3.2.4: Die Werte der statistischen Gütemaße, aggregiert über den gesamten Validierungszeit-raum, jeweils die Medianwerte. ParentC: Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Child: Stationen in den Child Domains. Quelle: TUBklima.

Gütemaß	Child	ParentC
RSMD (Root Mean Square Deviation)	29.54°	58.96°
r-pears (Pearson-Korrelationskoeffizient)	0.68	0.59
skv (Skillvarianz)	89.26 %	122.59 %

Für die Validierungsperiode VALM02 standen weiterhin LIDAR-Windmessungen zur Verfügung, mit denen die simulierten Werte abgeglichen werden können, In der Parent Domain wurden Windgeschwindigkeit und -richtung bis in eine Höhe von 2.504 m simuliert. Die aus LTO stammenden Validierungsdaten wurden durch zwei Geräte des Typs HALO Photonics Streamline XR ermittelt, die sich im Bereich der Child Domains TU Campus und Rothenburg befinden.

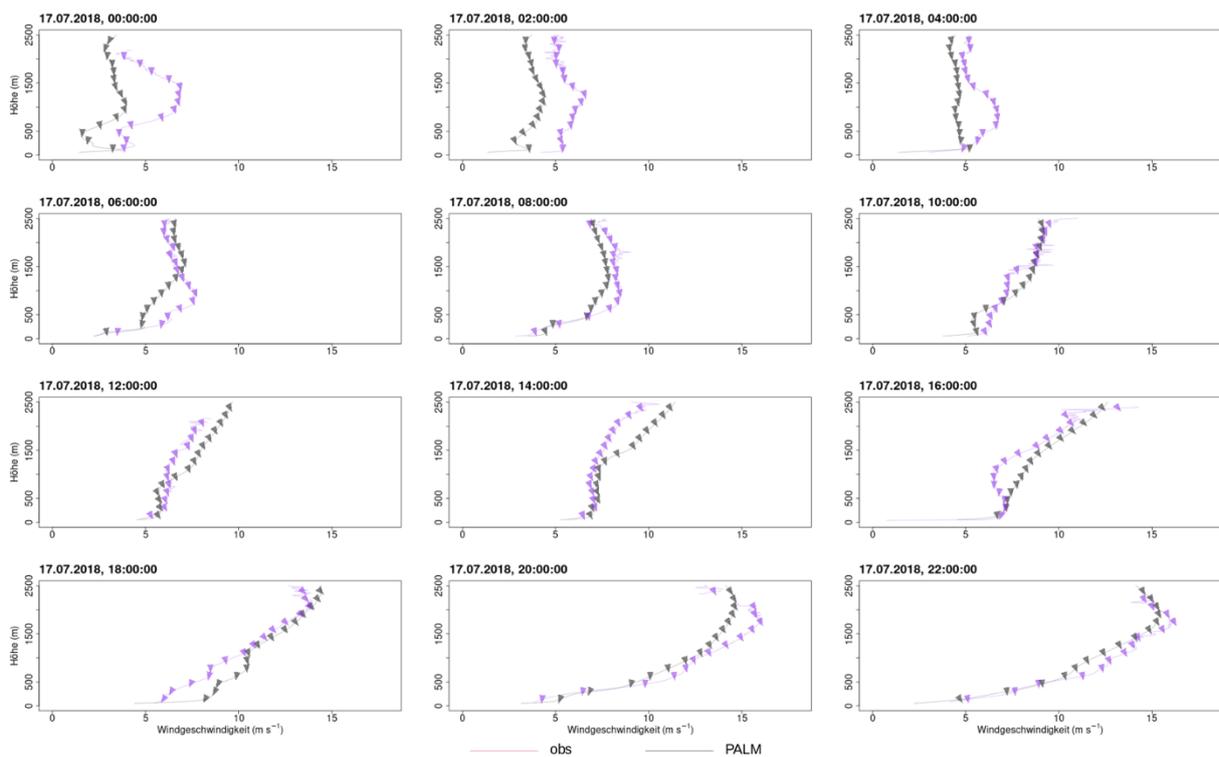


Abb. 3.2.11: Vergleich der simulierten und gemessenen Windgeschwindigkeit und der Windrichtung (Pfeilspitzen - Ausrichtung in Grad) am Standort TU Campus am 17. Juli 2018. Quelle: TUBklima.

Abb. 3.2.11 ist zu entnehmen, dass die Simulation der Windgeschwindigkeiten ab den Vormittagsstunden gut mit den tatsächlich gemessenen Werten übereinstimmen. Lediglich in der zweiten Nachthälfte und den frühen Morgenstunden werden die gemessenen Windgeschwindigkeiten vom Modell unterschätzt. Auch die vertikale Verortung von

Bereichen stärkerer bzw. schwächerer Winde stimmt überwiegend mit den Messungen überein. Zudem gelingt es PALM-4U, die real gemessenen Windrichtungen in den korrespondierenden Höhenlagen näherungsweise korrekt wiederzugeben.

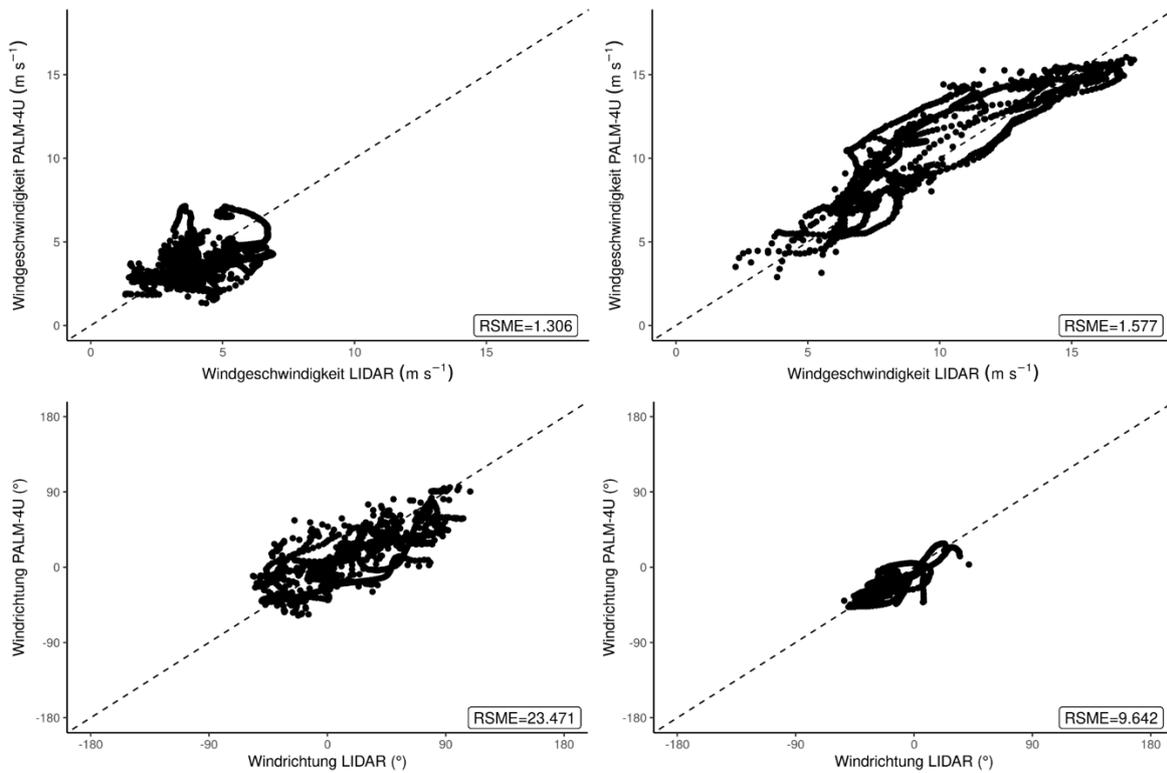


Abb. 3.2.12: Vergleich der Windgeschwindigkeiten (oben) und der Windrichtungen (unten, Süd: -180° und 180°, Nord: 0°) am Standort TU Campus zwischen 16. Juli 2017 08:00 UTC und 17. Juli 2018 06:00 UTC (links) sowie zwischen 17. Juli 2017 08:00 UTC und 18. Juli 2018 06:00 UTC (rechts). Quelle: TUBklima.

An den zwei aufeinanderfolgenden 24-Stunden-Perioden des sommerlichen Validierungszeitraumes werden RSME von 1.31 bzw. 1.58 m/s festgestellt, wobei die mittlere Windgeschwindigkeit im zweiten Zeitraum höher war. Dabei schwanken die Abweichungen zwischen Modell und Messungen über den größten Teil des Geschwindigkeitsspektrums nur leicht und bewegen sich sowohl im positiven als auch im negativen Bereich, ohne die Tendenz einer systematischen Über- oder Unterschätzung im Tagesmittel. Die höchsten gemessenen Geschwindigkeiten ab 15 m/s werden dagegen vom Modell regelmäßig unterschätzt (Abb. 3.2.12, oben).

Bei der Windrichtung ist ebenfalls eine gute Übereinstimmung zu erkennen. Hierbei wird ein Unterschied deutlich, da die Streuung in den ersten 24 Stunden noch recht groß war. Die Abweichungen in der zweiten Periode sind deutlich geringer und implizieren mit einem RSME

von weniger als zehn Grad eine hohe Modellgüte (Abb. 3.2.12, unten).

Für die Sommersimulation gibt es ebenfalls einige Vertikalprofile (300 m) mit guter Übereinstimmung der vertikalen Verläufe und des Wertebereichs der Windgeschwindigkeiten zwischen PALM-4U und den Messungen. Dies trifft vor allem nachts zu, wobei PALM-4U allgemein etwas niedrigere Werte als die Messung aufweist. Zwei Beispiele hierfür sind in Abb. 3.2.13 auf der linken Seite dargestellt. Tagsüber sind deutliche Abweichungen zwischen den Modell- und den Messwerten zu beobachten, wie beispielhaft in Abb. 3.2.13 auf der rechten Seite zu sehen ist. Die mittleren Abweichungen nehmen an den Standorten Gutsmuths und Tempelhofer Feld Werte zwischen 3 m/s und -3 m/s an. Es ist zu beachten, dass die Messwerte am Standort Hertzallee aufgrund der abweichenden Methodik bei der Berechnung der Windgeschwindigkeit niedriger sind als an den anderen Standorten. Dort beträgt der Bias zwischen 0.1 m/s und 4 m/s.

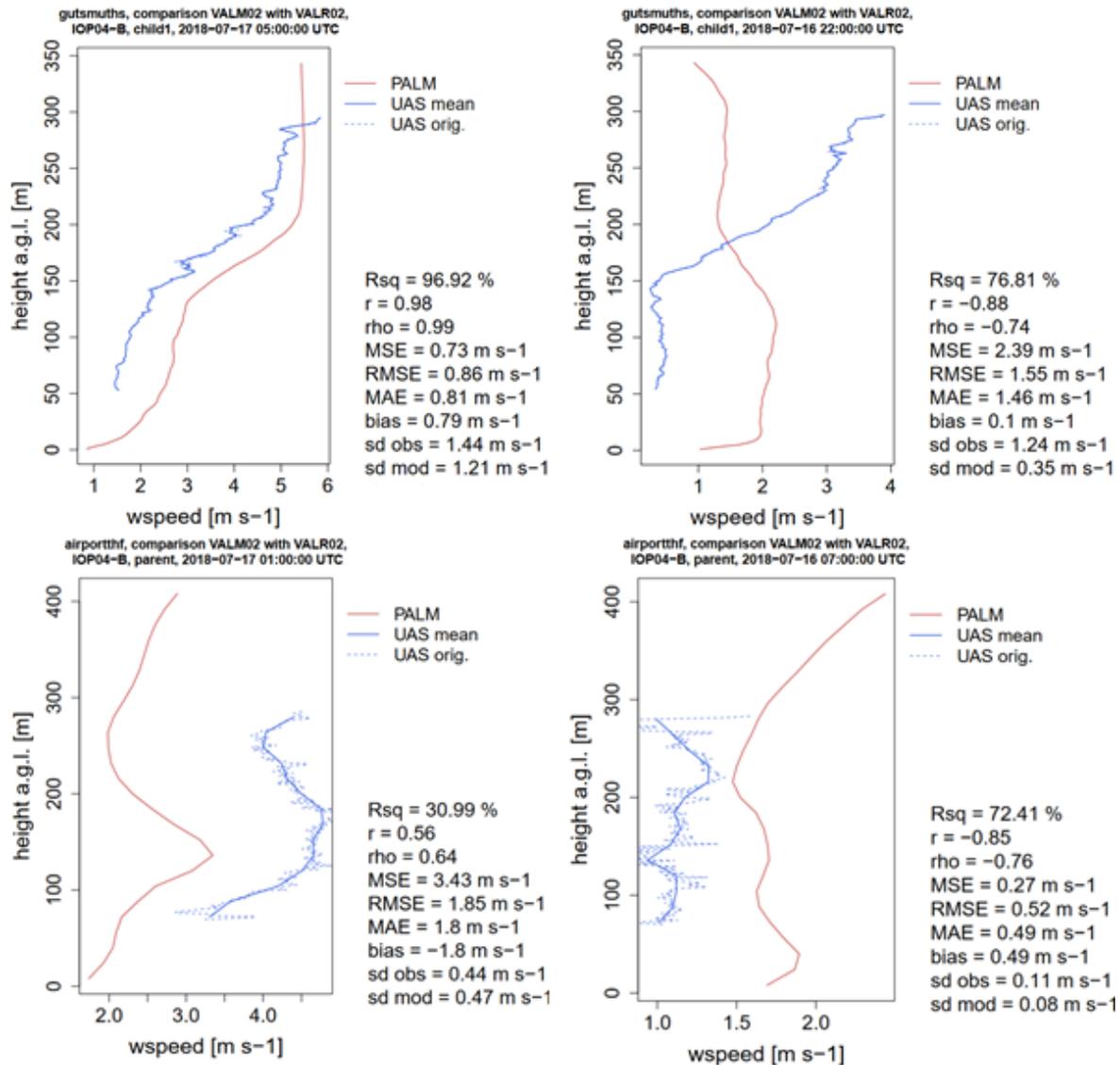


Abb. 3.2.13: Beispiele für Vergleiche der Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit in PALM-4U und den Messungen zu verschiedenen Uhrzeiten für VALM02/VALR02. Oben: Standort Gutsmuths, unten: Tempelhofer Feld. Für den Vergleich wurden die Messprofile innerhalb der Modellschichten gemittelt („UAS mean“), das Originalprofil wurde zusätzlich eingezeichnet („UAS orig.“). Folgende Gütemaße wurden berechnet: Rsq=erklärte Varianz, r=Pearson Korrelationskoeffizient, rho=Spearman Korrelationskoeffizient, MSE=mean square error, RMSE=root mean square error, MAE=mean absolute error, sd=Standardabweichung, obs=Beobachtung, mod=PALM-4U. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo).

Der Vergleich der Windgeschwindigkeit in VALM02v1 und VALM02v2 zeigt, dass am Tag in VALM02v2 höhere Werte vorkommen als in VALM02v1. Damit nehmen die Abweichungen zu den Messungen zu. Nachts stimmt die zweite Version des Laufs zu einigen Uhrzeiten besser mit den Beobachtungen überein (vgl. Abb. 3.2.14).

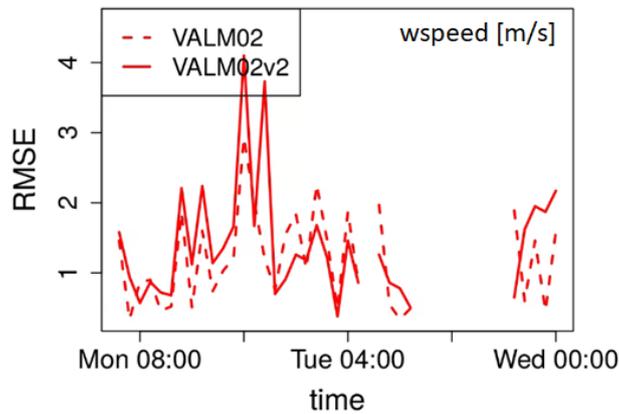


Abb. 3.2.14: Vergleich des RMSE zu verschiedenen Uhrzeiten für die Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit [m/s] für VALM02v1 und VALM02v2 am Standort Gutmuths, Child Domain. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo).

## Stuttgart

### PALM-4U v22.10

Es stellte sich heraus, dass die im Winter stärker ausgeprägte Stabilität der Atmosphäre die Bildung großer Wirbelstrukturen im Vergleich zum Sommer stark einschränkt. Der Vergleich 10-minütiger mittlerer Windprofile der PALM-4U Simulation mit Lidar-Daten der 3DO-Messkampagne zeigt, dass nicht alle Strömungsstrukturen realitätsgetreu abgebildet werden (Abb. 3.2.15).

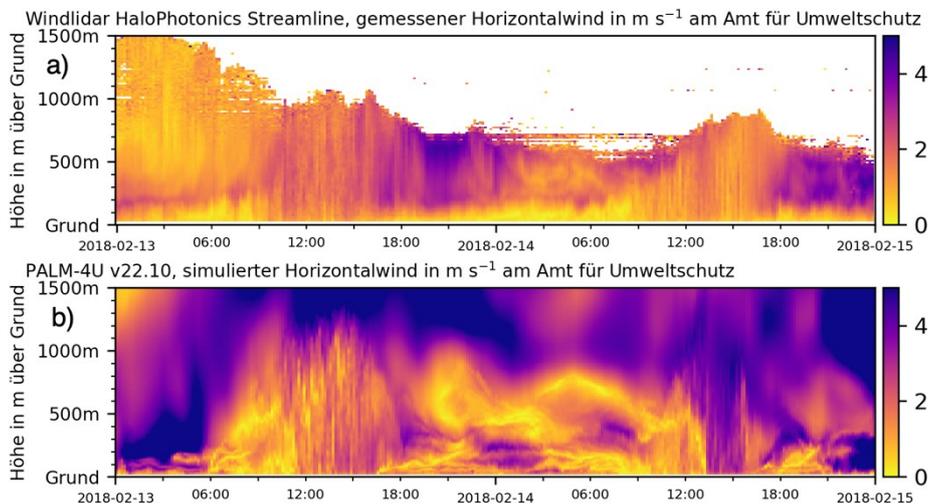


Abb. 3.2.15: Vergleich zwischen simulierten PALM-4U Daten (b, d) und gemessenen Lidar Daten (a, c) für horizontale (a, b) und vertikale (c, d) mittlere 10-min Windgeschwindigkeiten. Der Zeitraum umfasst 48 Stunden vom 13. bis 15. Februar 2018 00:00 UTC.

Die nächtliche mittlere Windgeschwindigkeit wird im Modell systematisch zu hoch simuliert. Die Gitterweite von 10 m reicht im Winter nicht aus, um alle relevanten Strukturen vollständig abzubilden, besonders in den Nacht- und Morgenstunden, wenn die Wirbelgrößen im Vergleich zur konvektiven Grenzschicht klein sind.

## PALM-4U v21.10-1

Der statische Treiber beinhaltet die aufbereiteten DLR-Daten für die Orographie und Landnutzung mit einer Gitterweite von 40 m. Der dynamische Treiber beinhaltet die stündlichen Randbedingungen aus COSMO-DE-Modellanalysen für die meteorologischen Größen (Wind, Temperatur, Feuchte) und für den Bodenzustand (Bodenfeuchte und Bodentemperatur). Er wurde mit dem verfügbaren, verbessertem Softwarepaket INIFOR (INItialization and FORcing) erstellt, das eine Streckung/Stauchung der COSMO-Daten auf die PALM-4U-Orographie erlaubt und dadurch die bodennahen Inversionsschichten in der Nacht in Tälern besser initialisiert.

Zum Vergleich von Simulationsergebnissen mit Referenzdaten wurden zwei charakteristische Höhen definiert. Die erste Höhe von 410 m asl ( $\approx 100$  m ü.G.) liegt innerhalb der nächtlichen Grenzschicht und die zweite Höhe in der Mitte der konvektiven Grenzschicht auf 1000 m asl ( $\approx 700$  m ü.G.) (Abb. 3.2.16). Verglichen wurden die Zeitreihen der stündlich gemittelten Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen. In Abb. 3.2.17 sind diese Vergleiche für die ausgewählten Stationen *citywera*, *cityhall* (Stuttgarter Becken) und *citycannstat* (Neckartal) dargestellt.

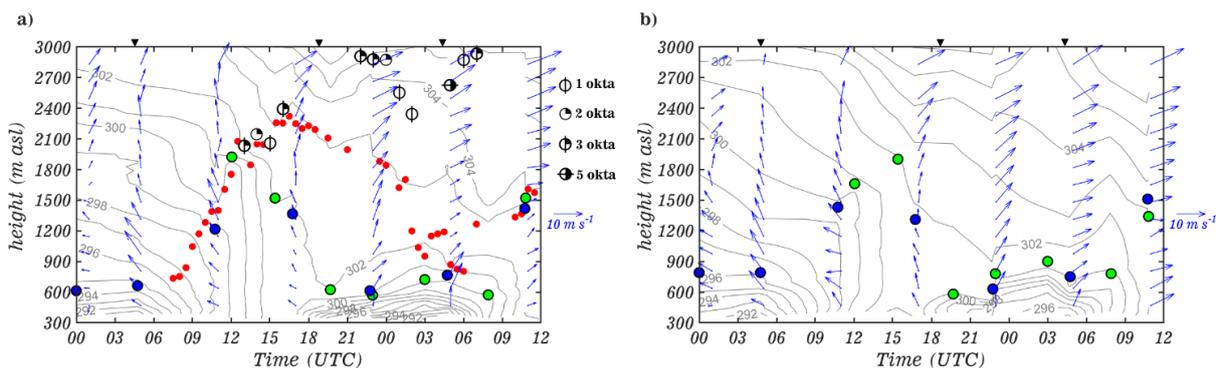


Abb. 3.2.16: Potentielle Temperatur (Isolinien), Horizontalwind (Pfeile), Grenzschichtcharakteristika (CBL, NBL, and RL) und Bewölkung. (a) Beobachtung. (b) Simulation. Blaue Punkte: Radiosonde an mschnarren, grüne Punkte: Radiosonde an erwshoettp, rote Punkte: Ceilometer an mschnarren. Wolkenuntergrenze und Bedeckungsgrad (in Achteln) sind von Ceilometerdaten (mschnarren) abgeleitet. Dreiecke zeigen (von rechts nach links) Sonnenaufgang, Sonnenuntergang und wieder Sonnenaufgang.

Die beobachteten Zeitreihen zeigen eine gute Übereinstimmung zu den simulierten Werten auf der Höhe von 1000 m asl (Abb. 3.2.17 a-d). Für 410 m asl gab das Modell die zeitlichen Verläufe der Windrichtung und Windgeschwindigkeit bis 09:00 UTC am 15 August adäquat wieder. Nach 09:00 UTC überschätzte das Modell die Windgeschwindigkeit im Stuttgarter Becken (Abb. 3.2.17 e-h). Die mögliche Ursache für diesen Unterschied ist in Kiseleva et al. (2023) ausführlich diskutiert.

Bei dem Vergleich von Windrichtungen aus den Höhen von 1000 m asl und 410 m asl konnte festgestellt werden, dass die Strömung tagsüber in der konvektiven Grenzschicht vertikal

gekoppelt ist, während nachts in der stabilen Grenzschicht eine vertikale Entkopplung der Strömung beobachtet wird. Auf 1000 m asl wird an allen Positionen ein Grenzschichtstrahlstrom (Low-Level Jet) mit ähnlicher Stärke und Windrichtung beobachtet. Auf 410 m asl bildet sich während der zweiten Nacht im Neckartal ein starker thermisch angetriebener Talabwind aus, während ein Abfluss aus dem Stuttgarter Becken in das Neckartal beobachtet wurde. In der ersten Nacht konnten, wegen geringer Windgeschwindigkeiten, keine Talabwinde beobachtet werden. Diese Windfeldcharakteristika wurden von PALM wiedergegeben. Der statistische Vergleich ist in Tab. 3.2.5 zusammengefasst.

Tab. 3.2.5: RMSE und NRMSE der Windgeschwindigkeit und RMSE der Windrichtung zwischen Referenzdaten und PALM-4U-Simulationen für 1000 m asl und 410 m asl. Die Angaben ohne Klammern gelten für den Zeitraum von 0000 UTC am 14. August bis 1200 UTC am 15. August und die Werte mit Klammern gelten für den Zeitraum von 0000 bis 2100 UTC am 14. August. Für den NRMSE wurde der RMSE mit dem Tagesmittelwert von  $\sigma_w^2$  ( $1.8 \text{ m s}^{-1}$ ) normiert.

<b>1000 m asl (700m agl)</b>			
	Windgeschwindigkeit ( $\text{m s}^{-1}$ )		Windrichtung ( $^\circ$ )
	RMSE	NRMSE	RMSE
erwschoettl	1.5	0.3	52.4
citywera	1.2 (1.1)	0.2 (0.2)	13.6 (14.0)
mschnarren	1.3	0.3	15.3
citycannstat	1.0 (0.9)	0.2 (0.2)	16.0 (17.3)
<b>410 m asl (100 m agl)</b>			
	Windgeschwindigkeit ( $\text{m s}^{-1}$ )		Windrichtung ( $^\circ$ )
	RMSE	NRMSE	RMSE
cityhall	1.6 (0.7)	0.8 (0.4)	29.6 (34.8)
erwschoettl	2.0	0.5	39
citywera	2.0 (0.8)	0.9 (0.4)	35.4 (31.3)
mschnarren	1.3	0.5	32.4
citycannstat	1.4 (1.1)	0.4 (0.5)	35.2 (43.0)

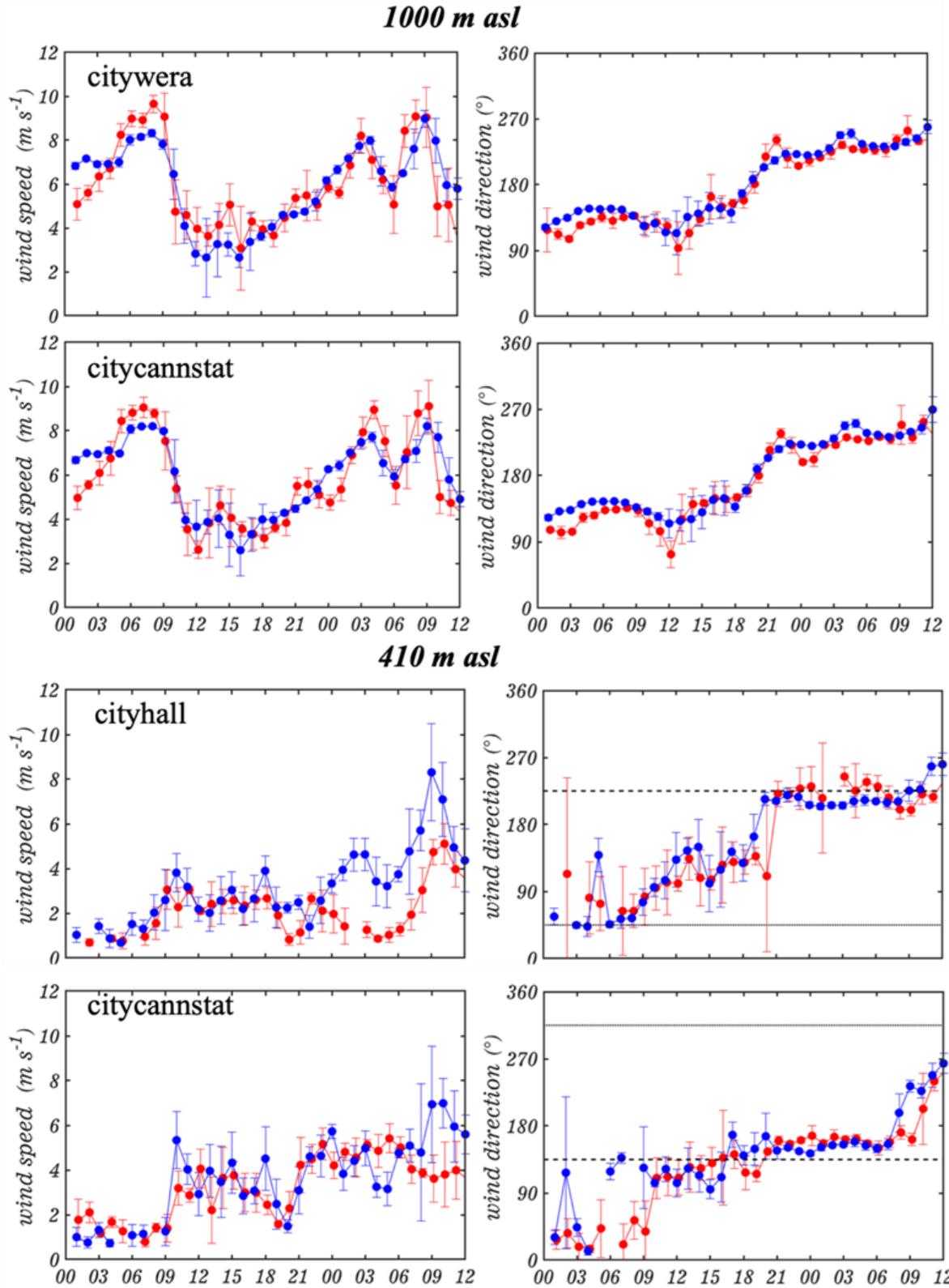


Abb. 3.2.17: Stündliche Mittelwerte und Standardabweichungen der Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Referenzdaten (rot) und Simulationen (blau) auf 1000 m asl und 410 m asl.

### 3.3. Strahlung und Wolken

#### Berlin

Die Strahlungsbilanzkomponenten wurden für den Zeitraum VALM02/VALR02 am Standort rothenburg in einer Höhe von 2 m validiert. Unglücklicherweise sind die Validierungsbedingungen für die Strahlungsprozesse in diesem Zeitraum durch den hohen Bewölkungsgrad nicht optimal. Zur Messung wurde ein Netto-Radiometer des Typs Kipp & Zonen CNR4 genutzt, das am Messturm in der Rothenburgstraße für die LTO angebracht ist.

Es zeigt sich, dass die aus dem oberen Halbraum ankommenden Strahlungsflüsse besser simuliert werden als die aus dem unteren Halbraum ausgehenden (Abb. 3.3.1). Die langwellige Gegenstrahlung (rld) wird von PALM-4U bereits recht gut wiedergegeben. Die simulierten Werte bewegen sich im Bereich der Messungen; bei geringer bis mäßiger Bewölkung (Abb. 3.3.2 unten) leicht darüber und bei starker Bewölkung leicht darunter. Bei der langwelligen Ausstrahlung (rlu) sind die simulierten Werte in der Tagesspitze um etwa  $50 \text{ W m}^{-2}$  zu hoch und vom Nachmittag bis in die Morgenstunden hinein um etwa 10 bis  $20 \text{ W m}^{-2}$  zu niedrig.

Die Globalstrahlung (rsd) wird in den Vormittagsstunden und in der Spitze korrekt simuliert. Zuvor und im Anschluss können an beiden Validierungstagen kurze Phasen registriert werden, in denen die durch verschiedene Hindernisse beeinflusste Globalstrahlung durch das Modell unterschätzt wird. Die kurzwellige Reflexstrahlung (rsu) wird durch das Modell in der Tagesspitze um etwa  $50 \text{ W m}^{-2}$  überschätzt, wohingegen es in den Nachmittagsstunden erneut zu einer leichten Unterschätzung der Werte kommt. Die sich daraus in der Konsequenz ergebende Strahlungsbilanz ( $Q^*$ ) ist von PALM-4U zu niedrig simuliert.

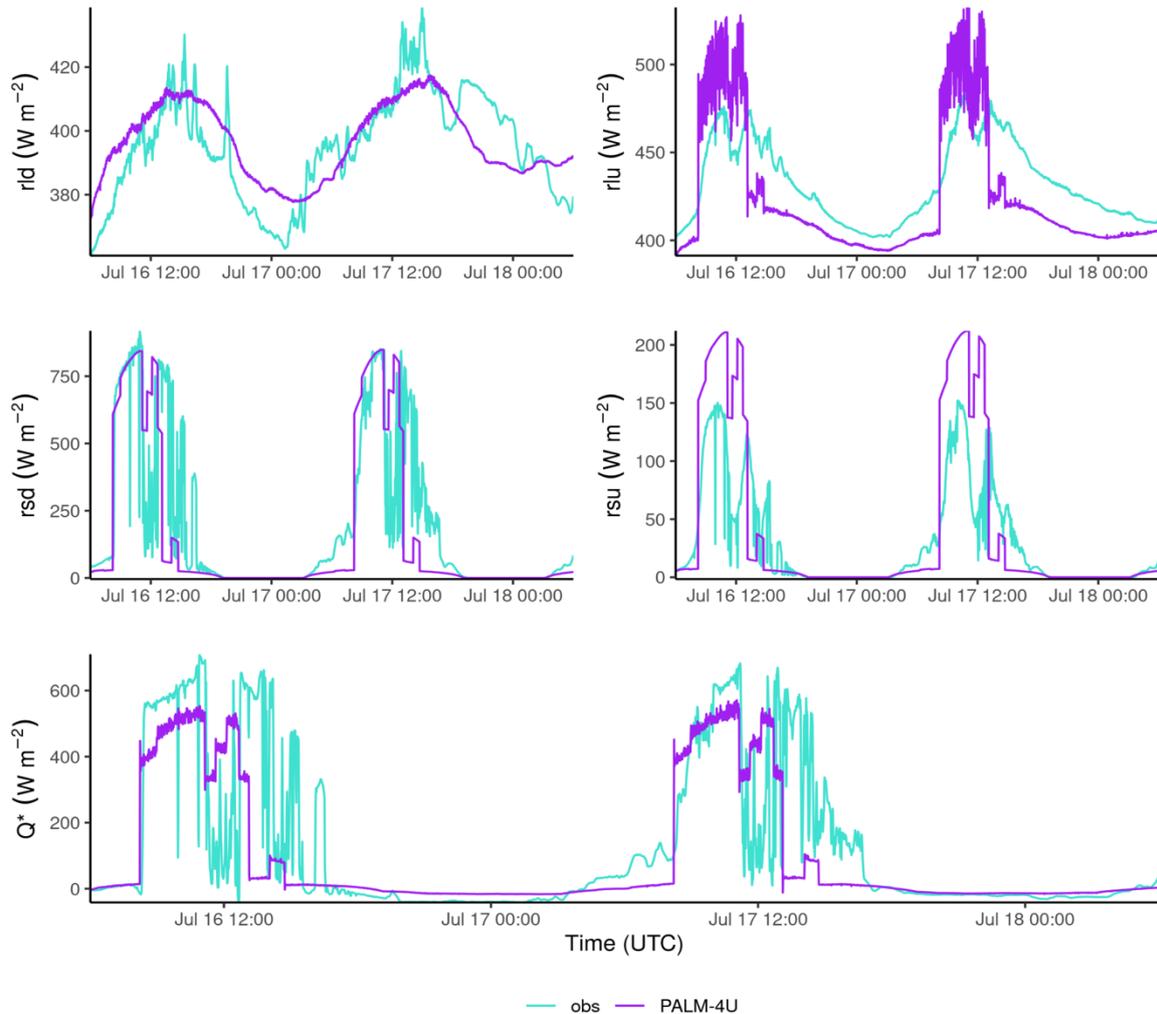


Abb. 3.3.1: Gemessene (türkis) und im Modell simulierte (violett) Globalstrahlung ( $r_{sd}$ ), kurzwellige Reflexstrahlung ( $r_{su}$ ), langwellige Gegenstrahlung ( $r_{ld}$ ), langwellige Ausstrahlung ( $r_{lu}$ ) und Strahlungsbilanz ( $Q^*$ ) während der Periode VALM02/VALR02 am Standort rothenburg. Quelle: TUBklima.

Mit dem Blick auf die absoluten Abweichungen im zeitlichen Verlauf (Abb. 3.3.2 oben) ist festzustellen, dass die Differenzen bei der langwelligen Gegenstrahlung nur sehr gering sind und dass sich eine starke Bewölkung nur in geringem Maße darauf auswirkt. Die kurz- sowie die langwellige Ausstrahlung wird ebenfalls unabhängig vom Grad der Bewölkung mit teilweise großen Abweichungen um die Tagesmitte simuliert. Die Globalstrahlung ist um die gesamte Tagesmitte von großen positiven und negativen Differenzen über  $100 \text{ W m}^{-2}$  gekennzeichnet, was vermutlich mit einer unzureichenden Abbildung der Verschattungseigenschaften der Umgebung zu erklären ist. Ein starker Zusammenhang mit der vorhandenen Bewölkung drängt sich dagegen nicht auf.

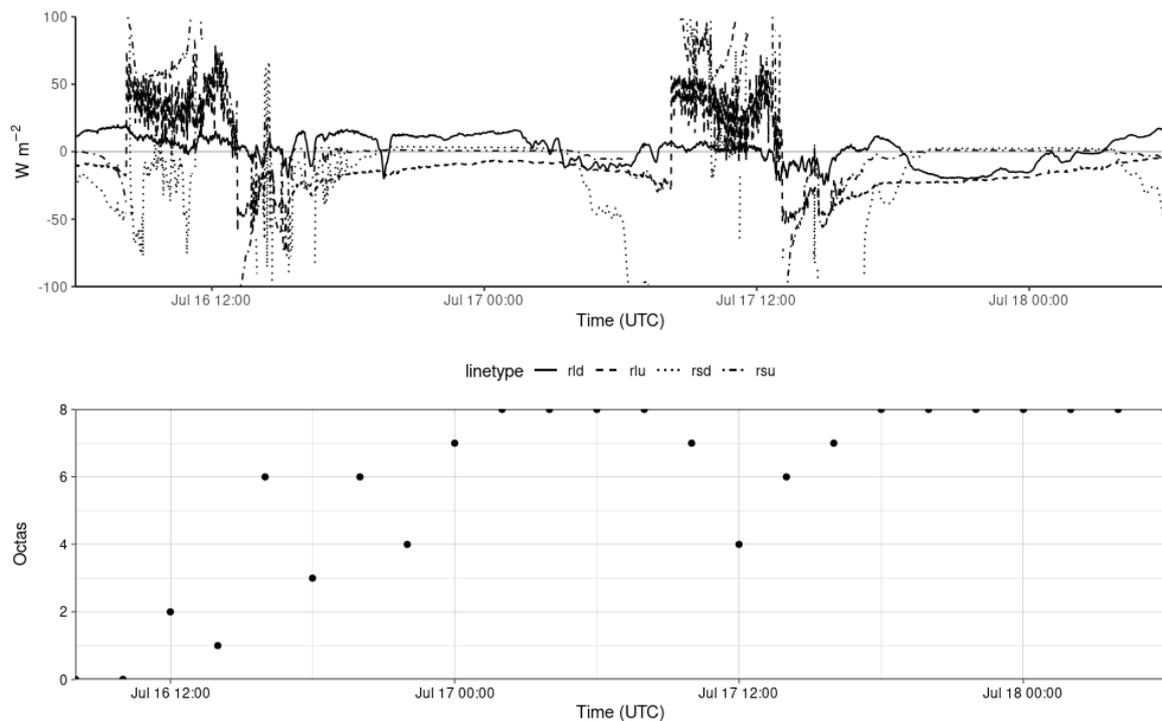


Abb. 3.3.2: Absolute Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Strahlungsflüssen am Standort rothenburg (oben) und korrespondierende Wolkenbedeckung am nahegelegensten Ceilometer-Standort im Grunewald. Quelle: TUBKlima.

Die Strahlungsbilanz ( $Q^*$ ) auf einem Gründach am Flughafen BER wird im Tagesgang insgesamt sehr gut von PALM-4U im Vergleich mit den Messungen wiedergegeben (Abb. 3.3.3). Globalstrahlung und langwellige Gegenstrahlung gleichen sich nahezu, da diese durch die Messdaten vorgegeben waren. Leichte Abweichungen lassen sich wahrscheinlich durch Mittelungsverfahren erklären. Eine durchgängige Unterschätzung seitens des Modells zeigt sich bei der kurzwelligen Reflexstrahlung (Abb. 3.3.3).

Der Parameter für die Albedo, der die kurzwellige Reflexstrahlung bestimmt, ist in PALM-4U bei Gründächern auf den Wert 5 festgelegt. Dies entspricht einer Albedo von 0.14 und ist demnach im Vergleich mit dem untersuchten Gründach zu niedrig angesetzt. Aus den Messwerten ergibt sich eine mittlere Albedo von 0.18 über den Vergleichszeitraum. Die langwellige Ausstrahlung wird hingegen vom Modell durchgängig überschätzt. Besonders in den Nachtstunden zeigen sich hier recht große Unterschiede von ca.  $50 \text{ W m}^{-2}$ . Dies weist darauf hin, dass das untersuchte Gründach in den Nachtstunden schneller auskühlt, als dies durch das Modell wiedergegeben wird. Die Gründe hierfür können an den angenommenen thermischen Eigenschaften des Gründachs liegen, aber auch am Oberfläche-Atmosphäre-Austausch von fühlbarer Wärme und müssen weiter untersucht werden.

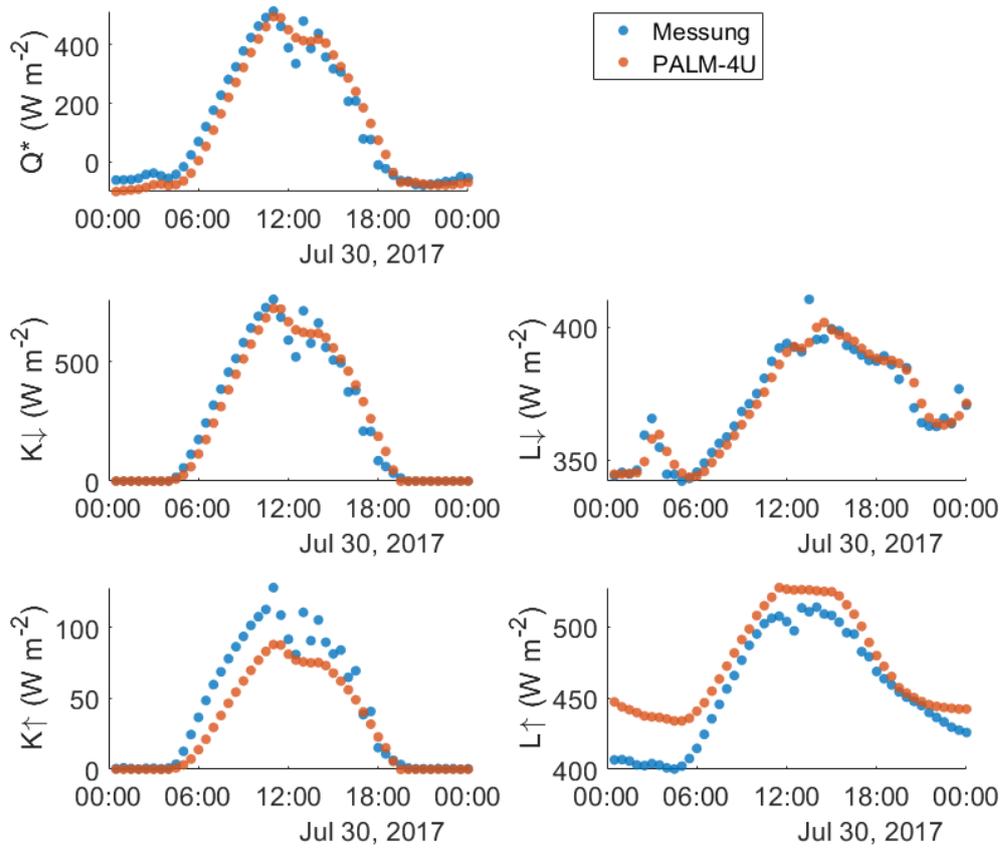


Abb. 3.3.3: Tagesgang der Strahlungsbilanz ( $Q^*$ ), der Globalstrahlung ( $K_{\downarrow}$ ), der kurzwelligen Reflexstrahlung ( $K_{\uparrow}$ ), der langwelligen Gegenstrahlung ( $L_{\downarrow}$ ) und der langwelligen Ausstrahlung ( $L_{\uparrow}$ ) für die zur Evaluation genutzten Messungen auf einem Gründach am Flughafen BER im Vergleich zu PALM-4U.

### 3.4. Turbulenz und Eddy-Kovarianz

#### Berlin

##### Winterlauf VALM01 bzw- VALM01v2

Als weitere Möglichkeit der Überprüfung der Genauigkeit von PALM-4U wurden Messungen der Eddy-Kovarianz-Stationen auf dem Dach des TU Berlin Hauptgebäudes und auf dem Gelände in der Rothenburgstraße herangezogen und mit den Modellwerten verglichen.

Bei den kinematischen Impulsflüssen (Abb. 3.4.1) zeigt sich eine qualitativ hohe Übereinstimmung zwischen Messungen und Modell. Die Unterschiede zwischen den größeren Impulsflüssen tagsüber und den kleineren während der Nacht werden gut wiedergegeben. Nur die absoluten Werte vom Vormittag bis zum frühen Nachmittag weichen stärker voneinander ab.

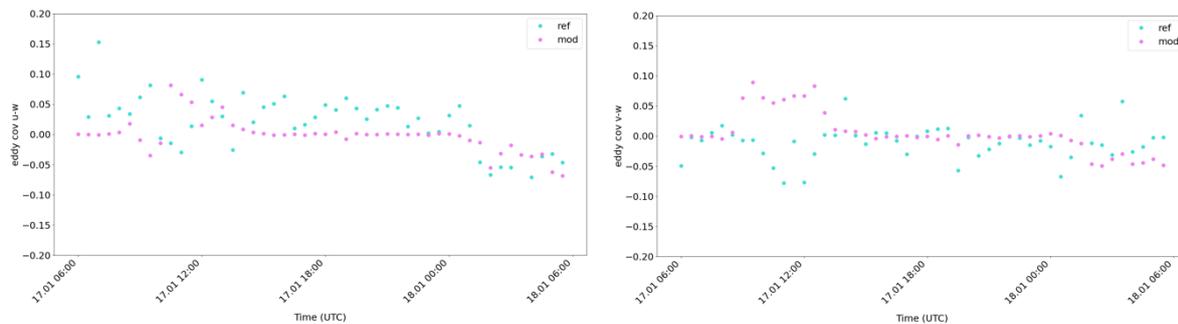


Abb. 3.4.1: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) kinematischen Impulsflüsse über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Kovarianzen aus den Windkomponenten  $u$  und  $w$  (links) sowie  $v$  und  $w$  (rechts). Messpunkt war die Eddy-Kovarianz-Station auf dem Dach des TU-Berlin Hauptgebäudes. Quelle: TUBklima.

Auch die kinematischen sensiblen Wärmeflüsse werden durch das Modell gut wiedergegeben (Abb. 3.4.2). Nur am Vormittag überschätzt PALM-4U die Messungen stärker.

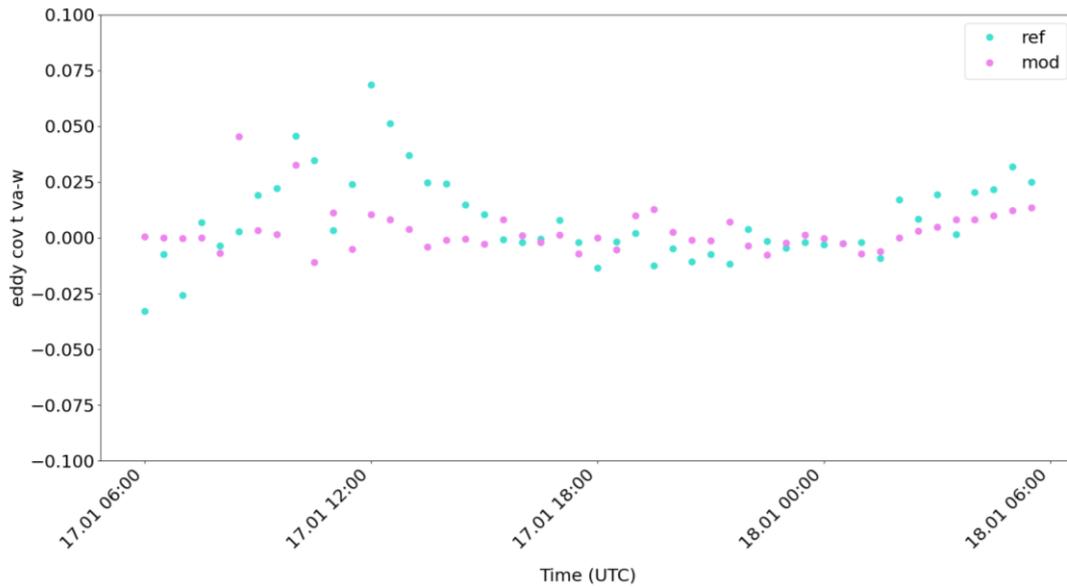


Abb. 3.4.2: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) kinematischen sensiblen Wärmeflüsse über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Kovarianzen aus der vertikalen akustischen Temperatur  $t_{va}$  und der Windkomponente  $w$ . Messpunkt war die Eddy-Kovarianz-Station auf dem Dach des TU-Berlin Hauptgebäudes. Quelle: TUBklima.

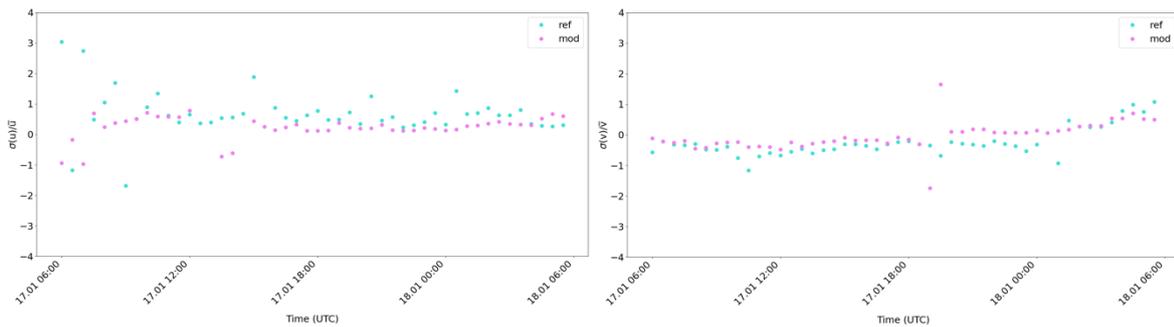


Abb. 3.4.3: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) Böenfaktoren über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Verhältnisse aus den Standardabweichungen der Windkomponente  $u$  und dem Mittelwert von  $u$  (links) sowie den Standardabweichungen der Windkomponente  $v$  und dem Mittelwert von  $v$  (rechts). Messpunkt war die Eddy-Kovarianz-Station auf dem Dach des TU-Berlin Hauptgebäudes. Quelle: TUBklima.

## Sommerlauf VALM02 bzw- VALM02v2

Bei den kinematischen Impulsflüssen (Abb. 3.4.4 und 3.4.5) zeigt sich eine qualitativ hohe Übereinstimmung zwischen Messungen und Modell. Die Unterschiede zwischen den größeren Impulsflüssen tagsüber und den kleineren während der Nacht werden gut wiedergegeben. Nur die absoluten Werte vom Vormittag bis zum frühen Nachmittag weichen stärker voneinander ab.

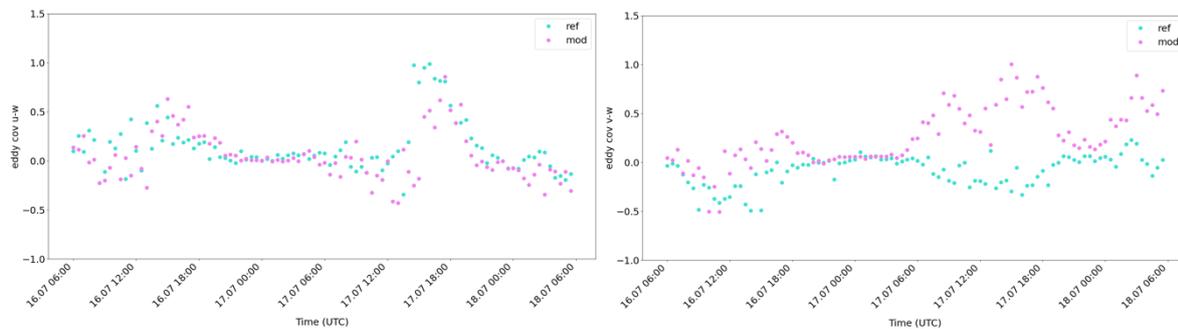


Abb. 3.4.4: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) kinematischen Impulsflüsse über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Kovarianzen aus den Windkomponenten  $u$  und  $w$  (links) sowie  $v$  und  $w$  (rechts). Messpunkt war die Eddy-Kovarianz-Station auf dem Dach des TU-Berlin Hauptgebäudes. Quelle: TUBklima.

Bei der Eddy-Kovarianzstation auf dem Messturm in der Rothenburgstraße zeigt sich zum einen eine gute Übereinstimmung der Messungen mit dem Modell (Abb. 3.4.5).

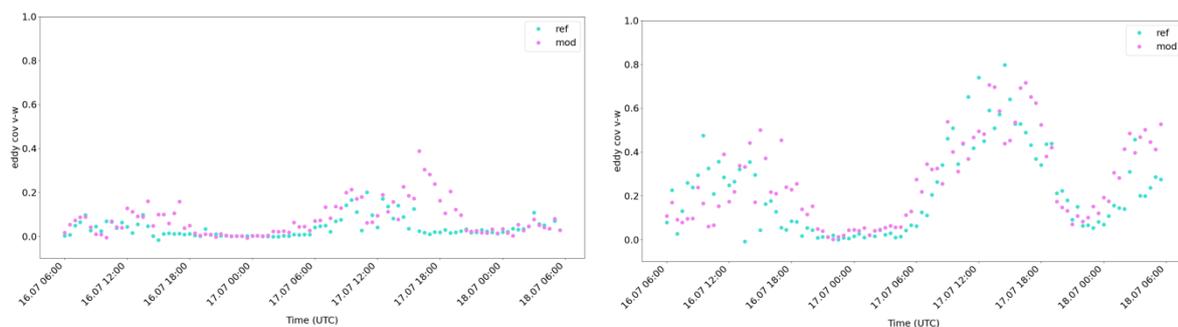


Abb. 3.4.5: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) kinematischen Impulsflüsse über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Kovarianzen aus den Windkomponenten  $v$  und  $w$ . Messpunkte waren die Eddy-Kovarianz-Stationen auf dem Messturm in der Rothenburgstraße. Links sind die Flüsse in 10 m Messhöhe, rechts die in 40 m dargestellt. Quelle: TUBklima.

Zum anderen lässt sich in den Abbildungen der Einfluss der Messhöhe gut erkennen. Die Messung in 10 m Höhe (Abb. 3.4.5, links) zeigt tagsüber deutlich geringere Werte als die in 40 m Höhe (Abb. 3.4.5, rechts). Hier macht sich der Einfluss der umstehenden Bäume und

Gebäude bemerkbar.

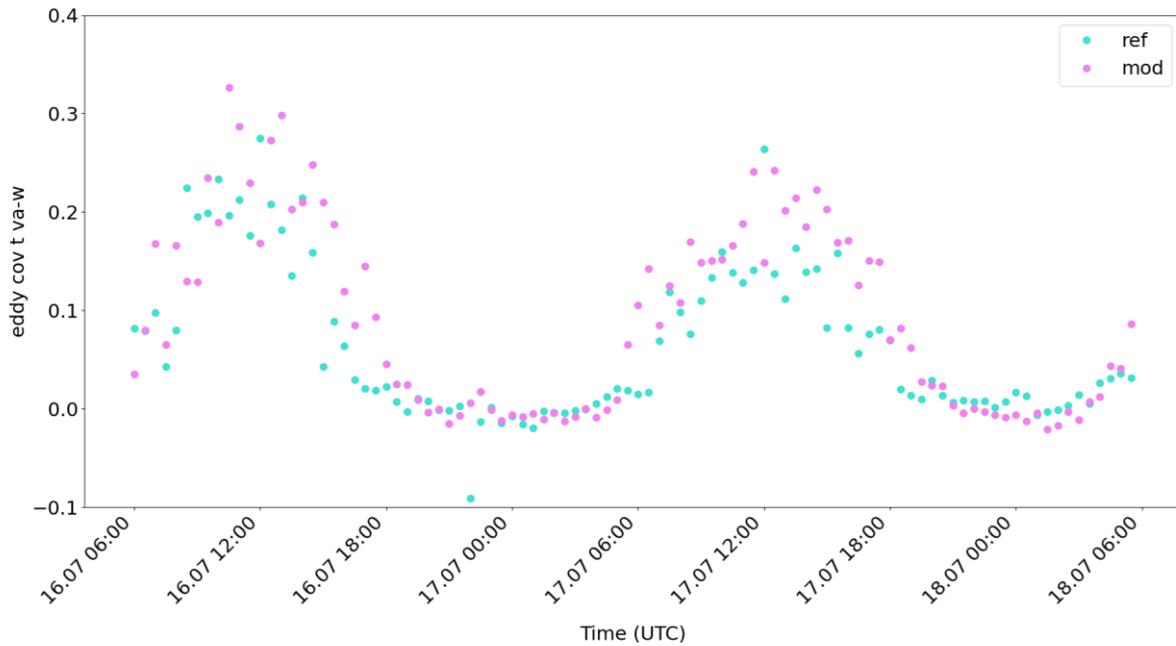


Abb. 3.4.6: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) kinematischen sensiblen Wärmeflüsse über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Kovarianzen aus der vertikalen akustischen Temperatur  $t_{va}$  und der Windkomponente  $w$ . Messpunkt war die Eddy-Kovarianz-Station auf dem Dach des TU-Berlin Hauptgebäudes. Quelle: TUBklima.

Auch bei den kinematischen sensiblen Wärmeflüssen sind in der Rothenburgstraße zum einen eine gute Übereinstimmung von Mess- und Modelldaten zu sehen. Zum anderen ist wieder der Einfluss der Messhöhe gut zu erkennen.

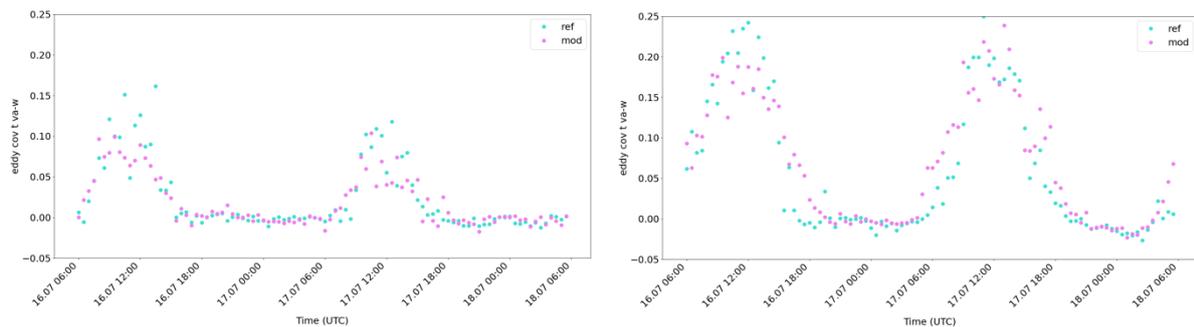


Abb. 3.4.7: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) kinematischen sensiblen Wärmeflüsse über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Kovarianzen aus der vertikalen akustischen Temperatur  $t_{va}$  und der Windkomponente  $w$ . Messpunkte waren die Eddy-Kovarianz-Stationen auf dem Messturm in der Rothenburgstraße. Links sind die Flüsse in 10 m Messhöhe, rechts die in 40 m dargestellt. Quelle: TUBklima.

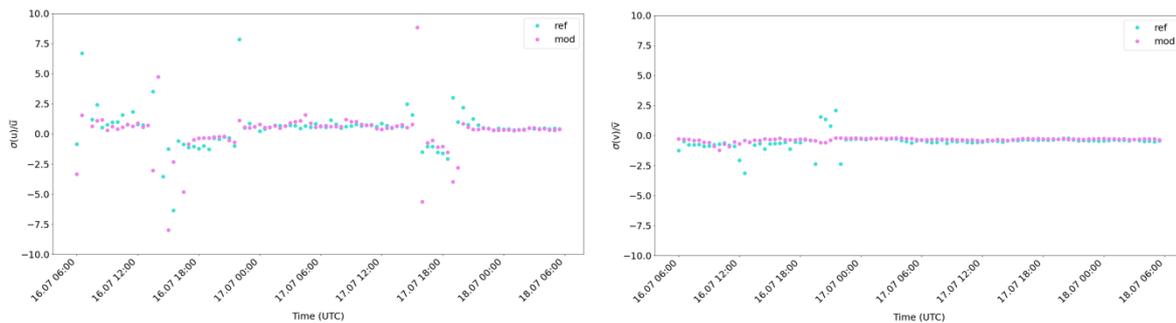


Abb. 3.4.8: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) Böenfaktoren über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Verhältnisse aus den Standardabweichungen der Windkomponente  $u$  und dem Mittelwert von  $u$  (links) sowie den Standardabweichungen der Windkomponente  $v$  und dem Mittelwert von  $v$  (rechts). Messpunkt war die Eddy-Kovarianz-Station auf dem Dach des TU-Berlin Hauptgebäudes. Quelle: TUBklima.

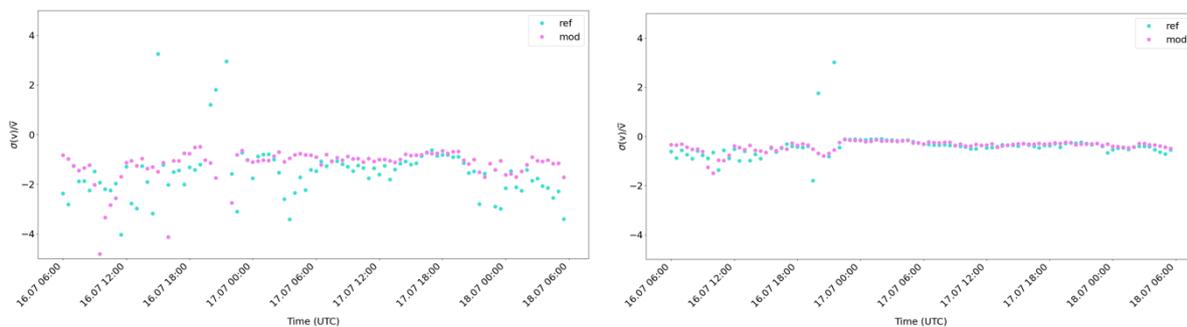


Abb. 3.4.9: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) Böenfaktoren über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Verhältnisse aus den Standardabweichungen der Windkomponente  $v$  und dem Mittelwert von  $v$ . Messpunkte waren die Eddy-Kovarianz-Stationen auf dem Messturm in der Rothenburgstraße. Links sind die Böenfaktoren in 10 m Messhöhe, rechts die in 40 m dargestellt. Quelle: TUBklima.

Zur Evaluierung des Gründachmoduls von PALM-4U wurden die fühlbaren und latenten Wärmeflüsse als maßgebliche Zielgrößen formuliert, da diese die Lufttemperatur in der lokalen Umgebung der Wärmeflüsse entscheidend beeinflussen. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf Simulationen, die mit der Version 22.10 von PALM-4U durchgeführt wurden. Die Evaluation ist zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht vollständig abgeschlossen, d.h. die Ergebnisse des zuvor beschriebenen kleineren Modellgebiets mit einer horizontalen Ausdehnung von  $4000 \times 4000 \text{ m}^2$  bei der parent domain werden hier beschrieben (s. Kap. 2.3 des [UC]<sup>2</sup>-Evaluierungsberichts Teil 1). Aus diesem Grund sind die hier gezeigten Ergebnisse als vorläufig zu betrachten. Die Darstellung der Ergebnisse beginnt im Folgenden mit einem Vergleich der Strahlungsbilanzgrößen und anschließend werden die Energiebilanzgrößen dargestellt. Hierzu wurden die jeweiligen Vergleichsgrößen aus PALM-4U für sämtliche auf dem Gründach liegenden Gitterpunkte extrahiert und der Median von diesen (für jeden Ausgabezeitschritt) berechnet.

Der turbulente, fühlbare Wärmeaustausch des Gründachs wird tagsüber durch das Modell sehr akkurat abgebildet (Abb. 3.4.10). Größere Unterschiede zeigen sich wiederum in den Nachtstunden, in denen PALM-4U positive Flüsse von ca.  $50 \text{ W m}^{-2}$  simuliert, wohingegen leicht negative Flüsse gemessen wurden. Auch dies weist wiederum auf eine schnellere nächtliche Abkühlung des bemessenen Gründachs im Vergleich zum simulierten Gründach hin. Kritisch anzumerken ist hier, dass der Quellbereich der genutzten Eddy-Kovarianz Messungen nachts deutlich ansteigen kann und somit nicht garantiert ist, dass die nächtlichen Messdaten der turbulenten Wärmeflüsse ausschließlich das Gründach repräsentieren. Dies ist allerdings für die zuvor genannten, gemessenen Strahlungsflüsse auf dem Gründach nicht der Fall, d.h. diese repräsentieren ausschließlich das Verhalten des Gründachs. Für die latenten Wärmeflüsse ( $Q_E$ ) ergibt sich ein umgekehrtes Bild, d.h. die latenten Wärmeflüsse stimmen nachts deutlich besser überein, als tagsüber. Das bedeutet, dass die simulierten Verdunstungsflüsse die gemessenen deutlich übersteigen. Die Abweichungen erreichen um 14:30 UTC einen maximalen Wert von  $235 \text{ W m}^{-2}$ . Mögliche Gründe für diese Abweichungen müssen weiter untersucht werden. Simulationen mit einer größeren Parent domain, die eine realistische Ausprägung der Turbulenz im Modell garantieren, können hier eventuell weitere Aufschlüsse erzielen.

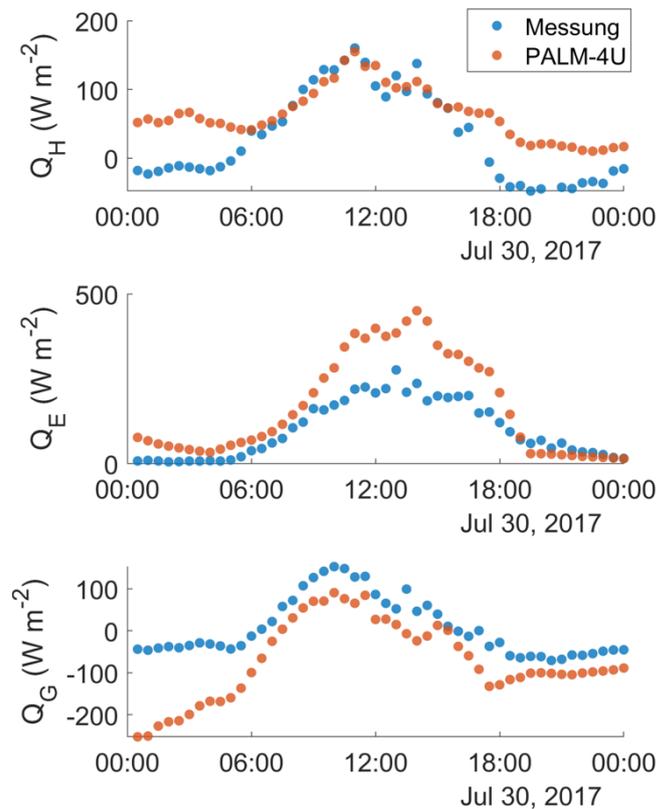


Abb. 3.4.10: Tagesgang des fühlbaren ( $Q_H$ ), latenten ( $Q_E$ ) und konduktiven Wärmeflusses des Gründachsubstrats ( $Q_G$ ) für die zur Evaluation genutzten Messungen auf einem Gründach am Flughafen BER im Vergleich zu PALM-4U.

Hinsichtlich des konduktiven Wärmeflusses im Substrat ( $Q_G$ ) zeigen sich vor allem in der ersten Nachthälfte größere Abweichungen. An dieser Stelle wird nochmals überprüft werden, inwiefern die Initialisierungsbedingungen des Modells dafür verantwortlich sein könnten. Ab ca. 06:00 UTC gleichen sich die modellierten und gemessenen Wärmeflüsse deutlich aneinander an, wobei eine relativ konstante, aber geringe Unterschätzung seitens des Modells deutlich wird. Dies kann daran liegen, dass die angenommenen thermischen Eigenschaften des Substrats und der darunter liegenden Betondecke von den tatsächlichen Werten, die nur zum Teil bekannt sind, abweichen.

Da die fühlbaren Wärmeflüsse tagsüber gut übereinstimmen, kann auf Basis der hier dargestellten Ergebnisse vorläufig davon ausgegangen werden, dass die Kühlwirkung von Gründächern (bzw. geringere Erwärmung im Vergleich zu versiegelten Oberflächen) am Tag durch PALM-4U akkurat simuliert werden kann. In den Nachtstunden zeigen sich größere Abweichungen, deren Ursachen in Zukunft weiter untersucht werden.

## Stuttgart

### PALM-4U v21.10-2

Mithilfe zeitlich hochaufgelöster (10 s), stationsbezogener Modell-Ausgaben wurden die vertikalen Profile des Vertikalwindes (cityhall, cityafus) und die vertikalen Profile von Wind, Temperatur, Feuchte (mschnarren) produziert. Für ein Gebiet mit der Größe von 3x3 km<sup>2</sup> wurde sowohl der 3D-Output von Vertikalwinden und Temperaturen mit 15 min Auflösung als auch der hochaufgelöste Output des Vertikalwindes (10 s) auf der Höhe von 350 m ü.G. ausgegeben.

Die Varianz der Vertikalgeschwindigkeit wurde sowohl aus Modell-Ausgaben als auch aus Messungen abgeleitet und verglichen. Zuerst wurde die zeitliche Entwicklung der konvektiven Grenzschicht analysiert. Die von Ceilometerdaten (mschnarren) abgeleiteten Grenzschichthöhen stimmen mit den Simulationsergebnissen gut überein (Abb. 3.4.11a). Die simulierten Grenzschichthöhen wurden mithilfe der Gradient-Methode aus den mittleren Profilen der potenziellen Temperatur für das 3x3 km<sup>2</sup>-Gebiet bestimmt. Die Profile der potenziellen Temperatur, spezifischen Feuchte und des Horizontalwindes aus Radiosondendaten (mschnarren) zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den Modelldaten (Abb. 3.4.11b). Eine adäquate Darstellung dieser meteorologischen Bedingungen durch PALM bildete die notwendige Voraussetzung für die Validierung der Turbulenz in der Grenzschicht.

Damit ein Vergleich von Simulationsergebnissen mit Referenzdaten durchgeführt werden konnte, wurde die Messhöhe von 350 m ü.G. für den Vergleich festgelegt. Die gleitenden stündlichen Varianzen des Vertikalwindes ( $\sigma_w^2$ ) an den Referenzstationen cityhall und cityafus, sowie die räumlichen 15-min-Varianzen für das 3x3 km<sup>2</sup>-Gebiet ( $\sigma_{w,3x3}^2$ ) wurden berechnet und in Abb. 3.4.12a dargestellt.

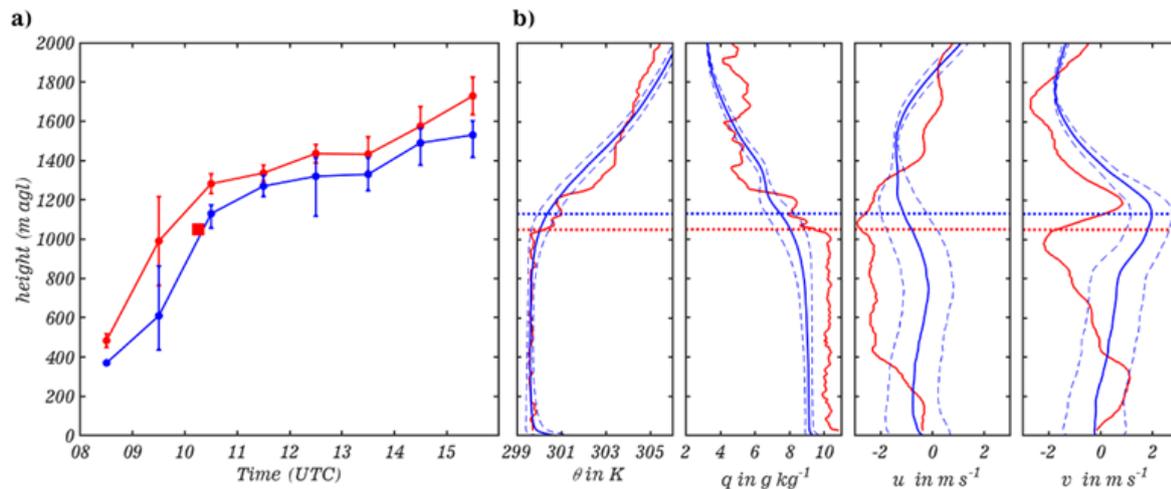


Abb. 3.4.11: (a) Zeitlicher Verlauf der Grenzschichthöhe abgeleitet aus Ceilometerdaten an mschnarren (stündliche Mittelwerte und Standardabweichungen - rote Linie) und PALM-4U-Simulationen für das  $3 \times 3\ km^2$ -Gebiet (räumliche Mittelwerte und Standardabweichungen - blaue Linie) sowie die Grenzschichthöhe aus dem Radiosondenaufstieg um 10:45 UTC an mschnarren. (b) Profile der potenziellen Temperatur,  $\theta$ , spezifischer Feuchte  $q$ ,  $u$ - und  $v$ -wind Komponenten von Radiosonden an mschnarren um 10:45 UTC (durchgezogene rote Linie) und PALM-4U-Simulationen für das  $3 \times 3\ km^2$ -Gebiet (räumliche Mittelwerte und Standardabweichungen) um 11:00 UTC (blaue durchgezogene und gestrichelte Linie). Die gepunkteten Linien zeigen die Grenzschichthöhen aus Beobachtung (rot) und Simulation (blau).

Die zeitlichen Verläufe von stündlichen Varianzen zeigen eine große Amplitude bis zu  $2,5\ m^2\ s^{-2}$ . Unterschiede in  $\sigma_w^2$  zwischen beiden Referenzstationen erreichen bis zu 50% - sowohl bei den Referenzdaten als auch bei der Simulation. Die räumliche Varianz zeigt dagegen einen ruhigen zeitlichen Verlauf.

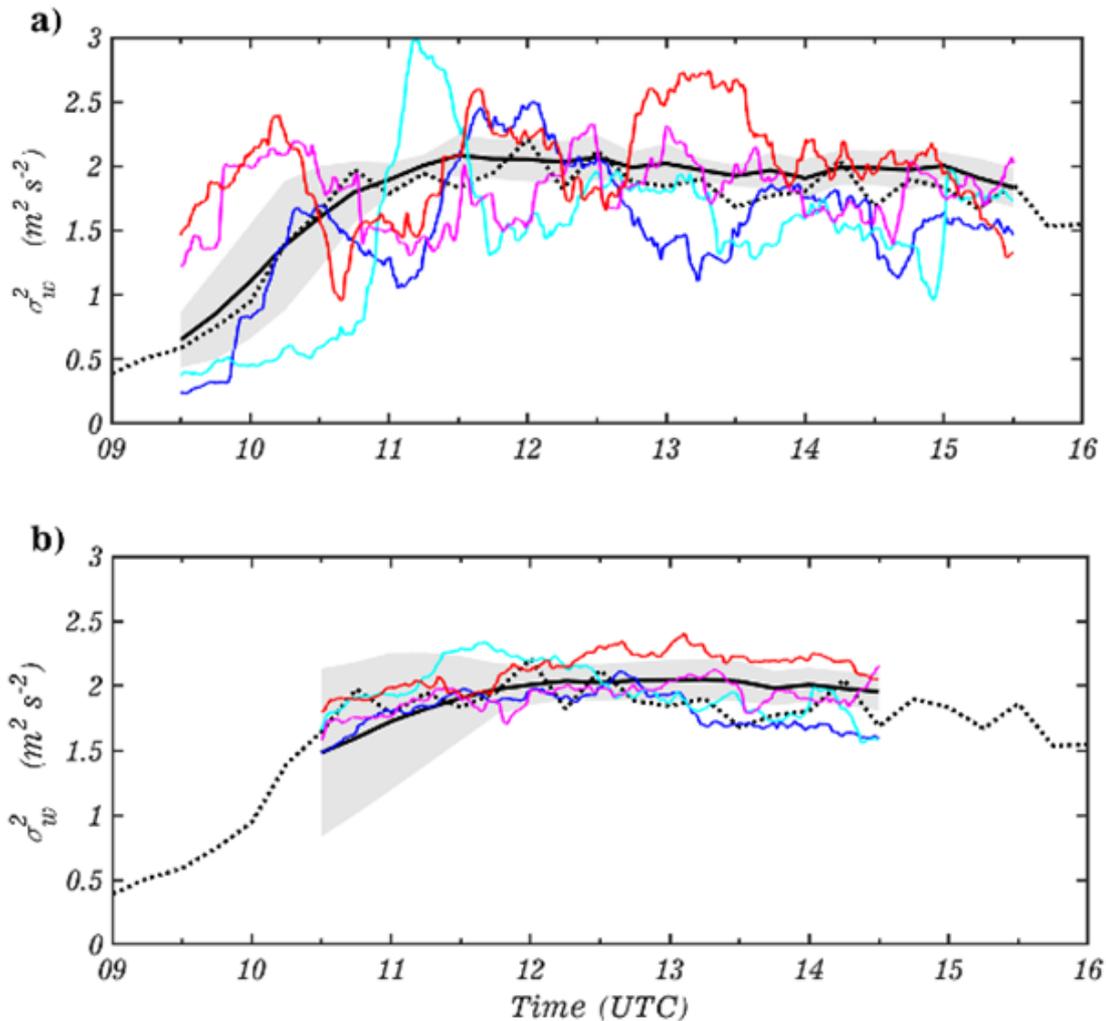


Abb. 3.4.12: Zeitreihen von  $\sigma_w^2$  auf der Höhe von 350 m agl, (a) stündlich gleitend und (b) dreistündlich gleitend von Vertikalwinden aus Referenzdaten an den Positionen cityhall (rot), cityafus (lila) und aus Simulationsdaten an den Positionen cityhall (blau), cityafus (himmelblau). Die gepunktete Linie in a) und b) zeigt  $3 \times 3 \text{ km}^2$  räumlich aggregierte  $\sigma_{w,3 \times 3}^2$  und die durchgezogene schwarze Linie in a) stündlich gleitende in b) dreistündlich gleitende Mittelwerte, die aus  $\sigma_{w,3 \times 3}^2$  berechnet sind. Die Standardabweichung ist grau hinterlegt.

Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Lidar-Geräte reicht für eine adäquate PALM-Evaluierung nicht aus, wie NRMSE-Werte von 17 bzw. 22 % zeigen. Für die weitere Modellevaluierung wurde eine notwendige Zahl zwischen 9 und 25 Lidaren errechnet. Mit deren stündlicher Statistik ließe sich der NRMSE-Wert auf bis zu 10 % reduzieren (Kiseleva et al. 2023). Für den NRMSE wurde der RMSE mit dem Tagesmittelwert von  $\sigma_w^2$  ( $1.8 \text{ m s}^{-1}$ ) normiert.

## Hamburg

Die Synergien des vierfach methodischen Ansatzes aus Naturmessungen, Windkanalexperimenten sowie zugehörigen realen und idealisierten PALM-4U Simulationen stellen die Grundlage für eine umfassende und detaillierte Evaluation der Turbulenz dar. Dabei werden in PALM-4U unter anderem die Varianzen, Turbulenzintensitäten sowie der Wind im Allgemeinen in der Grenzschicht als auch in der Nähe von vertikalen Oberflächen wie beispielsweise Gebäudefassaden untersucht.

Für die Evaluation der Turbulenz in der Grenzschicht wurden realistische mit dem COSMO-D2 Modell angetriebene Simulationen für den August 2020 für ein Gebiet von  $6.4 \times 6.4 \times 4.8$  km und einer Gitterweite von 10 m sowie einem verfeinerten Gebiet von  $480 \times 480 \times 480$  m rund um den 300 m hohen Wettermast Hamburg im Osten der Stadt durchgeführt. Der Wettermast Hamburg bietet dabei die recht einzigartigen 20 Hz Turbulenzmessungen der gesamten Grenzschicht, sodass sich dieses Gebiet ideal für die Untersuchung der Turbulenz eignet. Darüber hinaus wird die kleinskalige Turbulenz an vertikalen Oberflächen wie zum Beispiel Fassaden von Hochhäusern mit Hilfe von Windkanalexperimenten und den zugehörigen idealisierten PALM-4U Simulationen detailliert analysiert. Durch die spezifischen Untersuchungen und notwendigen Turbulenzmessungen in der gesamten Grenzschicht, die nicht für das Gebiet der großen PALM-4U Simulationen vorhanden sind, wurden hierfür extra neue spezifische Simulationen erstellt und durchgeführt.

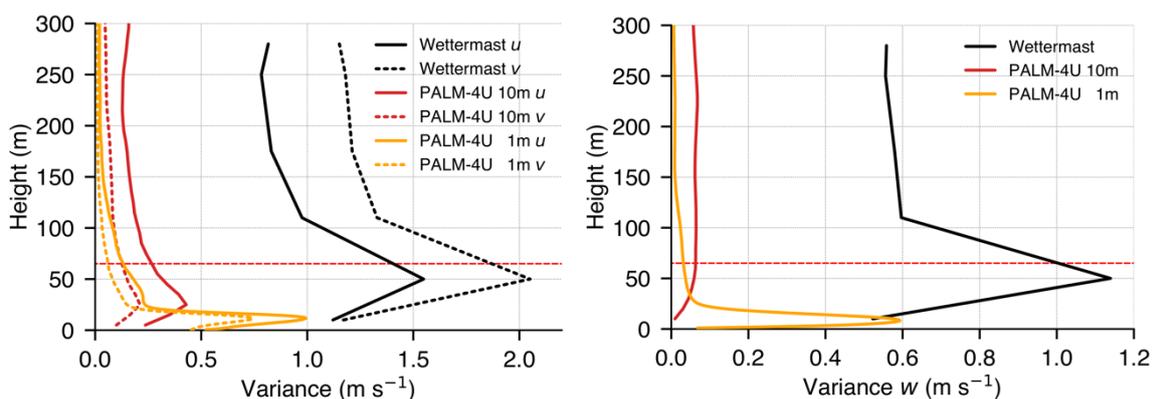


Abb. 3.4.13: Mittlere Varianz der beiden horizontalen  $u, v$  (links) und der vertikalen  $w$  (rechts) Windkomponenten in der gesamten Grenzschicht am 23. August 2020 auf Basis der hochaufgelösten 20 Hz Messungen am Wettermast Hamburg sowie der PALM-4U Simulation mit 10 m und 1 m Gitterauflösung in allen drei Raumrichtungen.

Die mittlere Wetterentwicklung wie zum Beispiel der 2 m Temperatur oder des 10 minütigen Mittelwinds in Bodennähe, werden gut von PALM-4U wiedergegeben (nicht gezeigt). Der Grund hierfür liegt darin, dass diese Informationen bereits korrekt von den Antriebsdaten des

COSMO-D2 Modells vorgegeben und übernommen werden.

Der große Mehrwert von hochaufgelösten Large Eddy Simulationen (LES) für die Untersuchung des Stadtklimas mit Modellen wie dem PALM-4U besteht insbesondere in der expliziten Auflösung der Turbulenz wie beispielsweise von Windböen. Qualitativ betrachtet sind die simulierten Profile der turbulenten kinetischen Energie sowie der Varianzen der drei Windkomponenten ähnlich zu den Naturmessungen. Bei der genauen quantitativen Betrachtung fällt hingegen auf, dass die Werte von PALM-4U in der gesamten Grenzschicht substanziell unterschätzt werden (Abb. 3.4.13).

Die höhere Auflösung der 1 m Gitterweite für den exemplarisch analysierten 23. August 2020 zeigt im Speziellen bodennah eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Beobachtungsdaten bis in etwa 30 m ü.G. (Abb. 1b). Aufgrund der zu geringen Turbulenz im Modell werden beispielsweise auch die für die Praxis relevanten Parameter und Phänomene wie zum Beispiel Windböen in der Tendenz unterschätzt, wobei die Ursachen weiter untersucht werden.

Der Effekt von nicht explizit aufgelösten kleinskaligen Objekten wie z.B. Balkonen in Large-Eddy Simulationen auf die wandnahe Strömung wird mit Hilfe eines idealisierten Windkanalexperiments evaluiert. Dabei wurden Strömungsmessungen über Oberflächen mit unterschiedlichen Rauigkeiten im WOTAN Windkanal der Universität Hamburg durchgeführt. Zur direkten Evaluation der Impulsrandbedingungen wurden komplementäre und idealisierte PALM-4U Simulationen für die durchgeführten Windkanalexperimente gerechnet. Der Vergleich der PALM-4U Simulationen mit den Daten aus dem Windkanal zeigt auf, dass die mittleren Windgeschwindigkeiten und die wandparallelen Varianzen durch PALM-4U gut reproduziert werden. Allerdings werden die wandnormalen turbulenten Flüsse als auch Varianzen des Modells deutlich unterschätzt, wie in Abb. 3.4.14 zu sehen ist. Vergleichbare und konsistente Ergebnisse wurden bei den realistischen PALM-4U Simulationen für den Wettermast Hamburg gefunden. Dieses Beispiel zeigt sehr eindrücklich den großen Mehrwert des vierfach methodischen Ansatzes zur Evaluation des Modells, da hierdurch Ergebnisse von unterschiedlichen Herangehensweisen untersucht und die Aussagen damit abgesichert werden können. Die erfassten Daten aus dem Windkanal liefern eine ideale Grundlage für eine weitergehende und detaillierte Evaluation der Turbulenz an städtischen Oberflächen in PALM-4U.

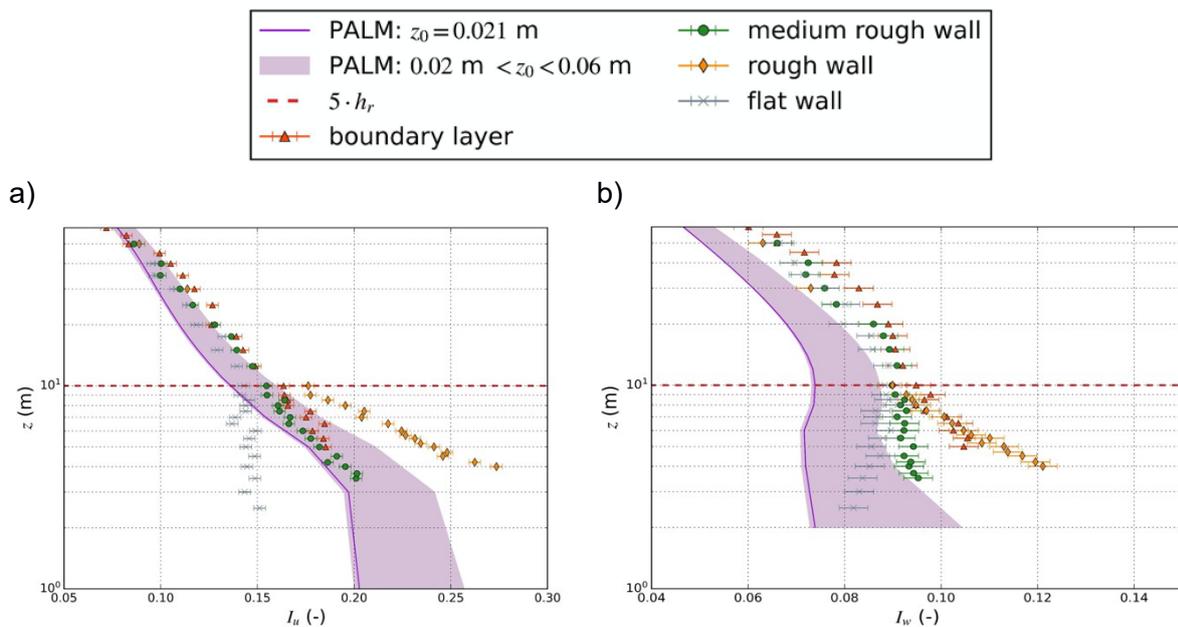


Abb. 3.4.14: Wand-parallele (a) und wand-normale (b) Turbulenzintensitäten für verschieden raue Oberflächen sowie die entsprechenden PALM-4U Simulationen mit unterschiedlichen Rauigkeiten.

Das Windkanalexperiment zur Untersuchung der wandnahen Strömungsunterschiede in PALM-4U ermöglicht vor allem Aussagen für den idealisierten Fall. Dabei hat die Strömung ausreichend Raum, so dass sie sich unter den vergleichsweise homogenen Bedingungen an den Wechsel der Oberflächenrauigkeit anpassen kann. Mit Hilfe des idealisierten Falls können zwar die physikalischen Effekte besser voneinander getrennt werden, jedoch bleibt dabei zugleich offen, inwiefern Rauigkeitsunterschiede von vertikalen Wänden wie Fassaden ebenfalls in komplexeren Strömungsfällen in Städten den wandnahen Wind sowie die Turbulenz verändern.

Windkanalexperimente an vertikalen Fassaden eines einzelnen freistehenden Modellgebäudes wurden in Phase 2 des Projektes ebenfalls durchgeführt. Das weitere Experiment gilt der Ergänzung der oben vorgestellten Ergebnisse für komplexere Strömungsfälle. Hierfür wurden drei Modellgebäude angefertigt, welche jeweils eine unterschiedliche kleinskalige Fassadenstruktur aufweisen (glatt, rau, mäßig rau). Die Modellgebäude wurden im Maßstab von 1:150 angefertigt und sind im Realmaßstab jeweils 50.4 m hoch, 76.5 m lang und 34.5 m breit und entsprechen der Größenordnung nach den Grindelhochhäusern in Hamburg oder vergleichbaren Bauten. Die kleinskalige Fassadenstruktur weist eine Tiefe von  $h_r = 0.9$  m auf und liegt damit leicht unterhalb den üblichen Gitterweiten in Stadtklimasimulationen. Die drei Modellgebäude sowie die Platzierung dieser im Windkanal sind in Abb. 3 zu sehen. Die wandnahe Strömung über allen Fassadenrauigkeiten wurde für drei verschiedene Strömungsfälle untersucht: seitliche Strömung am Gebäude (siehe auch Abb. 3.4.15 (a)) sowie Luv und Lee des Gebäudes.

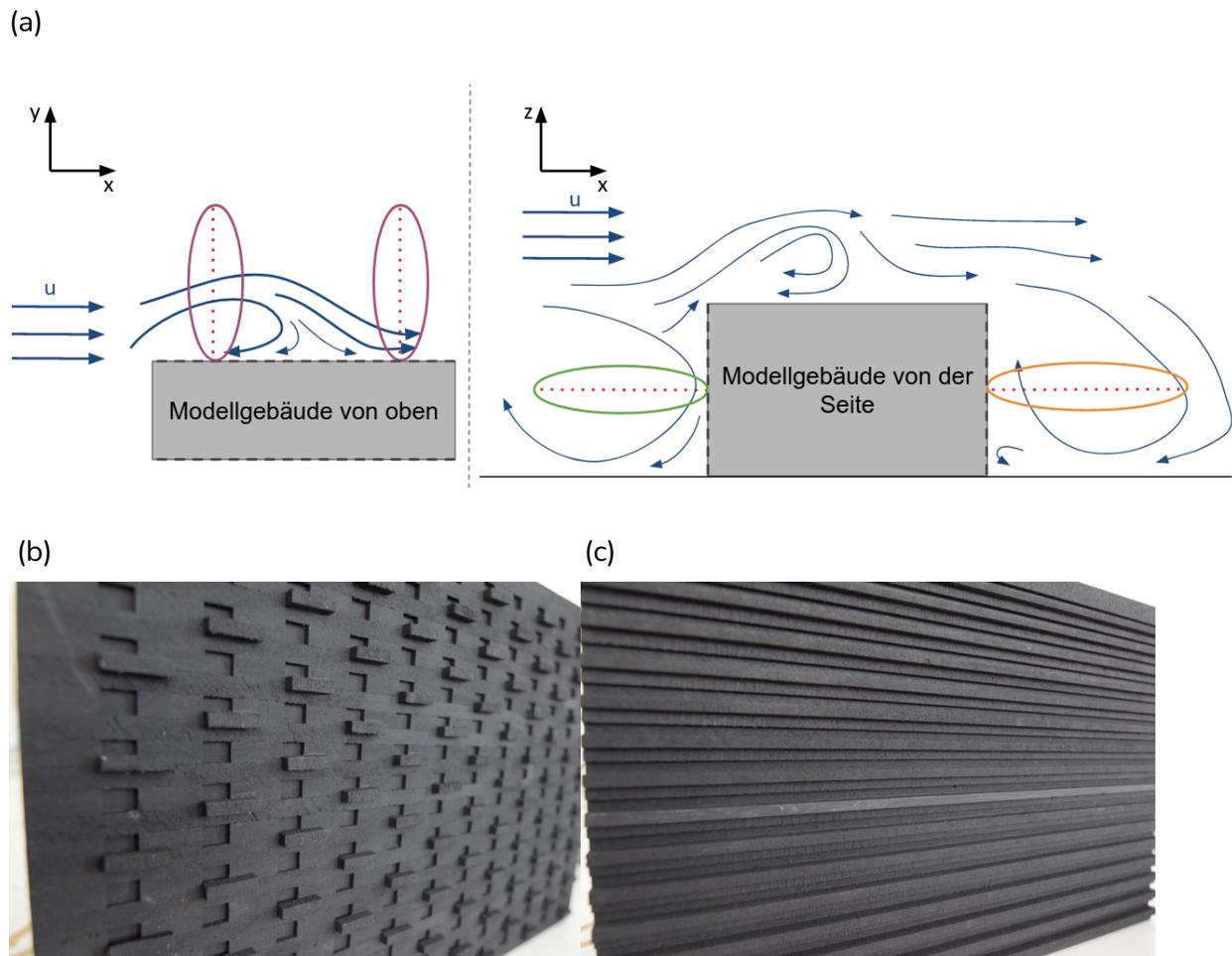


Abb. 3.4.15: Die Modellgebäude wurden im Windkanal WOTAN als freistehende Gebäude platziert. Abb. (a) zeigt die Positionen der Messprofile im Windkanal und in den PALM-4U Simulationen. Die in lila markierten Messprofile sind bei seitlicher Anströmung aufgenommen worden. In grün ist das Messprofil im Luv und in orange das Profil im Lee des Modellgebäudes markiert. Detailaufnahmen der Fassadenrauigkeiten der Modellgebäude im Windkanal mit mäßig rauer Fassade (b) und rauer Fassade (c) sind ebenfalls dargestellt.

Die Umströmung der glatten Fassade wurde als Referenzfall zusätzlich mit PALM-4U modelliert. Hierfür wurde die Anströmungsgrenzschicht des Windkanals mit einer Modellauflösung von 1 m in PALM-4U modelliert. Es wurden zyklische laterale Randbedingungen und ein konstanter Volumenfluss vorausgesetzt. Zudem mussten die zur Turbulenzerzeugung im Windkanal verwendeten Bodenrauigkeiten im LES-Modell explizit aufgelöst werden, um die bodennahen mittleren Windprofile und Turbulenzeigenschaften der Anströmungsgrenzschichten im Windkanal- und PALM-4U in Übereinstimmung zu bringen.

Für alle Strömungsfälle gilt, dass die jeweils wandparallele Geschwindigkeitskomponente (für seitliche Anströmung  $u$ , für Luv und Lee die  $w$ -Komponente) in den Windkanalmessungen Unterschiede je nach Fassadenrauigkeit aufweist. Diese Unterschiede treten vorrangig im wandnahen Bereich ( $< 5 h_r$ ) auf, während die mittleren Geschwindigkeiten im wandfernen Bereich ( $> 5 h_r$ ) übereinstimmen. Exemplarisch ist dies in Abb. 3.4.16 für die

seitliche Strömung und die Strömung vor dem Gebäude in mittlerer Gebäudehöhe zu sehen. In den wandnormalen Geschwindigkeitsprofilen sind zudem die entsprechenden PALM-4U Ergebnisse zu sehen. Die Simulationsergebnisse stimmen im wandfernen Bereich mit den Windkanalmessungen überein. Die wandnahe mittlere Strömungsgeschwindigkeit wird jedoch von PALM-4U unterschätzt, sodass auch die Unterschiede in den Fassadenrauigkeiten nicht repliziert werden können.

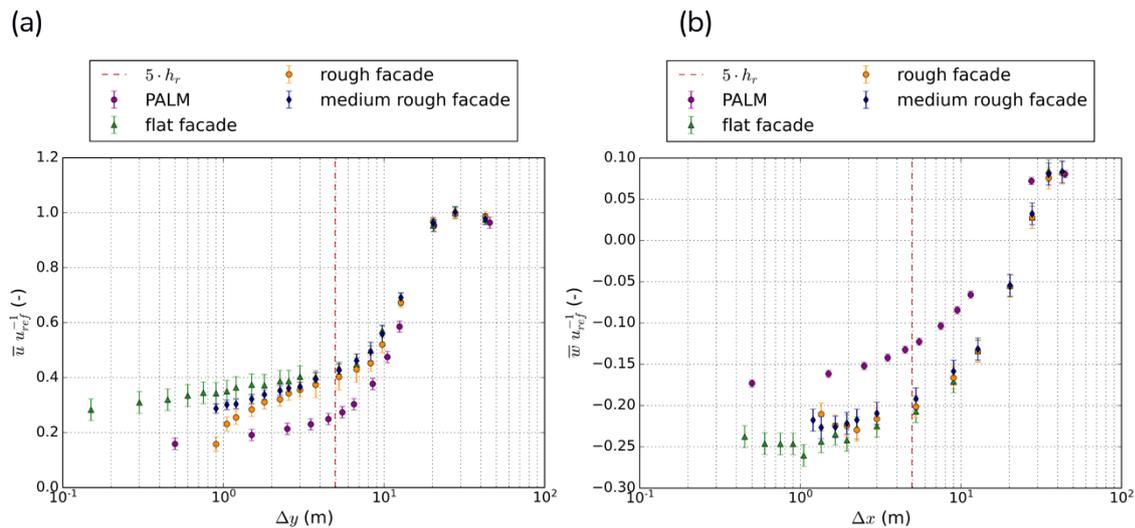
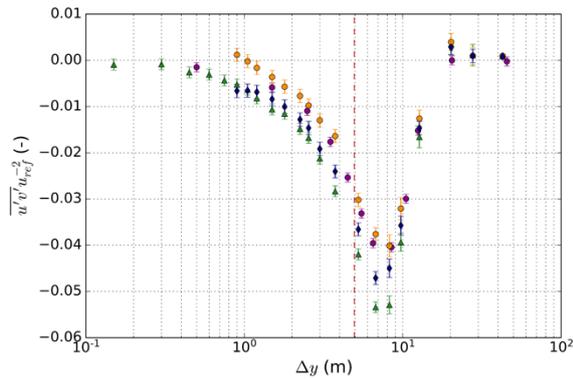


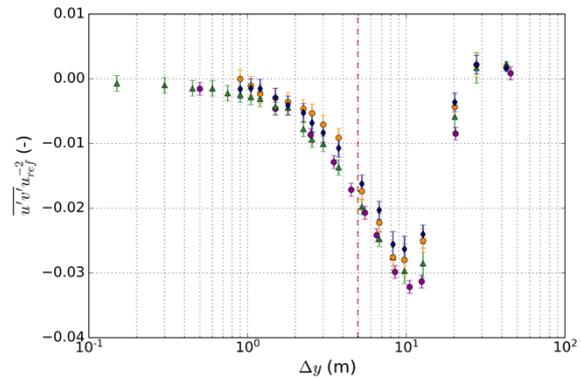
Abb. 3.4.16: Logarithmische wandnormale Profile der jeweiligen wandparallelen mittleren Geschwindigkeiten für die seitliche Anströmung (a) und für die Strömung vor dem Modellgebäude (b) auf mittlerer Gebäudehöhe. Die mittleren Geschwindigkeiten wurden durch die Referenzgeschwindigkeit  $u_{ref}(z = 45 \text{ m})$ , gemessen in der Anströmung vor dem Gebäude, normiert.

Zur Untersuchung der Turbulenz wurden neben einer Quadrantenanalyse, der Analyse der (Co-)Spektren auch Profile der wandnormalen turbulenten Flüsse betrachtet. Abb. 3.4.17 zeigt die turbulenten Flüsse (Kovarianzen) als Funktion des Wandabstandes. Die PALM-4U Simulationen können auch die Turbulenzeigenschaften replizieren. Insbesondere bei einer seitlichen Anströmung des Modellgebäudes stimmen die Simulationsergebnisse gut mit den Windkanalmessungen überein. Allein die in Abb. 3.4.17 (a) beobachtbaren Turbulenzunterschiede im wandnahen Bereich bei unterschiedlicher Fassadenrauigkeit kann entsprechend vom PALM-4U Modell nicht repliziert werden. Dies ist jedoch auch erwartbar, da die Rauigkeitsunterschiede in den Fassaden nicht explizit aufgelöst werden.

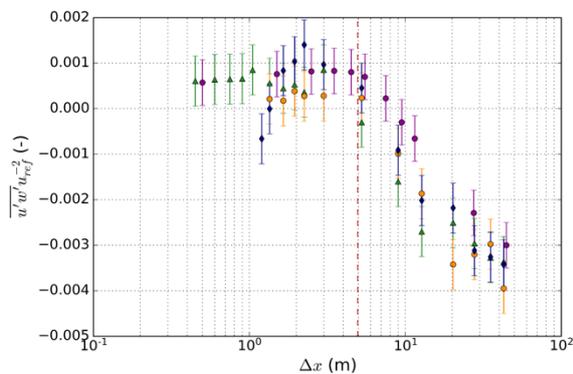
(a)



(b)



(c)



(d)

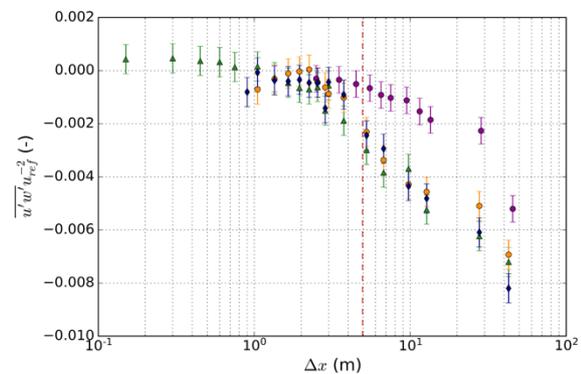


Abb. 3.4.17: Logarithmische wandnormale Profile der jeweiligen wandnormalen turbulenten Flüsse  $u'v'$  bzw.  $u'w'$  für die seitliche Anströmung vor dem Staupunkt (a), die seitliche Anströmung hinter dem Staupunkt (b), für die Strömung vor (c) und hinter dem Modellgebäude (d) auf mittlerer Gebäudehöhe. Die Legende entspricht jener aus Abb. 3.4.16.

Zur genaueren Untersuchung der Fluktuationen der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten wurde eine Quadrantenanalyse durchgeführt. Die Profile der durch den turbulenten Gesamtfluss (Abb. 3.4.17) normierten Quadranten-Anteile geben Aufschluss darüber, ob gerichtete Bewegungen im Strömungsfeld dominieren. Beispielhaft werden in Abb. 3.4.18 die Profile der Quadrantenanteile für das hintere Profil bei seitlicher Anströmung (Abb. 3.4.15 (a)) dargestellt. Auffällig ist, dass die wandnahen Quadrantenanteile in den Windkanalmessungen für die Quadranten Q2 und Q3 größer sind als in der PALM-4U Simulation. Nichtsdestotrotz stimmen die turbulenten Gesamtflüsse aus den Windkanalmessungen und der PALM-Simulation überein (Abb. 3.4.17 (b)). Das Beispiel aus Abb. 3.4.18 zeigt, dass PALM-4U zwar die turbulenten Flüsse korrekt vorhersagen kann, die in der Windkanalströmung beobachtete wandnahe Anisotropie jedoch nicht vollständig repliziert. In den Windkanaldaten überwiegen negative Fluktuationen in x-Richtung. Dieser

Effekt wird im LES-Modell nicht mit aufgelöst. Solche Unterschiede können zu einer Fehlkalkulation im Wärmetransport oder Partikeltransport an Wänden führen. Für Messprofile an anderen Positionen und bei anderen Oberflächenrauigkeiten ist der oben genannte Effekt auch beobachtbar.

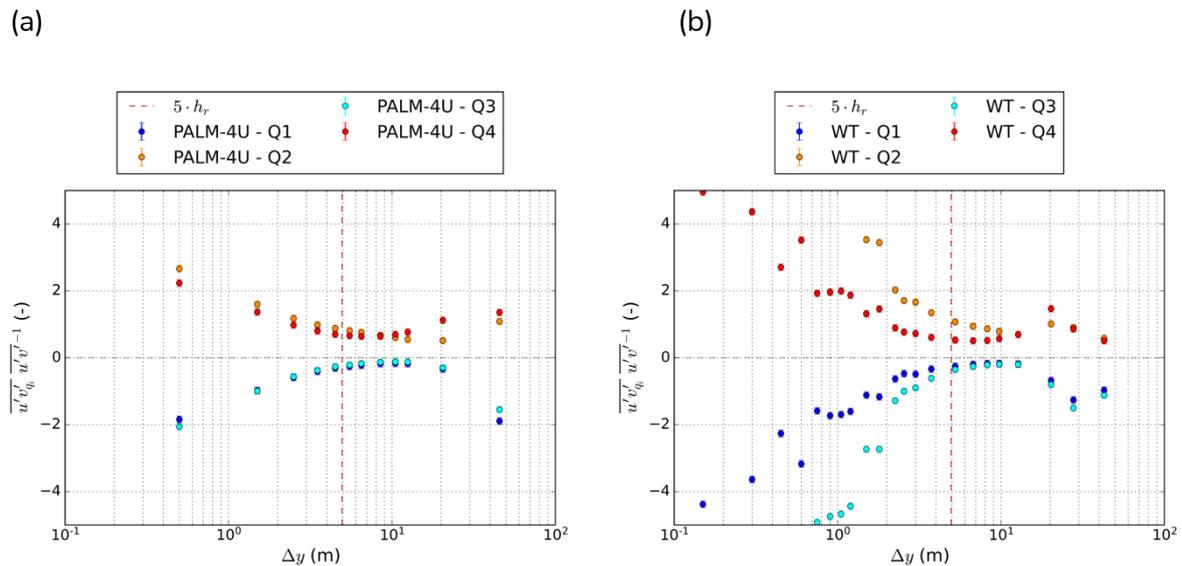


Abb. 3.4.18: Logarithmische wandnormale Profile der jeweiligen Quadrantenanteile der turbulenten Flüsse für die seitliche Anströmung hinter dem Staupunkt in der PALM-4U Simulation und für die Windkanalmessung bei glatter Fassade.

### 3.5. Thermischer Wirkungskomplex

#### Berlin

#### Sommerlauf VALM02 bzw- VALM02v2

Die biometeorologische Station (BIOMET) der TU Berlin war für die sommerliche Messkampagne auf dem Schulhof des Oberstufenzentrums Körperpflege in Berlin-Charlottenburg installiert. Dabei handelt es sich um eine "geometrisch einfache" Umgebung.

Aus den Daten ergeben sich vier Indizes, mit denen die thermische Rezeption menschlicher Organismen quantifiziert werden kann. Als Referenzwert für die Berechnung der Indizes aus den Messwerten wurde eine 35-jährige männliche Person mit einem Körpergewicht von 75 kg, 175 cm Körpergröße, einer metabolischen Rate von  $80 \text{ W m}^{-2}$  und einem Clothing-Index von 0,9, was einer leichten Sommerbekleidung entspricht. Es handelt sich dabei um die mittlere Strahlungstemperatur (MRT), die physiologisch äquivalente Temperatur (PET), die gefühlte Temperatur (PT) sowie den universellen thermischen Klimaindex (UTCI).

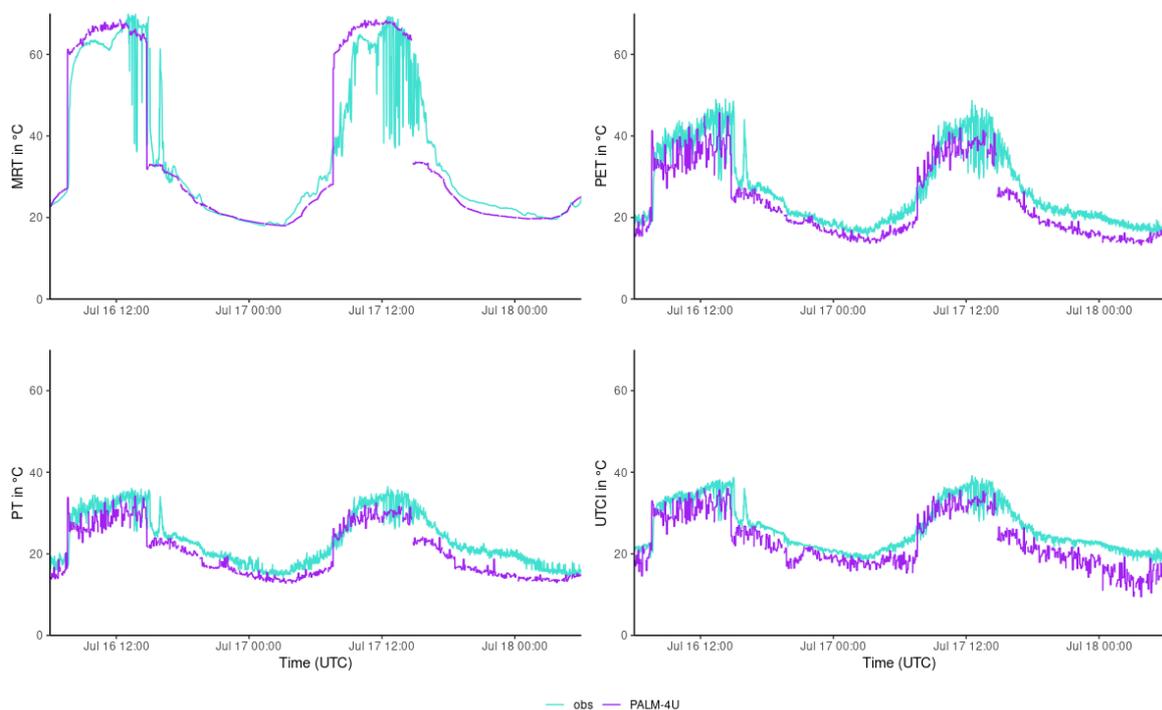


Abb. 3.5.1: Aus Messwerten berechnete (türkis) und im Modell simulierte (violett) bioklimatische Indizes während der Periode VALM02/VALR02 am Standort schillerosz, Quelle: TUBklima.

Es zeigt sich in Abb. 3.5.1, dass wie bereits bei der Simulation der Lufttemperatur PT, PET und der UTCI über weite Strecken der Validierungsperiode leicht unterhalb der gemessenen Werte liegen. Dabei wird der Tagesverlauf treffend wiedergegeben, was sich an den sehr hohen Korrelationskoeffizienten zeigt (Tab. 3.5.1). Die mittlere Strahlungstemperatur wird insbesondere vom späten Nachmittag bis in die frühen Morgenstunden mit einer sehr hohen Akkuratheit vorhergesagt. Jeweils kurz vor 12:00 UTC liegen die simulierten Werte oberhalb der gemessenen. In den frühen Nachmittagsstunden, in denen der Bewölkungsgrad am stärksten schwankt und sich Verschattungseffekte bemerkbar machen, fluktuieren die Messwerte stark, wohingegen der Verlauf der simulierten Kurve glatt ist, im Mittel aber wiederum gut mit den Messungen übereinstimmt.

Tab. 3.5.1: RMSE und Pearson-Korrelationskoeffizient für die vier biometeorologischen Indizes. Quelle: TUBklima

Gütemaß	MRT	PET	PT	UTCI
RMSE	7.02 K	4.81 K	3.92 K	4.54 K
r-pears	0.93	0.93	0.93	0.90

## 3.6. Luftchemie

### 3.6.1. Partikel

#### Berlin

##### Winterlauf VALM01 bzw- VALM01v2

TP2 hat PM10-Messungen am ERP-Messstandort in Berlin-Charlottenburg auf dem Dach der Südfassade des TU Mathematik Gebäudes durchgeführt. Die Messungen wurden mit dem Grimm 1.109 Gerät durchgeführt. Das Gerät misst zusätzlich zu PM10 auch PM1 und PM2.5. Hier wird nur PM10 behandelt, da PALM die Dispersion von PM2.5 und PM1 nicht simuliert.

Abb. 3.6.1 zeigt die beobachteten Messungen (schwarz) und die simulierten Messungen (orange). Insbesondere in den Morgenstunden Das PALM-Modell (orange) unterschätzt die beobachtete (schwarz) PM-Konzentrationen um das fast 20-fache, wobei die Konzentration in den davor liegenden Zeiträumen qualitativ gut wiedergegeben wird.

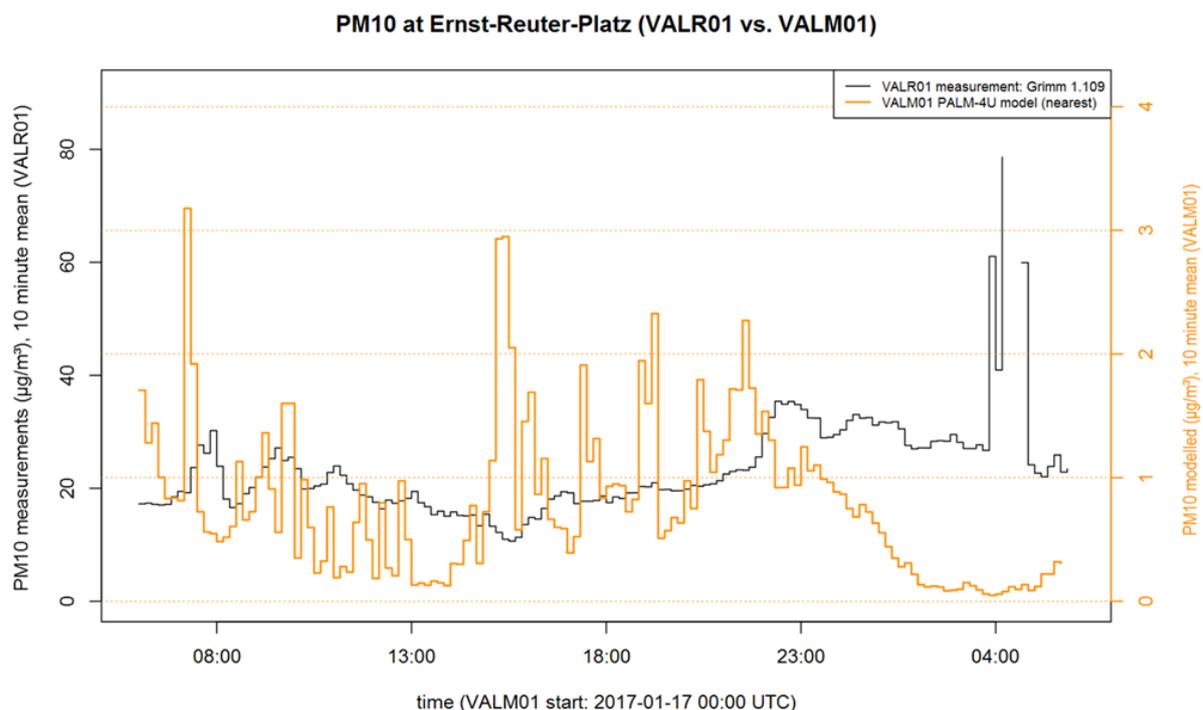


Abb. 3.6.1: 10-Minuten-Mittelwerte der beobachteten PM10-Konzentration (schwarz) und der simulierten PM10-Konzentration (orange) während der VAL01-Simulationsperiode vom 17.01.2017 06:00 UTC bis zum 18.01.2017 06:00 UTC.

##### Sommerlauf VALM02 bzw- VALM02v2

Für den Simulationszeitraum VALM02 führte TP2 Feinstaubmessungen am Standort Berlin-Adlershof durch. Die PM10-Messungen wurden in Berlin-Adlershof im Klimagarten des

Geographischen Instituts gemessen. Der Sensor wurde 2 m über Grund . Die Messungen wurden mit dem Gerät Grimm 107 durchgeführt. Das Gerät misst neben PM10 auch PM1 und PM2.5, wobei hier nur PM10 behandelt wird, da das PALM-Modell PM2.5 und PM1 nicht simuliert.

Abb. 3.6.2 zeigt den 10-Minuten-Mittelwert der beobachteten (schwarz) und die simulierten Messungen (orange). Insgesamt unterschätzen die PALM-Simulationen die Beobachtungen ganztägig um etwa  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Allerdings unterschätzt PALM die Konzentration in der Nacht um etwa  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Der Tagesgang wird von PALM jedoch beibehalten.

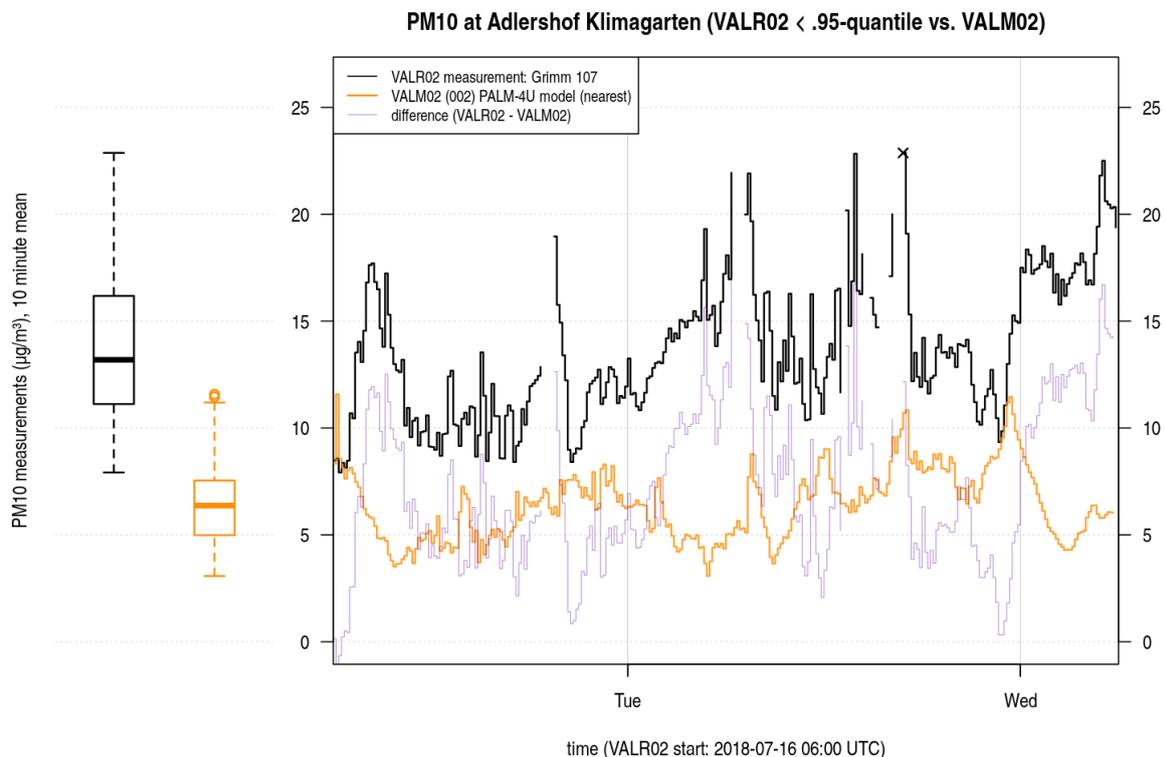


Abb. 3.6.2: 10-Minuten-Mittelwert der beobachteten (schwarz) und simulierte PM10 Konzentration (orange) während der VAL02-Simulationsperiode (16.07.2018 06:00 UTC bis 18.07.2018 06:00 UTC).

Abb. 3.6.3 zeigt die 1-Minuten-Mittelwerte der beobachteten (schwarz) und der simulierten Messungen (orange) für eine Fahrrad-Trajektorie. Die Fahrradmessungen wurden auf einer 27 km langen Strecke in Adlershof durchgeführt. Sie umfasste verschiedene Landnutzungsklassen, Straßentypen und lokale Klimazonen einschließlich stark befahrener Straßen in Autobahnnähe und Grünflächen. Die von PALM simulierten Daten folgen keinem erkennbaren Trend wie die Messung der Fahrradtrajektorie. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass die PALM-Ausgabe für diesen Vergleich vom nächstgelegenen Punkt gesammelt

109

wird und daher nicht exakt ist. Es ist jedoch auch möglich, dass die Verwendung eines kostengünstigen Sensors für die PM10-Messung zusätzliche Unsicherheiten in den Daten mit sich bringt.

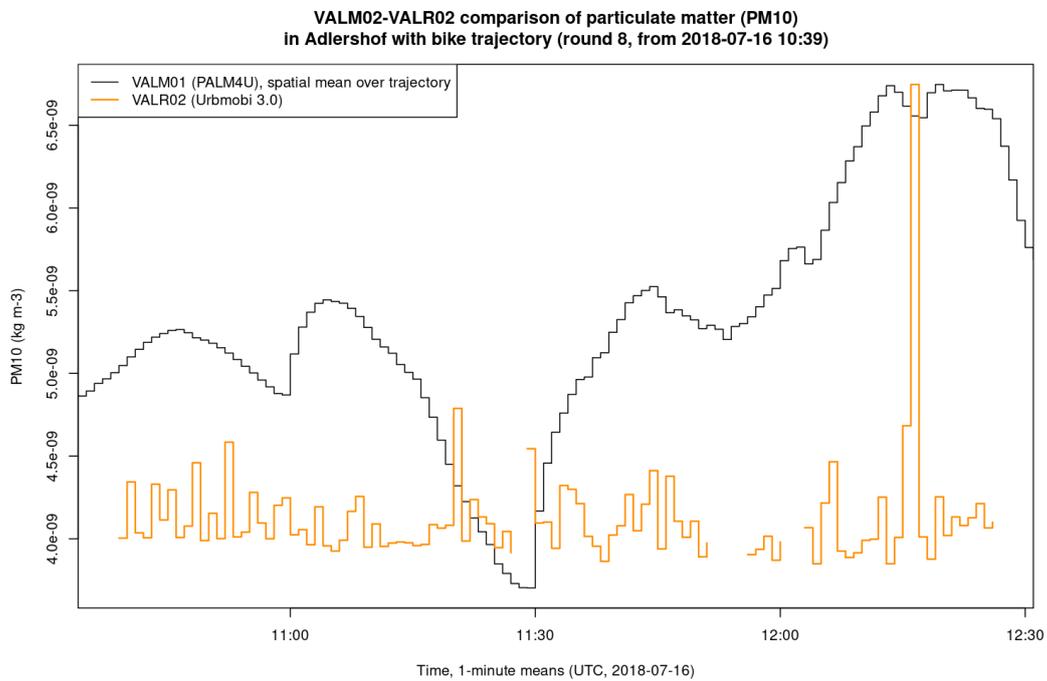


Abb. 3.6.3: 1-Minuten-Mittelwert der beobachteten PM10 Konzentration (schwarz) und simulierte PM10 Konzentration (orange) für eine Fahrradtrajektorie während der VAL02-Simulationsperiode vom 16.07.2018 06:00 UTC bis zum 18.07.2018 06:00 UTC.

## Stuttgart

### VALM04

Abb. 3.6.4 zeigt die stündliche mittlere Konzentrationsverteilung des beobachteten (OBS) PM10 mit Simulationsergebnissen (MOD\_c1 und MOD\_pa) während der Validierungsperiode VAL04 am Marienplatz von 05:00 UTC am 8. Juli bis 19:00 UTC am 9. Juli 2018. Am 8. Juli, die simulierten PM10-Konzentrationen für MOD\_pa und MOD\_c1 stiegen die Werte in den Morgenstunden von 05:00 UTC bis 11:00 UTC unterschiedlich stark an, wobei die maximalen Konzentrationen gegen Mittag bei etwa  $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  lagen, im Gegensatz zur beobachteten (OBS) Konzentration mit einem Maximum von etwa  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gegen 05:00 UTC. Während die simulierten PM10-Konzentrationen für MOD\_pa und MOD\_c1 asymmetrisch um 13:00 UTC bis 15:00 UTC bzw. 18:00 UTC abnahmen, fiel die beobachtete Partikelkonzentration umgekehrt bereits von 06:00 UTC bis 10:00 UTC leicht ab Anstieg um etwa  $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  um 11:00 UTC. Am Nachmittag lässt sich interpretieren, dass die simulierten PM10-Konzentrationen bis 18:00 UTC von der beobachteten Konzentration schwankten und gegen 17:00 UTC ein Anstieg der gemessenen Partikelkonzentration zu beobachten war. Am Abend, von 19:00 UTC bis 02:00 UTC am nächsten Tag, folgten die simulierten Ergebnisse (MOD\_pa und MOD\_c1) einem ähnlichen Trend wie die gemessenen Ergebnisse, jedoch mit niedrigeren PM10-Konzentrationen. Dieser Vergleich zeigt einen Rückgang der simulierten Partikelkonzentrationen um mehr als 70% im Vergleich zur beobachteten Konzentration innerhalb der angegebenen Zeit.

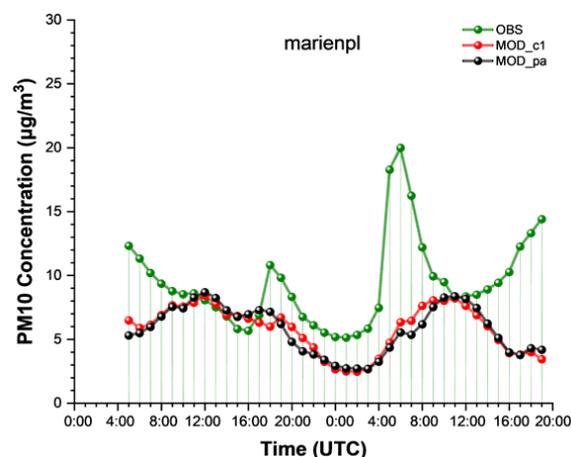


Abb. 3.6.4: Vergleich der stündlichen mittleren PM10-Konzentrationsverteilung zwischen VALM04 simulierten (MOD) und gemessenen (OBS) Werten am Marienplatz, Quelle: USifk.

Aus der stündlichen durchschnittlichen PM10-Konzentrationsverteilung am 9. Juli 2018 ist ersichtlich, dass die simulierten und beobachteten PM10-Konzentrationen in den frühen Morgenstunden um 03:00 UTC zu steigen begannen. Die simulierten (MOD\_pa und MOD\_c1) und beobachteten (OBS) PM10 Partikelkonzentrationen stiegen weiter an, erreichten jedoch uneinheitlich zu unterschiedlichen Zeiten Spitzenwerte; Die Spitzenkonzentration von MOD\_pa und

MOD\_c1 von jeweils etwa  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  wurde um etwa 11:00 UTC beobachtet, während das OBS früher um etwa 06:00 UTC eine maximale Spitzenkonzentration von etwa  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  aufwies. Die simulierten Konzentrationen begannen, im Widerspruch zu den beobachteten, vom Mittag bis 16:00 UTC zu sinken und stiegen dann am Abend leicht an, wobei die jeweilige maximale Konzentration  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  erreichte. Andererseits sank die gemessene Partikelkonzentration plötzlich um etwa 07:00 UTC bis 11:00 UTC und stieg dann von Mittag bis 19:00 UTC wieder an, mit einer maximalen Konzentration von etwa  $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , was innerhalb dieser Zeit etwa dem Faktor 2.5 mehr im Vergleich von den simulierten PM10-Konzentrationen entspricht.

#### PALM-4U v22.10

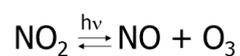
Im Simulationsverlauf wurde der Partikeltransport-Prozess auf der Mikroskala qualitativ sinnvoll abgebildet. Allerdings verdeutlichte sich beim quantitativen Vergleich, dass korrekte Emissionswerte einen erheblichen Einfluss auf die resultierenden Konzentrationen haben. Diese Analyse konnte im Berichtszeitraum nicht vollständig abgeschlossen werden.

### 3.6.2. Spurengase

#### Berlin

##### Winterlauf VALM01 bzw- VALM01v2

Im Projekt wurde für alle Simulationen ein Chemiemodul eingesetzt, das lediglich die Spurengase Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) und Ozon ( $\text{O}_3$ ) beschreibt. Die Verbindungen sind durch das photostationäre Gleichgewicht miteinander verbunden.



Die Konzentration der Verbindungen, besonders von Ozon, wird maßgeblich von den Parametern am Rand des Modells bestimmt und vom Modell Cosmo vorgegeben.

Die Ausgaben des Modells VALM01 wurden mit den Mischungsverhältnissen, die vom mobilen Messlabor MobiLab beobachtet wurden, verglichen. Für die Validierung des Modelllaufes VALM01 lag zunächst nur die Ausgabe für x- und y-Koordinaten von MobiLab in 35 m ü.G. vor. Da die Atmosphärenzusammensetzung in dieser Höhe stark von den Hintergrundkonzentrationen bestimmt wird, wurde die Modellausgabe nicht nur mit den MobiLab-Messwerten, sondern auch mit Daten von Stationen im Umland von Berlin verglichen. Abb. 3.6.5 zeigt, dass das Mischungsverhältnis von Ozon im Modell nicht nur geringer als das der Hintergrundstationen ist, selbst die Werte, die vom MobiLab gemessen

wurden, sind höher, obwohl sie eigentlich wegen der höheren Stickoxidwerte in Bodennähe geringer sein sollten.

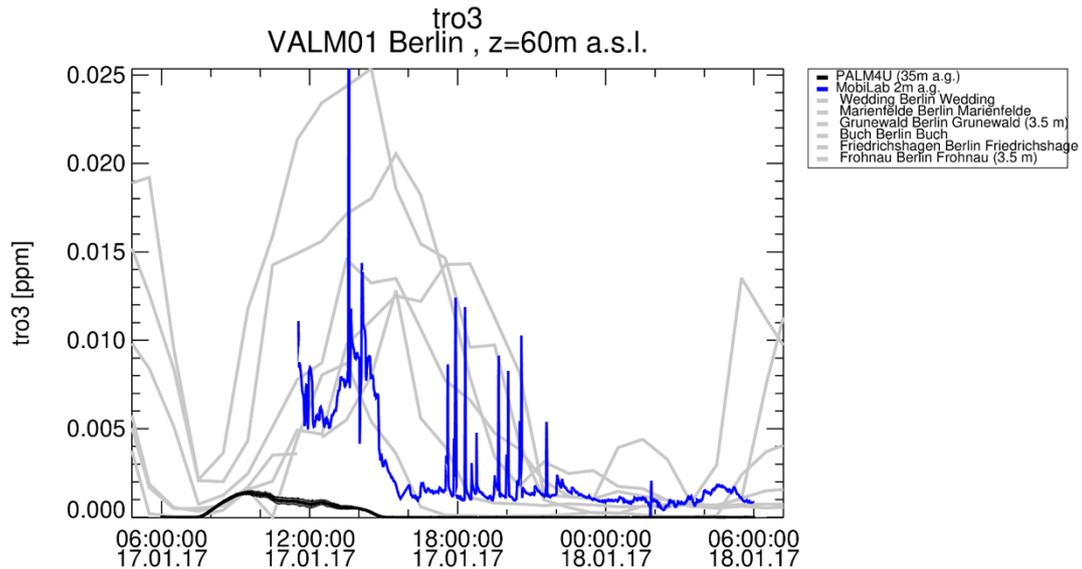


Abb. 3.6.5: Vergleich des Ozonmischungsverhältnisses ( $trO_3$ ) simuliert von PALM-4U für 35 m Höhe über Grund mit den beobachteten Daten von Mobilab (blau) und verschiedenen Stationen im Hintergrund von Berlin. Quelle: FZJiek8.

Zur weiteren Analyse wurde dann das mittlere Höhenprofil vom Ozon im Modell in Abhängigkeit der Zeit untersucht. Es stellte sich heraus, dass das simulierte Mischungsverhältnis auf sämtlichen Höhen des Modells mit der Zeit über mehrere Größenordnungen abnahm (Abb. 3.6.6).

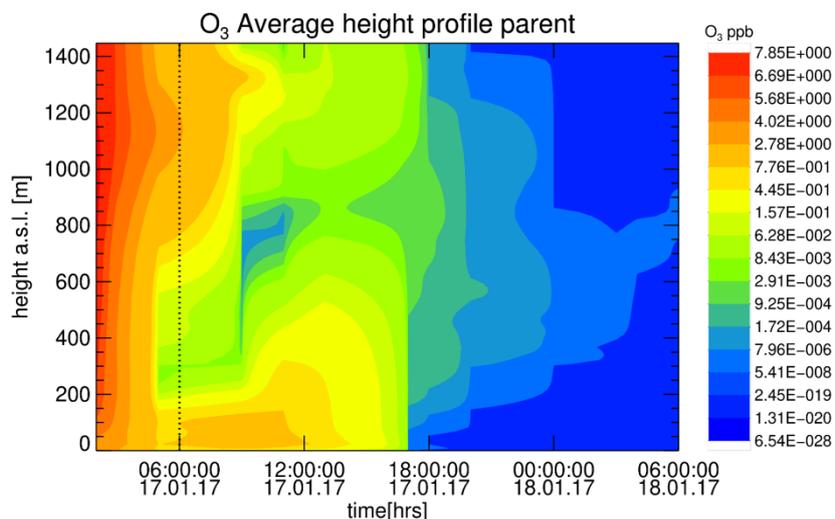


Abb. 3.6.6: Mittleres Höhenprofil für Ozon für die simuliert in VALM01. Quelle: FZJiek8.

Erklärt werden konnte dieses Phänomen nur mit der Annahme, dass das initial im Modell vorhandene Ozon mit der Zeit ausgespült wurde, ohne dass an den Rändern der Modelldomäne wieder Ozon hinzu kommt. Mit Hilfe der mittleren horizontalen Windgeschwindigkeit und der Fläche der Modelldomäne konnte eine Auspülrate berechnet werden, die zu einer exponentiellen Konzentrationsabnahme für Spurenstoffe ohne Quelle im Modell führt (Abb. 3.6.7).

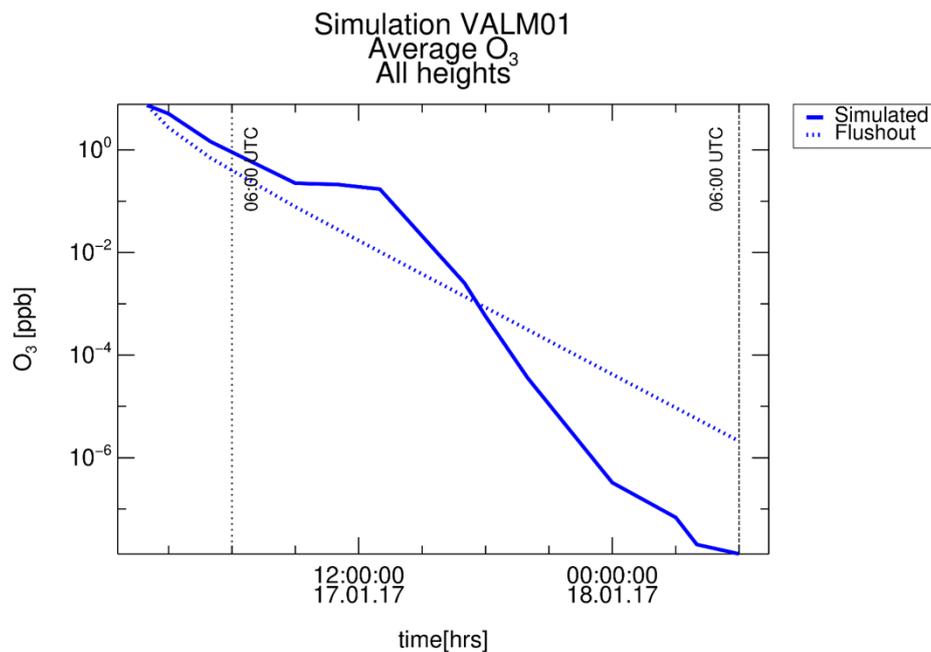


Abb. 3.6.7: Zeitverlauf des mittleren Höhenprofile für Ozon simuliert für VALM01. Quelle: FZJiek8.

Tatsächlich folgt der Zeitverlauf des mittleren modellierten Ozonmischungsverhältnisses der Ausspülungsrate, so dass anzunehmen ist, dass die Information über das Ozonmischungsverhältnis aus dem Modell Cosmo nicht an PALM-4U übertragen wurde. Der Effekt wurde auch für die anderen Spurengase und Aerosole beobachtet (Abb. 3.6.8). Leider ist der Effekt so dominant, dass keine weitere Evaluierung des Chemiemoduls für VALM01 möglich war.

Außerdem wurde festgestellt, dass enge Straßenschluchten durch die dort am stärksten auftretenden Abschattungseffekte im Bereich der Fußgängerwege zu einer NO-Überschätzung bis 30 % und einer NO<sub>2</sub>-Unterschätzung bis zu 15 % neigen.

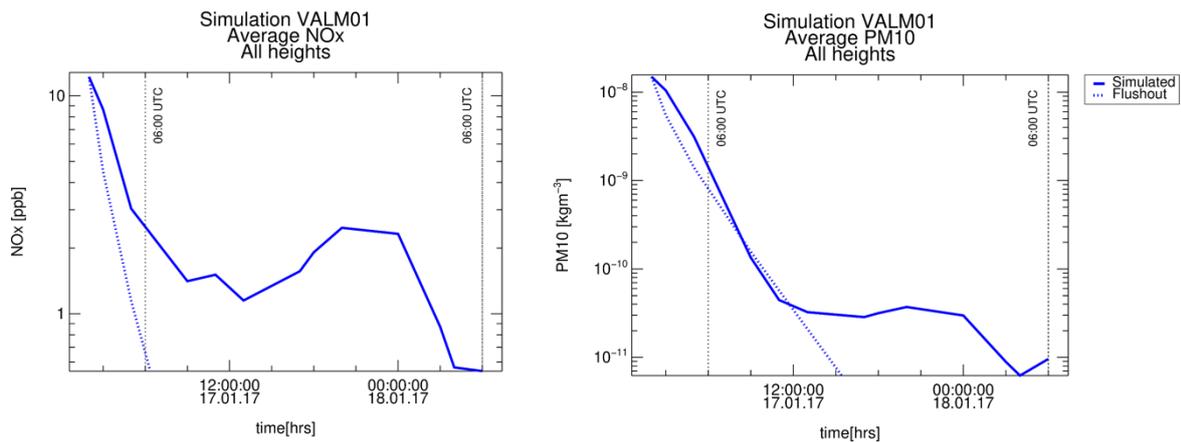


Abb. 3.6.8: Zeitverlauf des mittleren Höhenprofile für Stickoxide (NOx) und PM10 simuliert für VALM01.

### Sommerlauf VALM02 bzw- VALM02v2

Da keine PALM-4U-Simulationen für den Zeitraum eines gesamten Monats zur Verfügung standen, erfolgte der Abgleich mit den synoptischen Modellergebnissen anhand von Einzelüberflügen. Die folgende Abbildung 3.6.9 vergleicht die durch PALM-4U simulierten (VALM02) vertikal integrierten NO<sub>2</sub>-Konzentrationen über Berlin (oben) mit den von TROPOMI beobachteten troposphärischen Säulendichten (unten).

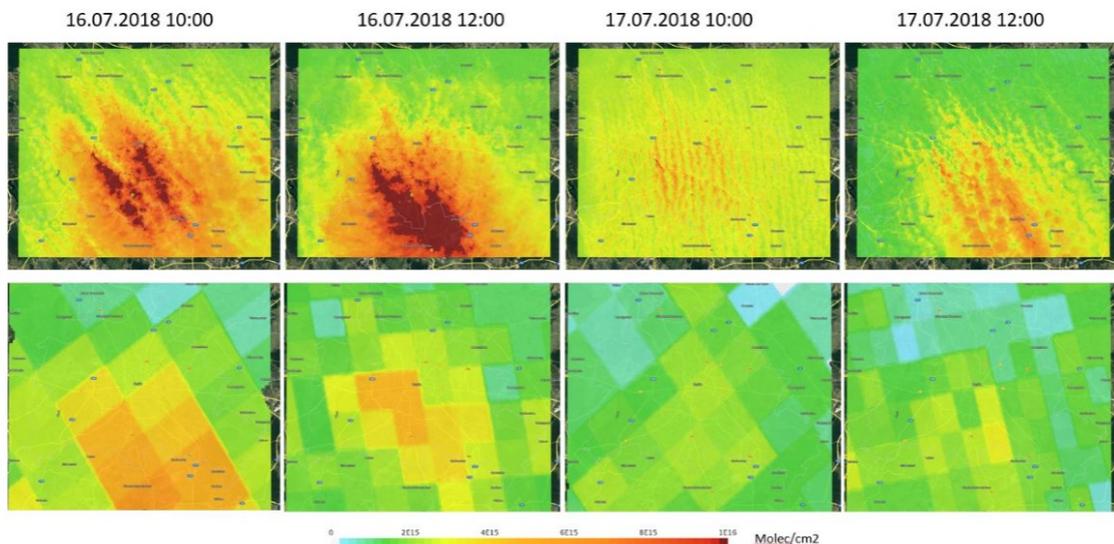


Abb. 3.6.9: Vertikal integrierte NO<sub>2</sub>-Konzentrationen (Säulendichten in Moleküle/cm<sup>2</sup>) über Berlin von PALM-4U simuliert (VALM02) (oben) und von TROPOMI beobachtet für die angegebenen synoptischen Zeitpunkte innerhalb der IOP-4 (Sommer Berlin 2018). Quelle: DLRdfd

Für den Vergleich wurden vertikale Gewichtungsfunktionen (Averaging Kernels) auf die Daten im Modellraum angewendet. Aus beiden Datensätzen lassen sich Verteilungsmuster

ableiten und es werden Übereinstimmungen hinsichtlich der Akkumulation bzw. des Transports entlang der Hauptwindrichtung ersichtlich. Insgesamt wird die NO<sub>2</sub>-Säulendichte (Moleküle/cm<sup>2</sup>) von TROPOMI unterschätzt bzw. von PALM-4U überschätzt.

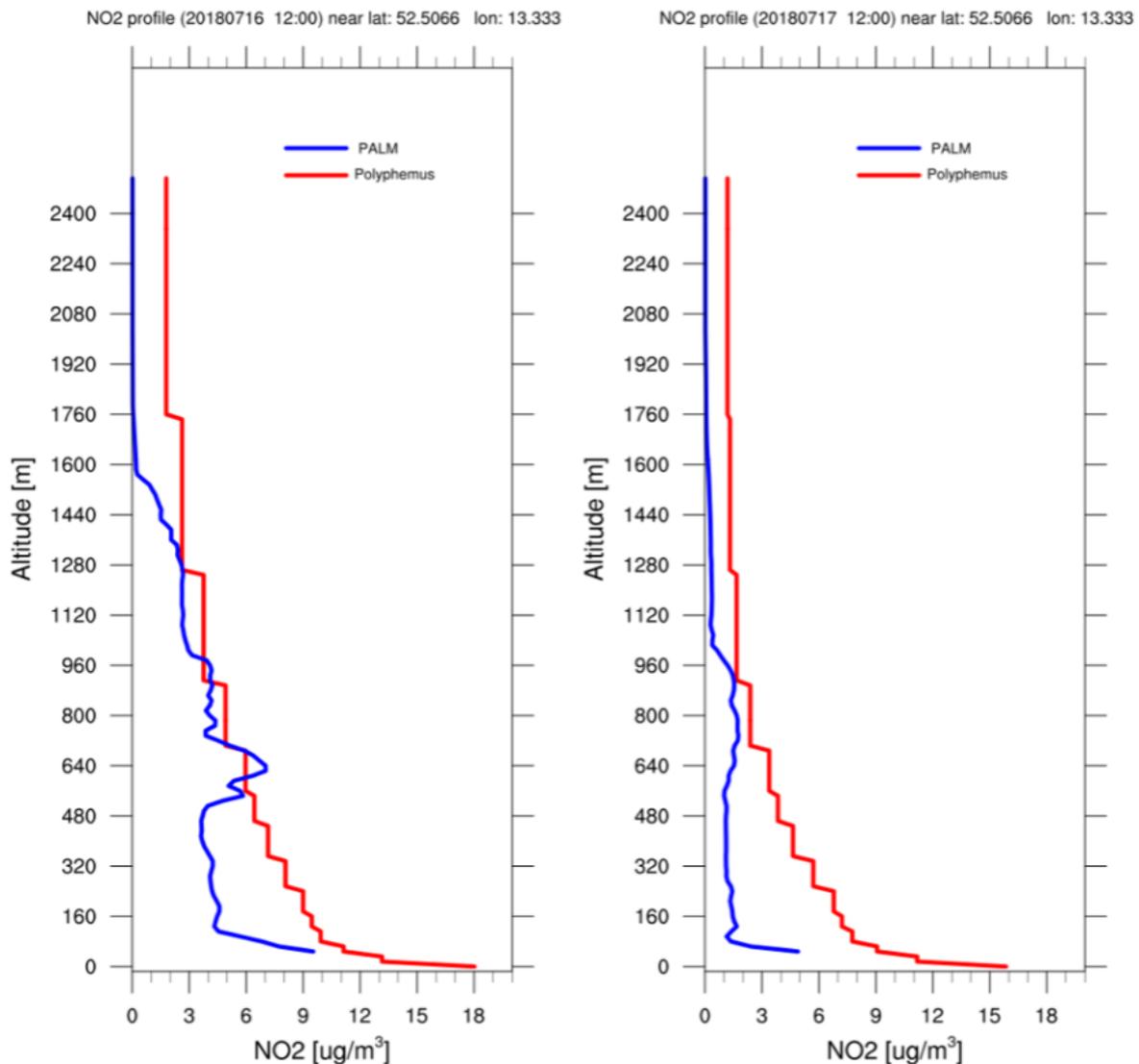


Abb. 3.6.10: NO<sub>2</sub>-Vertikalprofile von PALM-4U (blau) und POLYPHEMUS/DLR (rot) über Berlin während der IOP4. Quelle: DLRFdf

Im Gegensatz dazu kommt es bei der Simulation der NO<sub>2</sub>-Konzentration während der IOP-4 in nahezu allen Höhenbereichen zu einer Unterschätzung (Abb. 3.6.10). Aus der Analyse der Daten flugzeuggestützter Messungen der ersten Projektphase des [UC]<sup>2</sup>-Projektes ist bekannt, dass POLYPHEMUS/DLR die Herausbildung der urbanen Grenzschicht durch den mesoskaligen WRF-Antrieb nicht scharf genug erfolgt, was im Ergebnis zu einer zu starken vertikalen Durchmischung von NO<sub>2</sub> und letztlich zu einer Überschätzung führt.

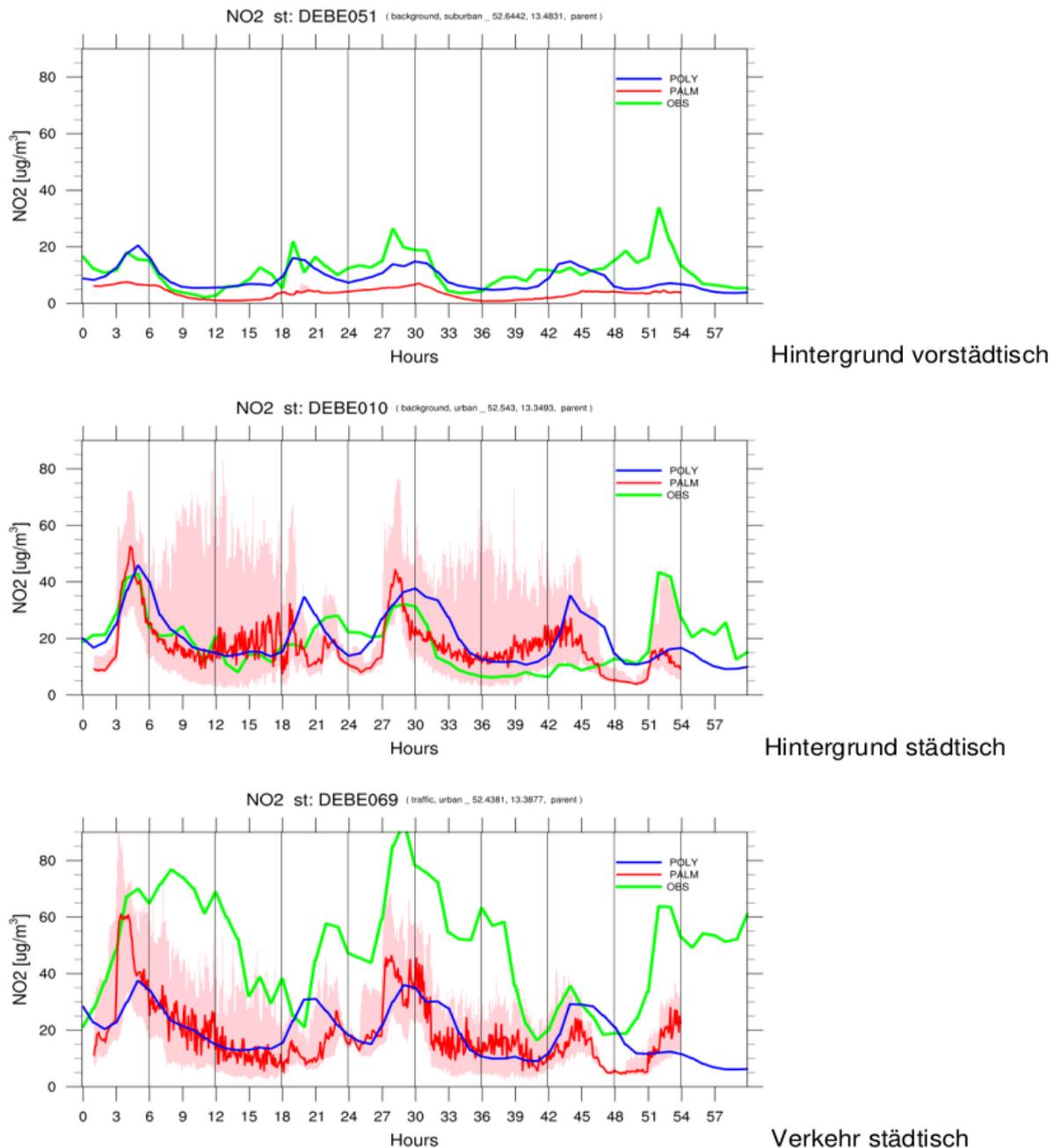


Abb. 3.6.11: Zeitreihen von  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen an ausgewählten Stationen in Berlin während der IOP4, die verschiedene, stadtklimatologisch relevante Umgebungen repräsentieren. Die Kurven zeigen die Ergebnisse von PALM-4U (VALM02, rot), POLYPHEMUS/DLR (blau) und in-situ Umgebungsluft BLUME Messnetz (grün). Die Auswertungen wurden für alle Stationen mit Datenverfügbarkeit durchgeführt. Quelle: DL RdF.

Durch den Abgleich von Simulationsoutputs (VALM02) und in-situ-Messungen der Umgebungsluft (IOP4) zeigt sich für die Stationen mit vorstädtischem Hintergrund eine besonders starke Unterschätzung durch PALM-4U, während POLYPHEMUS die Beobachtungen nur leicht unterschätzt (Abb. 3.6.11). Beide Modelle liefern eine insgesamt akzeptable absolute Übereinstimmung. Auch die Variabilität der  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen bei der Station mit städtischem Hintergrund wird von den Modellen hinreichend reproduziert,

wobei die Abweichungen in den Abendstunden dabei größer sind. Die Werte der städtischen Verkehrsstation werden von beiden Modellen stark unterschätzt, was aber auch darauf hindeutet, dass die Emissionen in den Modellen zu niedrig angesetzt sind.

Die systematische Auswertung der neuesten PALM-4U Simulation für Berlin (VALM02) bestätigt die bisher im Teilprojekt erarbeiteten Erkenntnisse zur Evaluierung. Im Vergleich zum mesoskaligen Chemie-Transport-Modell POLYPHEMUS/DLR zeigt PALM-4U für Stationen im ländlichen Raum, im vorstädtischem Hintergrund und zum Teil auch im städtischen Hintergrund bei NO<sub>2</sub> keine oder kaum eine Verbesserung. Dagegen ist die Repräsentation der NO<sub>2</sub>-Konzentration in der Nähe von Verkehrsstationen deutlich verbessert ( $r=0.74$  ggü.  $r= 0.24$ ), wobei die systematische Unterschätzung teilweise deutlich stärker ausfällt (Tab. 3.6.1). Mögliche Ursachen hierfür lassen sich im vereinfachten Chemie-Schema von PALM-4U oder der unzureichenden Beschreibung von Emissionen auf Straßenniveau finden, nicht aber in einer unzureichenden physikalischen Prozessrepräsentation im Modell.

Tab. 3.6.1: Systematische Auswertung zweier ausgewählter Verkehrsstationen in Berlin für die Modellsysteme PALM-4U und POLYPHEMUS/DLR bezüglich der Stationsmessungen der Umgebungsluft für NO<sub>2</sub>. Quelle: DL RdF

Gütemaß		DEBE061 (Verkehr städtisch)		DEBE067 (Verkehr städtisch)	
		<i>parent</i>	<i>nest03</i>	<i>parent</i>	<i>nest02</i>
<b>Domain</b>					
Korrelations koeffizient	PALM	0.74	0.75	0.57	0.56
	Poly	0.24		0.45	
Bias	PALM	-29.87	-28.57	-19.23	-30.31
	Poly	-24.26		-14.95	
RMSD	PALM	33.48	32.25	22.25	32.18
	Poly	30.63		18.89	

Eine wesentliche Erkenntnis besteht darin, dass die Variabilität und auch die Absolutwerte des  $\text{NO}_2$  in den Child Domains im Vergleich zur Parent Domain deutlich besser wiedergegeben werden (Abb. 3.6.12). Dies bestätigt die Leistungsfähigkeit der Lupenfunktion von PALM-4U schon bei one-way-nesting sowie die Notwendigkeit der hohen räumlichen Auflösung, um verkehrsrelevante Immissionen in Straßenschluchten realitätsnah simulieren zu können.

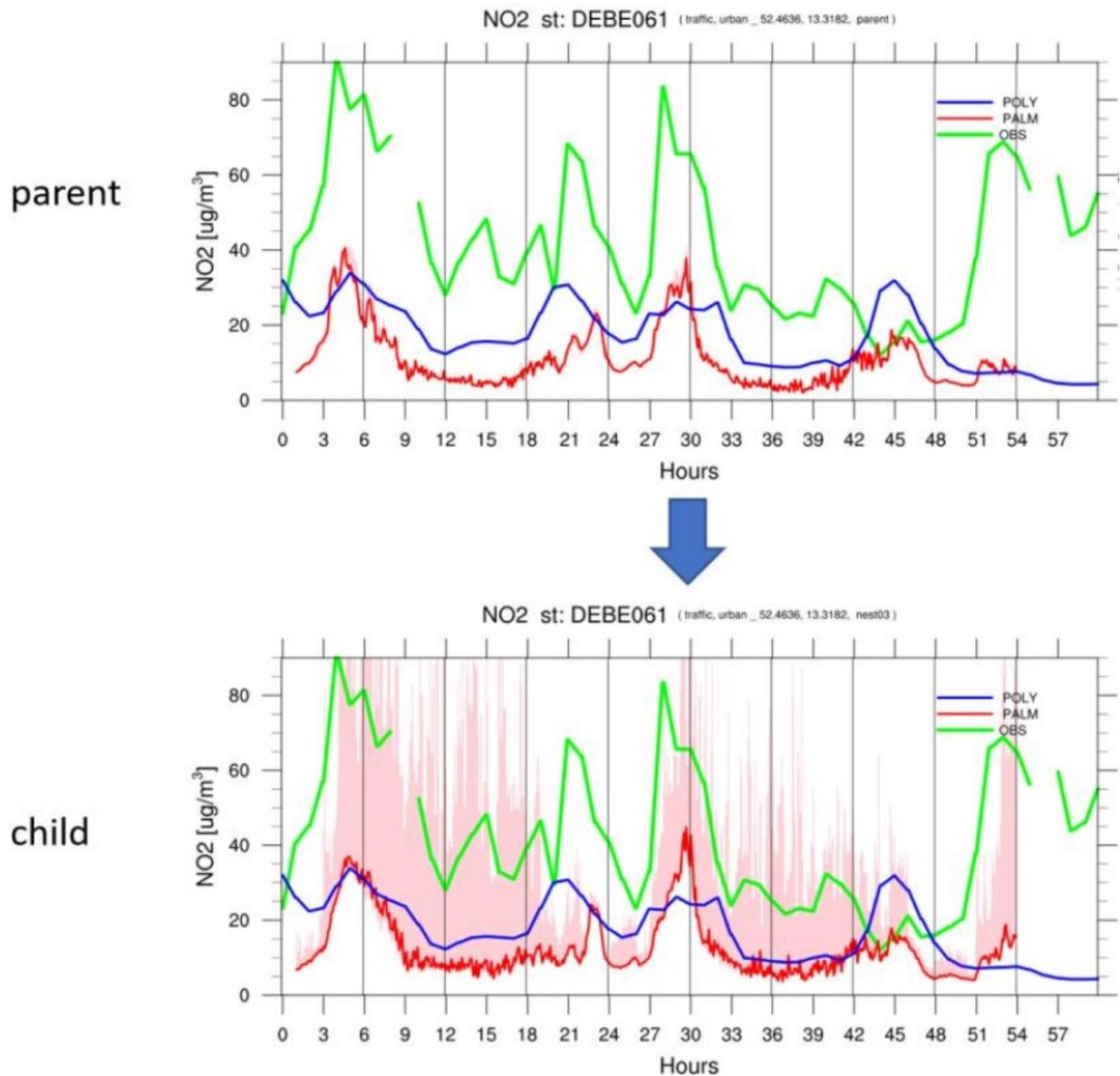


Abb. 3.6.12: Wie Abb. 3.6.11, nur für die Verkehrsstation DEBE061 und  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen im Vergleich PALM-4U Parent (oben) und Child Domain (unten).

## Stuttgart

### VALM04

Um zu klären, inwieweit PALM-4U die Horizontal- und Vertikalverteilungen von Spurenstoffen realistisch repräsentieren kann, wurden die Simulationsergebnisse gegenüber in-situ Messungen der Umgebungsluft sowie, vertikal und horizontal integrierten satellitengestützten Beobachtungen evaluiert. Satellitenbasierte Beobachtungen von Sentinel-5P/TROPOMI eignen sich für die flächenhafte Erfassung von städtischen Verschmutzungsinseln und Abgasfahnen sogar in Städten mit komplexem Gelände. (Samad et al., 2023).

Die urbane Schadstoffinsel Stuttgarts - am Beispiel der mittleren troposphärischen  $\text{NO}_2$ -Verteilung für den Juli 2018 kann durch Überabtastung und Mittelung von 31 Überführungen klar umrissen werden. Die Innenstadt weist Höchstwerte von  $6,0 \cdot 10^{-5} \text{ mol/m}^2$  auf, wobei auch aufwärts des Neckar bis Esslingen erhöhte Werte registriert werden. Aufgrund der physikalischen Einschränkungen eignet sich TROPOMI nur für die Messung der städtischen Hintergrundverschmutzung. Die topografischen Effekte werden allerdings trotz der nominell groben räumlichen Auflösung relativ gut erfasst.

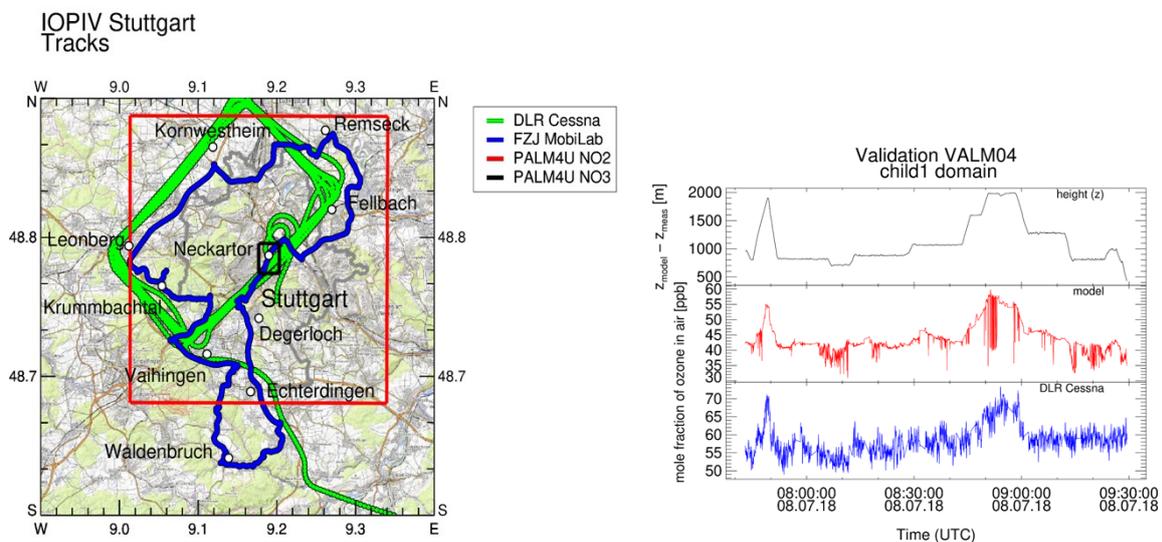


Abb. 3.6.13: Links: X- und Y- Koordinaten der  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{N}_2\text{O}_3$ -Domäne von VALM04 in Stuttgart zusammen mit den Koordinaten der mobilen Messungen von Cessna (DLR, grün) und MobiLab (FZJ, blau). Rechts: Zeitverläufe des simulierten (rot) und beobachteten (blau) Ozonmischungsverhältnisses, Quelle: FZJiek8.

Für die Modellierung VALM04 wurden innerhalb der Modelldomäne (Parent) mit einer Gitterweite von 40 m eine Domäne mit einer Gitterweite von 10 m ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und eine Domäne mit einer Gitterweite von 2 m ( $\text{N}_2\text{O}_3$ ) verschachtelt. Ziel der mobilen Messungen war, den

Effekt von lokalen Winden im Stuttgarter Talkessel zu untersuchen. Dazu wurde der Stuttgarter Talkessel von der Cessna der DLR in verschiedenen Höhen überflogen und die Konzentrationen der wichtigsten Spurengase gemessen, darunter Ozon und  $\text{NO}_2$  (Abb. 3.6.13). Das Problem der fehlenden Repräsentation von Hintergrundkonzentrationen wurde im Zuge des VALM04-Laufes behoben.

Abb. 3.6.14 zeigt das gemittelte Höhenprofil für Ozon vom 08.07.2018. Für den Vormittag wird von PALM ein mit zunehmender Höhe zunehmendes Ozonmischungsverhältnis prognostiziert, das auch von der Cessna beobachtet wurde. Allerdings zeigt das Modell einen Offset von ca. 15 ppb. Da der verwendete Chemie-Mechanismus keine Ozonproduktion enthält, ist davon auszugehen, dass die niedrigen Ozonwerte durch zu niedrige Ozonwerte vom COSMO-Modell verursacht werden. Zur Überprüfung wurden daher in den Abb. 3.6.14 und 3.6.15 die gemittelten Ozonwerte von drei Hintergrundstationen im Raum Stuttgart (Bernhausen, Gärtringen, Ludwigsburg) sowie die gemittelten Ozonprofile, die durch COSMO an den Rändern des Modells vorgegeben werden, geplottet.

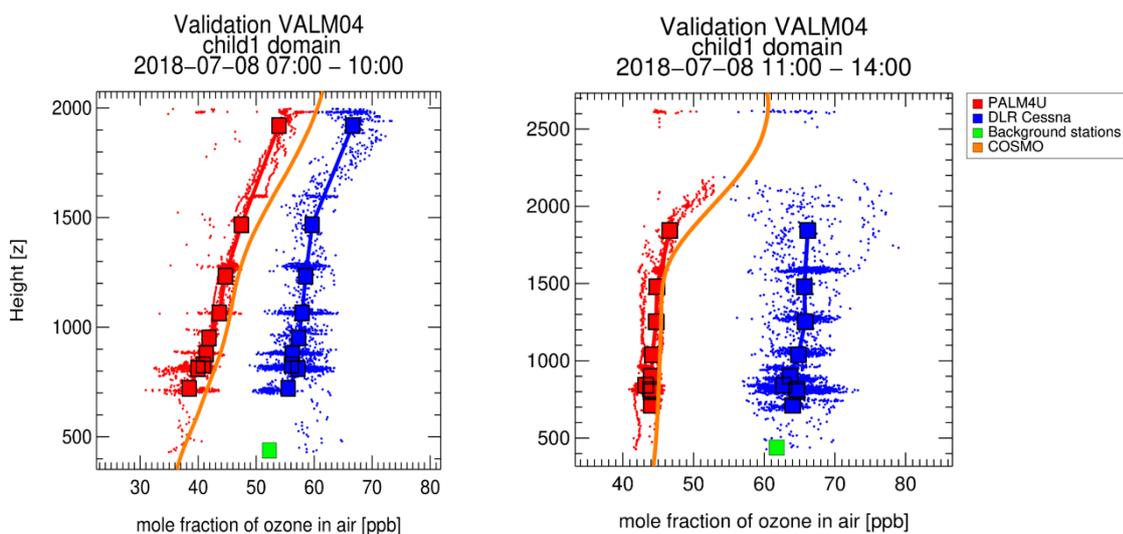


Abb. 3.6.14: Vergleich von mit PALM 4U modellierten (rot) und gemessenen (blau) Höhenprofilen von Ozon am 08.07.2018. Mittlere Ozonwerte von Hintergrundstationen in grün, Hintergrundwerte von COSMO in orange. Quelle: FZJiek8.

Die Ozonwerte aus dem COSMO-Modell sind bei den morgendlichen Profilen bis zu einer Höhe von 1500 m um ca. 3-5 ppb niedriger als die von PALM-4U prognostizierten Werte, bei den Profilen für 11:00 bis 14:00 UTC stimmen sie mit den PALM-4U-Werten überein. Gleichzeitig weichen die COSMO-Daten sowohl von den Cessna-Daten als auch von den Daten im Hintergrund von Stuttgart ab, so dass davon auszugehen ist, dass die Abweichung von PALM-4U und den gemessenen Daten durch Abweichungen im COSMO-Modell

hervorgerufen werden, das die zu niedrigen Ozonwerte der PALM-4U-Simulation aufprägt. Die beobachteten Ozon-Daten der Cessna stimmen sehr gut mit den gemittelten Werten der Hintergrundstationen überein, ein Fehler in den Beobachtungsdaten ist somit unwahrscheinlich.

Auch am folgenden Tag war das prognostizierte Ozonmischungsverhältnis geringer als die von der Cessna beobachteten Werte. Hier lagen die Werte um 20 ppb auseinander. Auch diesem Tag stimmen die COSMO-Daten bei den morgendlichen Überflügen in niedriger Höhe mit den Daten der PALM-4U-Simulation überein, bei der mittäglichen Befliegung sind die PALM-4U-Daten nahezu mit den COSMO-Profilen identisch. Sowohl die Ozonwerte aus den Cessna-Messungen wie auch die Hintergrundwerte aus den Messstationen sind um ca. 20 ppb höher als die simulierten Daten aus COSMO und PALM4U. Auch hier führte eine Abweichung der COSMO-Daten zu Abweichungen in der PALM-4U-Simulation (Abb. 3.6.15).

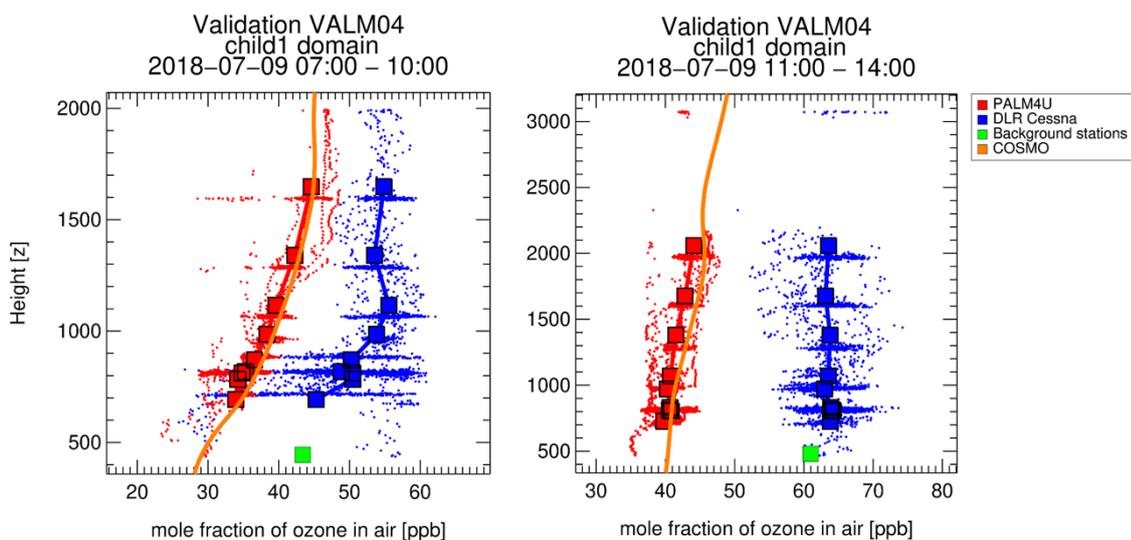


Abb. 3.6.15: Vergleich von mit PALM 4U modellierten (rot) und gemessenen (blau) Höhenprofilen von Ozon am 09.07.2018. Mittlere Ozonwerte von Hintergrundstationen (grün), Hintergrundwerte von COSMO (orange). Quelle: FZJiek8.

Darüber hinaus ist bemerkenswert, dass für den Vormittag des 09.07.2018 eine Abnahme von mehr als 10 ppb Ozon beim Übergang der Flughöhe von 500 m auf 1000 m beobachtet, aber lediglich eine Abnahme von 3 ppb prognostiziert wurde. Anders als von PALM-4U modelliert, war die konvektive Mischungsschicht noch nicht vollständig ausgebildet und das Ozon wurde in niedriger Höhe von Stickstoffmonoxid reduziert.

Das Temperaturprofil für den 09.07.2018 morgens zeigt den niedrigen Temperaturgradienten bis in eine Höhe von 1000 m, der zur Verringerung der gemessenen

Ozon-Konzentration und zugleich zu einem Anstieg der  $\text{NO}_2$ -Mischungsverhältnisse (Abb. 3.6.17) führte.

Während das Mischungsverhältnis von Ozon sehr stark von der Hintergrundkonzentration und damit vom Output des COSMO-Modells bestimmt wird, werden die Stickoxidkonzentrationen stärker von den Emissionen und den Transportprozessen in PALM-4U beeinflusst. Demzufolge sind auch die  $\text{NO}_2$ -Mischungsverhältnisse aus PALM-4U höher als die Hintergrunddaten aus COSMO. Die Modell- und Beobachtungsdaten der Überfliegungen am 08.07.2017 zeigen ein Höhenprofil mit in größerer Höhe abnehmenden Werten, wobei die Modelldaten um ca. 30% zu niedrig sind (Abb. 3.6.16).

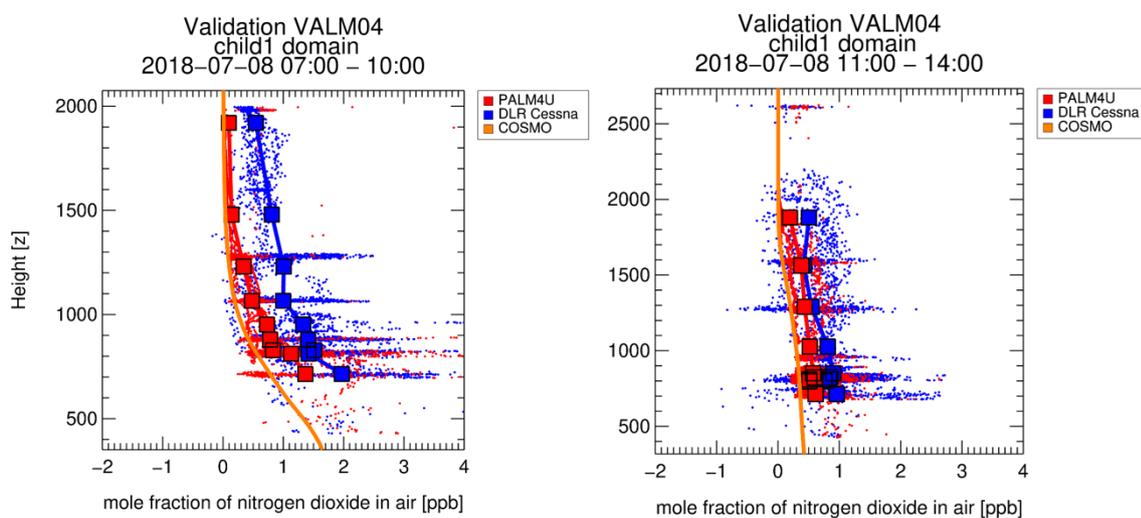


Abb. 3.6.16: Vergleich von mit PALM 4U modellierten (rot) und gemessenen (blau) Höhenprofilen von Stickstoffdioxid am 08.07.2018. Die Hintergrundwerte von COSMO sind orange. Quelle: FZJiek8.

Da Stickstoffdioxid in einiger Entfernung von der Quelle der Hauptanteil der Stickoxide ist, kann die Diskrepanz nicht aus den Unterschieden der beobachteten und gemessenen Ozonkonzentration erklärt werden. Die schnellere Reaktion von Stickstoffmonoxid mit Ozon reduziert zwar den Anteil von Stickstoffmonoxid an der Stickoxidkonzentration, die Menge an Stickstoffdioxid ändert sie hingegen kaum. Als mögliche Ursachen für die Unterschiede der Stickoxidkonzentrationen kann eine zu geringe Emissionsstärke, zu große Verlustprozesse durch Transport aus der Modellregion oder Deposition angesehen werden.

Am 09.07.2018 sind die Unterschiede zwischen beobachteten und modellierten Stickstoffdioxid-Daten größer als am 08.07.2018. Bei den morgendlichen Flügen wurden in Höhen bis 1000 m  $\text{NO}_2$ -Mischungsverhältnisse bis zu 30 ppb gemessen. Im Mittel wurden 12 ppb in einer Höhe von 700 m beobachtet, eine Größenordnung mehr als in der Simulation berechnet wurde (Abb. 3.6.17). Dieses kann wie auch bei den unterschiedlichen Ozonwerten

dadurch erklärt werden, dass sich die nächtliche Inversionsschicht, in die die Stickoxide emittiert werden, noch nicht aufgelöst hatte, während die Simulationsergebnisse eine komplette Durchmischung der planetaren Grenzschicht und damit eine schnelle Verdünnung der Verkehrsemissionen voraussagt. Auch bei der mittäglichen Überfliegung wurden bis in 2000 m Höhe erhöhte  $\text{NO}_2$ -Werte beobachtet, aber von PALM-4U nicht prognostiziert.

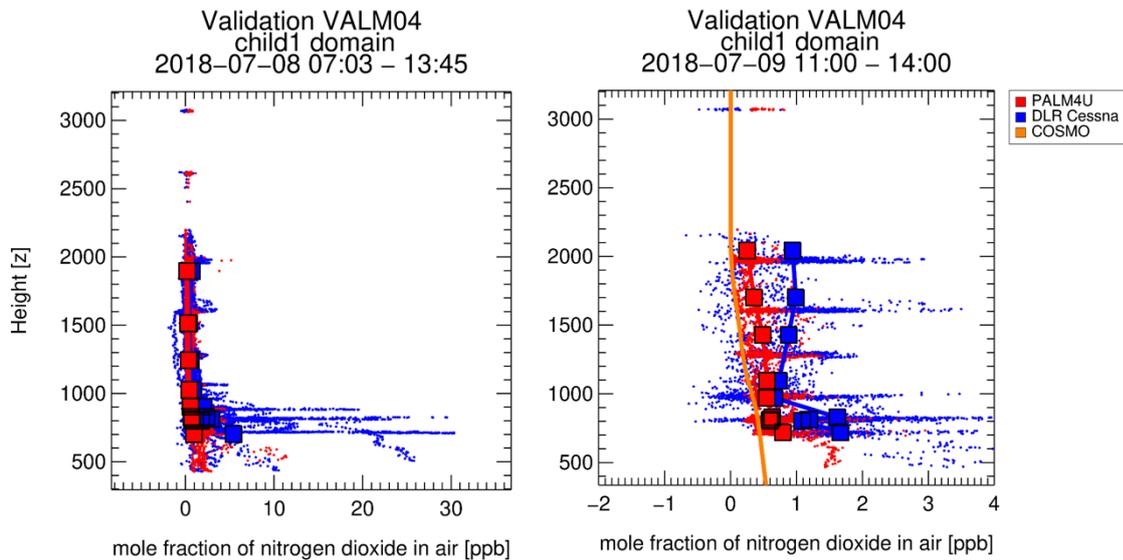


Abb. 3.6.17: Vergleich von mit PALM 4U modellierten (rot) und gemessenen (blau) Höhenprofilen von Stickstoffdioxid am 09.07.2018. Die Hintergrundwerte von COSMO sind orange. Quelle: FZJiek8.

In Bodennähe wurden die für 2 m ü.G. mit PALM-4U simulierten Stickoxidmischungsverhältnisse mit den Daten von MobiLab verglichen. Wegen der besseren Datenabdeckung erfolgte der Vergleich zunächst mit den Modelldaten von  $\text{NO}_3$  mit einer Auflösung von 10 m. Abb. 3.6.18 zeigt die räumliche Verteilung der gemessenen und simulierten Stickoxid-Mischungsverhältnisse für eine ausgewählte Messfahrt am 07.08.2018. In beiden Plots sind die Bereiche mit geringen Stickoxidkonzentrationen nördlich und westlich von Stuttgart, im Krumbachtal, zu erkennen. Deutlich wird auch, dass die Mischungsverhältnisse auf der Autobahn A81, nordwestlich von Stuttgart, verglichen mit den beobachteten Werten zu niedrig sind. Ein ähnliches Muster war auch bei den Daten der anderen Messfahrten zu erkennen.

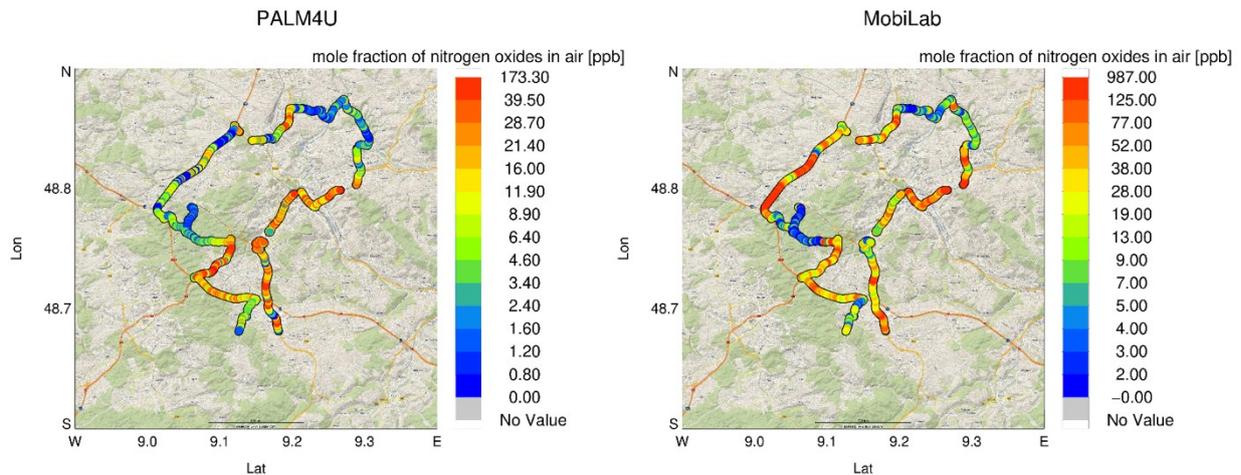


Abb. 3.6.18: Räumliche Verteilung der Stickoxide in 2 m Höhe über Grund simuliert mit PALM4U (links) und beobachtet mit dem MobiLab (rechts). Quelle: FZJiek8.

Modell und Beobachtungen unterscheiden sich auch in den relativen Häufigkeitsverteilungen (Abb. 3.6.19). Hohe Konzentrationspitzen von über 100 ppb, wie sie in einer Höhe von 2 m vom MobiLab gemessen wurden, sind von PALM-4U nicht vorhergesagt worden, so dass die mittlere Stickoxidkonzentration um den Faktor 4 niedriger war als beobachtet. Auch der Median ist um den Faktor 2 geringer.

Bei einer Modellauflösung von 10 m ist von einer niedrigeren Konzentration im Modell auszugehen, da das Modell die mittlere Konzentration in 5 m Höhe über Grund simuliert, aber in 2 m Höhe gemessen wird und die Stickoxidkonzentration mit der Höhe abnimmt.

Für den hochaufgelösten Bereich des Modells in der Umgebung des Neckartors liegen nur wenig Messdaten vor, da das MobiLab vorwiegend im Umland von Stuttgart gemessen hatte, um eine möglichst gute räumliche Abdeckung mit den Flugzeugdaten zu erhalten. Allerdings werden auch bei einer Auflösung von 2 m die Messdaten vom Modell unterschätzt. Mittelwert und Median der Modelldaten für Stickoxide sind um den Faktor 2 bis 3 geringer als bei den Messungen (Abb. 3.6.20).

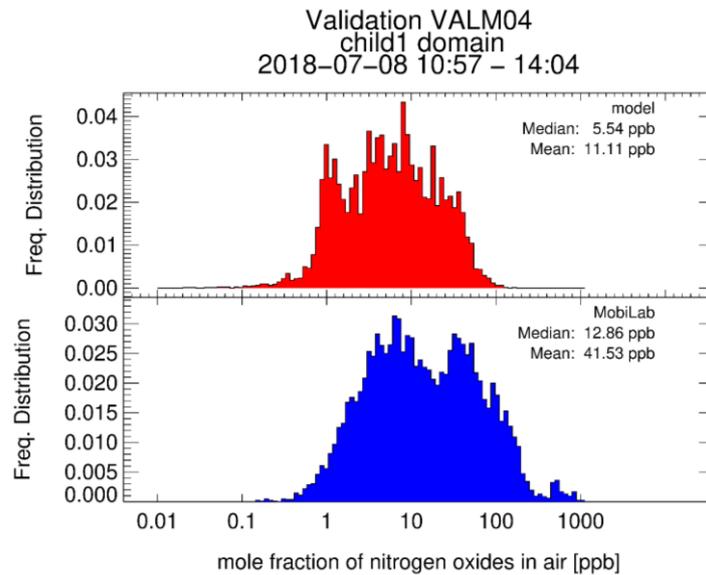


Abb. 3.6.19: Relative Häufigkeitsverteilung der simulierten (oben) und beobachteten (unten) Mischungsverhältnisse für Stickoxide bei einer Messfahrt am 08.07.2018. Die Daten wurden für die Domäne N02 mit einer Gitterweite von 10 m simuliert. Quelle: FZJiek8.

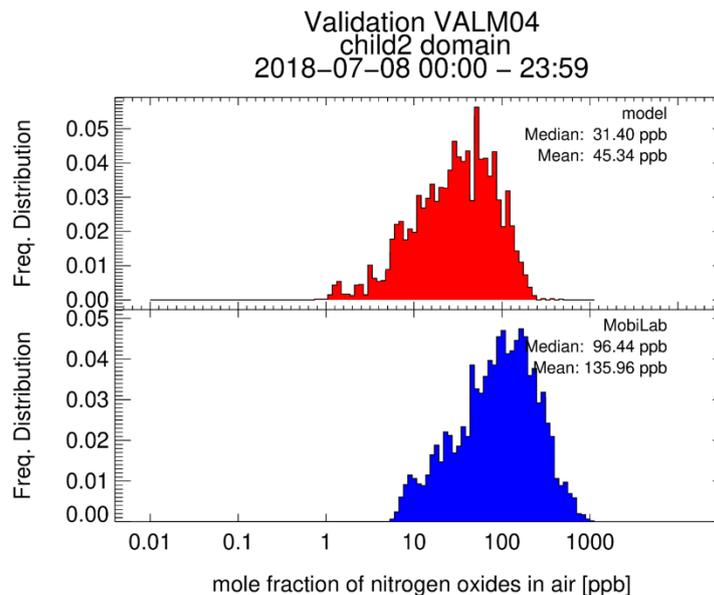


Abb. 3.6.20: Relative Häufigkeitsverteilung der simulierten (oben) und beobachteten (unten) Mischungsverhältnisse für Stickoxide für den 08.07.2018 und den 09.07.2018. Die Daten wurden für die Domäne N03 mit einer Gitterweite von 2 m simuliert. Quelle: FZJiek8.

In Abb. 3.6.21 ist ein Vergleich von simulierten (MOD) und gemessenen (OBS) stündlichen mittleren Konzentrationen von  $\text{NO}_2$  an den LUBW-Messstationen Hauptstätter Straße (a), Am Neckartor (b), Hohenheimer Straße (c) und Arnulf-Klett-Platz (d) dargestellt.

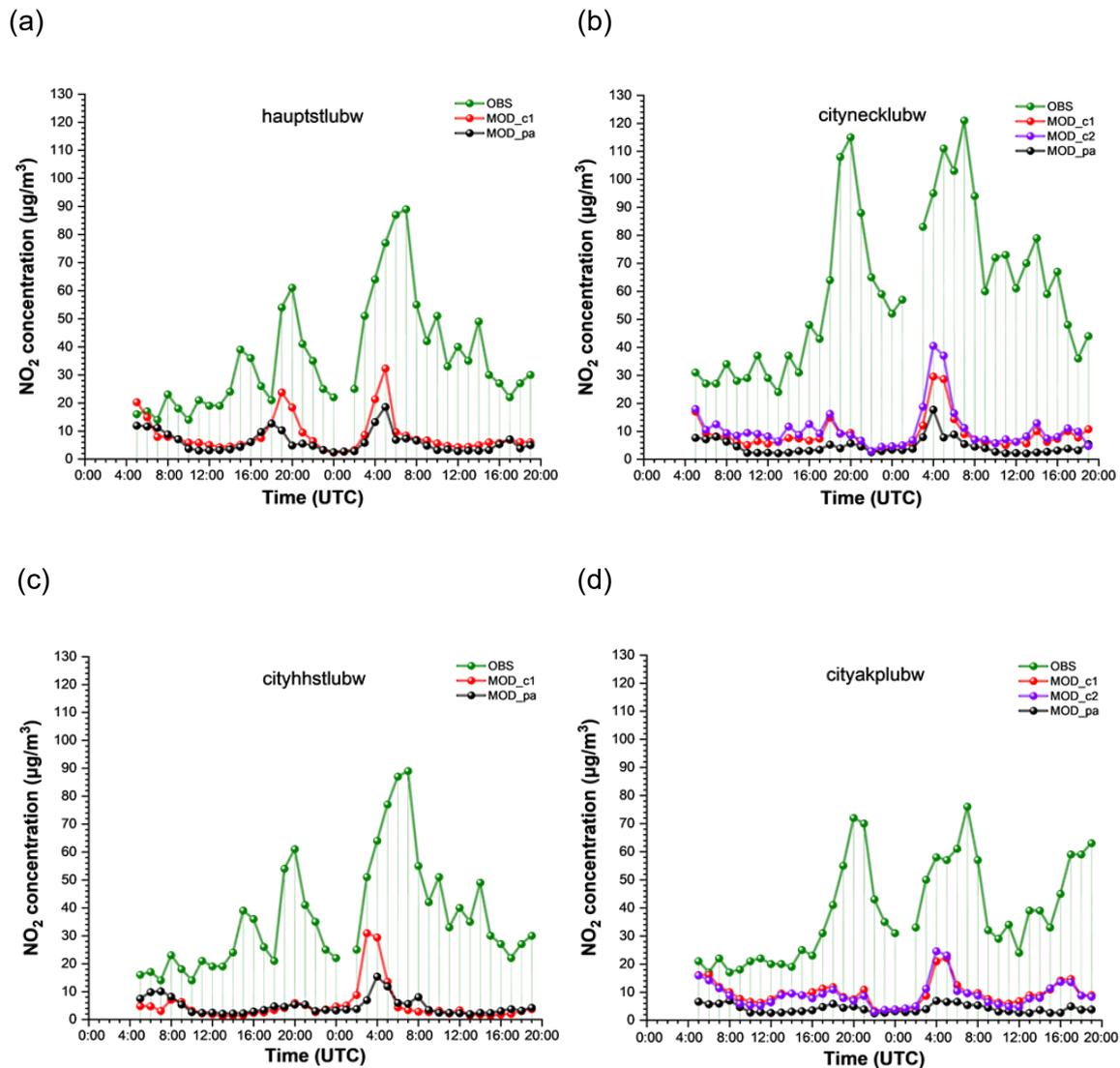


Abb. 3.6.21: Vergleich der  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen von den Simulationsergebnissen (VALM04) und die stationären Messungen am (a) Hauptstätterstraße, (b) Am Neckartor, (c) Hohenheimerstraße, und (d) Arnulf-Klett-Platz, Stuttgart. Quelle: USIfk.

Aus dem Tagesgang der stündlichen  $\text{NO}_2$ -Konzentrationsverteilung ist ersichtlich, dass die simulierte  $\text{NO}_2$ -Konzentration am Sonntag, 8. Juli 2018, zwischen 05:00 UTC und 22:00 UTC an der Station Hauptstätter Str. im Vergleich zu den dort gemessenen  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen am besten wiedergegeben wurde. Der Anstieg der  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen sowohl während des morgendlichen als auch der abendlichen Spitze des Berufsverkehrs wurde sowohl bei den Simulationen als auch bei den Messungen detektiert. Für die drei anderen Messstationen am Neckartor, Hohenheimer Str. und Arnulf-Klett-Platz ist der morgendliche Peak, verursacht durch den Berufsverkehr, in den Simulationsergebnissen nur in Ansätzen erkennbar; bei den Messergebnissen an diesen Standorten ist er sehr ausgeprägt zu erkennen. Die abendlichen  $\text{NO}_2$ -Anstiege sind hingegen an allen drei Stationen, sowohl in den Messergebnissen als auch den Simulationsergebnissen gut zu erkennen. Im Allgemeinen waren die gemessenen (OBS)

stündlichen mittleren NO<sub>2</sub>-Konzentrationen an den vier Standorten etwa 3- bis 4-mal höher als die simulierten NO<sub>2</sub>-Konzentrationen.

Abb. 3.6.22 zeigt die stündliche durchschnittliche NO-Konzentration von simulierten und gemessenen Ergebnissen in Bad Cannstatt für den Zeitraum vom 8. bis 9. Juli 2018.

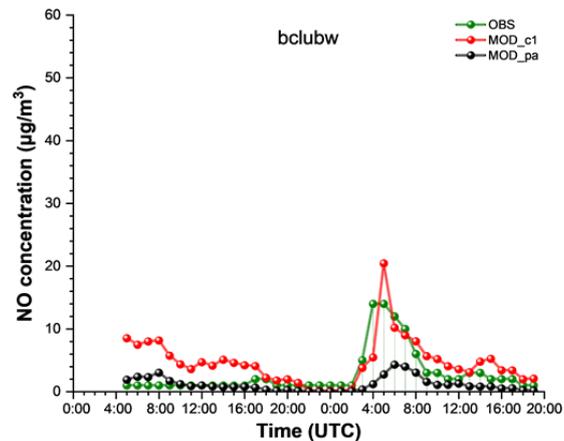


Abb. 3.6.22: Vergleich der NO-Konzentrationen von den Simulationsergebnissen (VALM04) und die stationären Messungen am Bad Cannstatt, Stuttgart. Quelle: USifk.

Aus der stündlichen Konzentrationsverteilung lässt sich interpretieren, dass die gemessene und simulierte NO-Konzentration am Sonntag, 8. Juli 2018, zwischen 05:00 UTC und 22:00 UTC zeigten einen vergleichbaren Trend mit durchschnittlichen Konzentrationen von etwa 1 µg/m<sup>3</sup> (für MOD\_pa und OBS) bzw. 4 µg/m<sup>3</sup> (für MOD\_c1). Während die MOD\_pa Domäne innerhalb dieses Zeitraums die gleiche mittlere Konzentration von etwa 1 µg/m<sup>3</sup> wie die gemessene (OBS) beibehielt, war die MOD\_c1 Domäne um 75 % höher. In der Nacht, gegen 23:00 UTC, lag die modellierte NO-Konzentration unter 1 µg/m<sup>3</sup>, während die gemessene (OBS) Konzentration bei etwa 1 µg/m<sup>3</sup> blieb. Am nächsten Tag stiegen die Konzentrationen des modellierten NO für die Domänen MOD\_c1 und MOD\_pa während der Hauptverkehrszeiten an, wobei gegen 05:00 und 06:00 UTC unterschiedliche maximale Spitzenwerte von 20 µg/m<sup>3</sup> und 4 µg/m<sup>3</sup> beobachtet wurden. Die NO-Konzentration stieg ebenfalls an, entwickelte jedoch gegen 04:00 und 05:00 UTC eine gleichmäßige Spitzenkonzentration von fast 14 µg/m<sup>3</sup>. Die NO-Konzentration nahm nach den Hauptverkehrszeiten ab und nahm bis 13:00 UTC weiter ab. Die NO-Konzentrationen von OBS und MOD\_c1 stiegen am Nachmittag zu unterschiedlichen Zeiten leicht an, wobei die Spitzenkonzentrationen knapp unter 6 µg/m<sup>3</sup> lagen. Der abendliche Höhepunkt der beobachteten und simulierten NO-Konzentrationen war weniger intensiv als der morgendliche Höhepunkt, was darauf zurückzuführen ist, dass die Personen den Arbeitsplatz abends zu unterschiedlichen Zeiten verließen.

## 4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ergebnisse der meteorologischen Parameter stimmen mit den Ergebnissen der PALM-4U-Simulationen insgesamt gut überein. Abweichungen treten vor allem quantitativ, aber nicht qualitativ auf und sind häufig auf den dynamischen Antrieb zurückzuführen.

In den meisten Validierungsfällen wurde die gemessene bodennahe **Temperatur** durch PALM-4U leicht unterschätzt (bis max. 3 K), wobei im Sommer und in den Nachtstunden eine höhere Modellgüte erreicht wird. Während der Tagesgang insgesamt gut wiedergegeben wird, sind die größten Unsicherheiten in den Übergangsphasen nach Sonnenunter- bzw. -aufgang festzustellen. Die Auswirkungen unterschiedlicher Landnutzungstypen und Urbanisierungsgrade auf die Temperatur werden durch das Modell korrekt abgebildet, wenngleich eine durch Nesting erhöhte Auflösung nicht zwangsläufig zu besseren Ergebnissen führt.

Für die **spezifische Feuchte** wurde mehrheitlich festgestellt, dass die Modellierung die tatsächlichen Werte bodennah und im vertikalen Verlauf regelmäßig unterschätzt, sie im Tagesverlauf aber widerspiegelt. Dabei werden die Nachtstunden durch das Modell mit einer höheren Übereinstimmung simuliert. Im Gegensatz dazu treten zu dieser Zeit mit Abweichungen von bis zu 20% die größten Differenzen im Hinblick auf die **relative Luftfeuchtigkeit** auf, die im restlichen Tagesverlauf gut durch PALM-4U vorhergesagt wird.

Die bodennahe **Windgeschwindigkeit** wird mit kleinen tages- und jahreszeitlichen Schwankungen gut simuliert. Die Übereinstimmung ist bei höherer Modellauflösung geringfügig höher. Das Modell zudem ist in der Lage, die Windgeschwindigkeit insgesamt und Bereiche stärkeren und schwächeren Windes bis in eine Höhe von 2.500 m in guter Näherung zu den Messwerten wiederzugeben, auch wenn es insbesondere in Nacht- und Übergangszeiten zu Abweichungen kommt.

Die **Windrichtung** wird im mittleren Vergleich aller Stationen durch das Modell im Bereich von  $\pm 10^\circ$  korrekt berechnet. Das Nesting verbessert die Modellgüte unter Sommerbedingungen zusätzlich. Auch bis in die oberen Bereiche der Grenzschicht wird die Windrichtung durch das Modell zufriedenstellend simuliert.

Die **fühlbaren Wärmeflüsse** werden durch das Modell in hoher Übereinstimmung wiedergegeben, wobei auch stadtstrukturelle Einflüsse der Umgebung und die Kühlleistung von Gründächern in den Tagstunden zufriedenstellend berücksichtigt werden. Die größten Abweichungen bestehen in den Vormittagsstunden und bei der Simulation der nächtlichen

Abkühlungsrate begrünter Dachflächen.

Dagegen ist bei den **latenten Wärmeflüssen** in den Nachtstunden ein hoher Übereinstimmungsgrad zu verzeichnen, wohingegen in den Tagstunden zu hohe Verdunstungsflüsse simuliert werden.

Die simulierten und gemessenen **konduktiven Wärmeflüsse** gleichen sich nach einer Einschwingphase einander an, wobei die simulierten Werte konstant leicht unterhalb der gemessenen liegen.

Die **Strahlungsbilanz** wird durch das Modell zutreffend wiedergegeben. Gleiches gilt für die durch Messungen vorgegebenen Werte von **kurzwelliger Einstrahlung** und **langwelliger atmosphärischer Gegenstrahlung**. Bei der **kurzwelligen Ausstrahlung** kommt es im gesamten Tagesverlauf zu einer Unterschätzung; bei der **langwelligen Ausstrahlung** insbesondere zu einer nächtlichen Überschätzung durch das Modell. Die Gründe für diese Abweichungen sind Gegenstand derzeit noch laufender Untersuchungen.

Die Varianzen der horizontalen und vertikalen Windvektoren werden oberhalb der städtischen Hindernisschicht jeweils deutlich unterschätzt. Während parallel zu Unregelmäßigkeiten in Gebäudefassaden die Varianzen der **Turbulenzkomponenten** in guter Übereinstimmung wiedergegeben werden, konnte bei den senkrecht dazu auftretenden Turbulenzen eine deutliche Unterschätzung beobachtet werden. Unterschiedliche Fassadenrauigkeiten werden aufgrund einer generellen Unterschätzung wandnaher Strömungsgeschwindigkeiten nur unzureichend vom Modell widergespiegelt, wogegen die wandfern (> fünffache Gebäudehöhe) simulierten Geschwindigkeiten sich mit Windkanalbeobachtungen decken.

Während ein realistischer Tagesgang abgebildet wird und die simulierten und gemessenen Mittelwerte der **PM10-Konzentration** tagsüber in vergleichbaren Größenordnungen liegen bzw. in begrünter Umgebung tendenziell leicht unterschätzt werden, kommt es vor allem in den Nachtstunden zu einer größeren Unterschätzung der Konzentration.

Das simulierte **Ozonmischungsverhältnis** liegt deutlich unterhalb der gemessenen Werte und nimmt zudem im zeitlichen Verlauf der Simulation in Folge einer Ausspülung deutlich ab. Die Höhenprofile ähneln im Verlauf den Profilen der Messungen, allerdings mit einer konstanten Unterschätzung in Höhe von ca. 15 bis 20 ppb.

Die Säulendichte von **Stickstoffdioxid** (Moleküle / cm<sup>2</sup>) wird durch PALM-4U überschätzt,

wogegen es bezüglich der Konzentration in den meisten Höhengschichten zu einer Unterschätzung kommt. Die Konzentrationen im städtischen Hintergrund werden durch das Modell in recht hoher Übereinstimmung wiedergegeben, während es bei den Stationen des vorstädtischen Hintergrundes und Stationen in der Nähe von Verkehrsachsen zu einer deutlichen Unterschätzung kommt. Insbesondere bei der Abbildung verkehrlicher Emissionen wird im Mittel dennoch eine Verbesserung existierender Modelle erreicht und durch die Möglichkeit einer höheren räumlichen Auflösung verkehrsrelevanter Immissionen durch das Nesting erfolgt ein zusätzlicher Performancegewinn im Hinblick auf die Repräsentation von Variabilität und Absolutwerten.

Die durch den Berufsverkehr ausgelösten Belastungsspitzen bei Stickoxiden werden übereinstimmend abgebildet. Die **Stickstoffmonoxid**-Konzentration wird durch das Modell bereits gut vorhergesagt, wobei die Parent-Domain die höhere Übereinstimmung in den Tagstunden und die Child-Domain bessere Ergebnisse in den Nachtstunden liefert.

#### Aussagen zur Belastbarkeit von PALM-4U bzw. verbleibende Unsicherheiten

Aus der Validierung ergeben sich zusammenfassend gute Übereinstimmungen zwischen den Modellsimulationen und den gemessenen Werten. Dabei bildet PALM-4U insbesondere tageszeitliche Prozesse oder stadtstrukturelle Unterschiede realitätsnah und mit hoher Genauigkeit ab.

Der Modelloutput von PALM-4U unterliegt einem starken Einfluss der Inputdaten, dem dynamischen Antrieb, welcher sich auf manche Variablen stärker (z.B. Temperatur, Feuchte, Ozon) und auf manche schwächer (Stickoxide) auswirkt und teilweise zu Abweichungen führt, die nicht ursächlich PALM-4U zuzuschreiben sind. Aufgrund der Unsicherheiten beim Antrieb sind die Modellergebnisse unterschiedlich strukturierter Räume zueinander belastbarer als die absoluten Werte der Outputs.

Die Positionierung der Messgeräte, auf deren Werten die Modellvalidierung basiert, stimmt aufgrund der Gittergröße nicht immer mit den Punkten überein, für die ein Modelloutput simuliert wird. Zudem zeigte sich für Simulationen des Windes und der Schadstoffausbreitung eine erhöhte Übereinstimmung bei geringeren Gitterweiten.

Modellantrieb und -auflösung stellen somit zwei wesentliche Faktoren dar, welche die Genauigkeit des Modells beeinflussen. Mobile und stationäre Messungen stellen für die Validierung einen wichtigen Datensatz dar. Diese Daten stehen nach Projektende zur Verfügung.

Eine teilweise nicht synchrone Wiedergabe von Mischungsschichtprozessen kann in den Übergangsphasen zu höheren Unsicherheiten bezüglich der Konzentration in den unteren Grenzschichtbereichen führen.

Der Ausspülungseffekt existiert für alle Spurengase im Modell.

## Ausblick

Auch nach dem Ende des Verbundprojektes [UC]<sup>2</sup> ist es sinnvoll, das Modell PALM-4U fortlaufend zu evaluieren. Dafür bietet sich eine Evaluierung nach den Grundsätzen der VDI-Richtlinie 3783, Blatt 9 an, wie sie für das PALM-Modell bereits erfolgt ist (Weniger, 2019). Auch die Einhaltung der in Blatt 7 der Richtlinie festgelegten fachlichen Qualitätsanforderungen hinsichtlich der Einbeziehung von Kaltluftströmen und -abflüssen sollte fortlaufend evaluiert werden. Weiterhin hat sich eine Arbeitsgemeinschaft konstituiert, deren Ziel die Erarbeitung eines Blattes 12 der VDI-Richtlinie ist. Die Darstellung von Modelloutputs von Regional- und Stadtklimasimulationen mit einem besonderen Fokus auf PALM-Simulationen soll künftig auf dieser Grundlage stattfinden.

## Danksagung

Das BMBF fördert die Maßnahme 'Stadtklima im Wandel' [UC]<sup>2</sup> (Förderkennzeichen 01LP1601-4) im Rahmen der Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA; [www.fona.de](http://www.fona.de)). Die Fördermaßnahme wird vom DLR Projektträger (<https://www.dlr.de/pt>) betreut. Die Autoren danken allen Projektleitern, Wissenschaftlern und weiteren Beteiligten der zweiten, abgeschlossenen Phase der Fördermaßnahme, die mit ihrer Arbeit einen Beitrag zu diesem Evaluierungsbericht Teil 2 geleistet haben.

## Abkürzungsverzeichnis

3DO	Dreidimensionale Observierung atmosphärischer Prozesse in Städten
AG	Arbeitsgruppe
AGL	Above ground level (Höhe über Grund)
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CEDVAL	Compilation of Experimental Data for Validation of Microscale Dispersion Models
CH <sub>4</sub>	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
COSMO	Consortium for Small-scale Modeling
COST	European Cooperation in Science and Technology
DMS	Datenmanagementsystem
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage)
EWTL	Environmental Wind Tunnel Laboratory (Grenzschichtwindkanal)
GIS	Geographisches Informationssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GUI	Web-basierte grafische Benutzeroberfläche
HCU	HafenCity Universität Hamburg

(HD(CP) <sup>2</sup> )	High Definition Clouds and Precipitation for advancing Climate Prediction
H_TESSEL	Verbessertes Schema für 'Land Surface Hydrology' implementiert in ECMWF; Modell (ursprünglich: TESSEL -Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land)
Hz	Hertz
IASS	Institute for Advanced Sustainability Studies (Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung)
ICON	Icosahedral Nonhydrostatic (globales Modell)
IMUK	Institut für Meteorologie und Klimatologie
INIFOR	INItialization and FORcing
Intercal	Interkalibration
IOL	Intense Observation Location (Intensivbeobachtungsgebiet)
IOP	Intense Observation Period (Intensivmesskampagne)
KB	Knowledge Base
KPP 1	Kinetic Preprocessor (Kinetischer Präprozessor)
LCZ	Local Climate Zones (Lokale städtische Klimazonen)
LES	Large-Eddy Simulation
LIDAR	Light Detection And Ranging
LCS	Low Cost Sensoren
LTO	Long-Term Observation (Langzeitbeobachtung)
LU	Land Use (Landnutzungstypen)
LUH	Leibniz Universität Hannover
MOSAIC-2	Model-based city planning and application in climate change 2

MobiLab	Mobiles Messfahrzeug des Forschungszentrums Jülich (FZJiek8)
MUKLIMO_3	Dreidimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell des Deutschen Wetterdienstes
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (normierter differenzierter Vegetationsindex)
NetCDF	Network Common Data Form
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NHN	Normalhöhennull (NHN) ist die Bezeichnung der Bezugsfläche für die Angabe von Höhen über dem Meeresspiegel in Deutschland.
NO	Stickoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
O <sub>3</sub>	Ozon
PALM	Parallelized Large-Eddy Simulation Model
PALM-4U	PALM for Urban Applications (PALM für städtische Anwendungen; <i>sprich: PALM for you</i> )
PBL	Planetary Boundary Layer (Planetare Grenzschicht)
PET	Physiological Equivalent Temperature (Physiologisch Äquivalente Temperatur)
PM	Particulate Matter (Feinstaub)
ppb	parts per billion (10 <sup>-9</sup> )
ppm	parts per million (10 <sup>-6</sup> )
PT	Perceived Temperature (Gefühlte Temperatur)
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
RayMan	Radiation on the human body

RRTMG	Rapid Radiative Transfer Model
RS	Remote Sensing (Fernerkundung)
SALSA	Sectional Aerosol module for Large Scale Applications
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
SODAR	Sound Detecting And Ranging
SQL	Structured Query Language
TP	Teilprojekt
TKE	turbulente kinetische Energie (TKE)
TU	Technische Universität
TUB	Technische Universität Berlin
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (unbemanntes Luftfahrzeug)
[UC] <sup>2</sup>	Urban Climate Under Change (Stadtklima im Wandel)
UCL	Urban Canopy Layer (Stadthindernisschicht)
ü.G.	Höhe über Grund
ü. NN.	über Normalnull
UFP	Ultra fine particles (Ultrafeinstaub)
Urbmobi 3.0	Semi-permanentes mobiles Messsystem der Humboldt Universität zu Berlin
USM	Urban Surface Model
UTC	Coordinated Universal Time (Koordinierte Weltzeit)
UTCI	Universal Thermal Climate Index (Universeller thermischer Klimaindex)
UTM32	Universal Transverse Mercator, Zone 32
VALM*	Zu evaluierende Modellsimulationen

VALM*v1	Zu evaluierende Modellsimulationen, Version 1
VALM*v2	Zu evaluierende Modellsimulationen, Version 2
VALR*	Qualitätsgesicherte Referenzdatensätze für die Evaluation
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VOC	Volatile Organic Compounds (Flüchtige organische Substanzen)
WGS84	World Geodetic System 1984
WRF	Weather Research and Forecasting Model (Modell für Wettervorhersage und Klimamodellierung)

## Quellenverzeichnis

Burmeister, C.; Busche, K.; Heese, I.; Krüger, A.; Reinbold, A.; Teichmann, C.; Völker, V.; Weber, B.; Willen, L.; Winkler, M. (2023): Evaluationsbericht zur Praxistauglichkeit. Grundlagen für die Operationalisierung von PALM-4U – Praktikabilität und Verstetigungsstrategie (ProPolis). [UC]<sup>2</sup> - Stadtklima im Wandel – Phase 2 // Modul C. Online verfügbar unter: <https://www.uc2-propolis.de/palm-4u-evaluation-praxistauglichkeit>

Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B. (2011): The COST 732 Best Practice Guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: A summary. *International Journal of Environment and Pollution*. 44. 419-427. <http://dx.doi.org/10.1504/IJEP.2011.038443>.

Gehrke, K. F., Sühling, M., Maronga, B. (2021): Modeling of land–surface interactions in the PALM model system 6.0: land surface model description, first evaluation, and sensitivity to model parameters. *Geoscientific Model Development*, 14(8), 5307–5329.

Gronemeier, T., S. Raasch, and E. Ng (2017): Effects of Unstable Stratification on Ventilation in Hong Kong. *Atmosphere*, 8 (9), 168, <https://doi.org/10.3390/atmos8090168>.

Gronemeier, T. and M. Sühling (2019): On the Effects of Lateral Openings on Courtyard Ventilation and Pollution – a Large-Eddy Simulation Study. *Atmosphere*, 10 (2), 63, <https://doi.org/10.3390/atmos10020063>.

Halbig, G., Steuri B., Büter B., Heese I., Schultze J., Stecking M., Stratbücker S., Willen L., Winkler M. (2019): User requirements and case studies to evaluate the practicability and usability of the urban climate model PALM-4U. – *Met. Z.* Vol. 28, 2, 139–146. [DOI:10.1127/metz/2019/0914](https://doi.org/10.1127/metz/2019/0914).

Heinze, R., Dipankar, A., Henken, C.C., Moseley, C., Sourdeval, O., Trömel, S., Xie, X., Adamidis, P., Ament, F., Baars, H., Barthlott, C., Behrendt, A., Blahak, U., Bley, S., Brdar, S., Brueck, M., Crewell, S., Deneke, H., Di Girolamo, P., Evaristo, R., Fischer, J., Frank, C., Friederichs, P., Göcke, T., Gorges, K., Hande, L., Hanke, M., Hansen, A., Hege, H.-C., Hoose, C., Jahns, T., Kalthoff, N., Klocke, D., Kneifel, S., Knippertz, P., Kuhn, A., van Laar, T., Macke, A., Maurer, V., Mayer, B., Meyer, C.I., Muppa, S.K., Neggers, R.A.J., Orlandi, E., Pantillon, F., Pospichal, B., Röber, N., Scheck, L., Seifert, A., Seifert, P., Senf, F., Siligam, P., Simmer, C., Steinke, S., Stevens, B., Wapler, K., Weniger, M., Wulfmeyer, V., Zängl, G., Zhang, D. and Quaas, J. (2017), Large-eddy simulations over Germany using ICON: a comprehensive evaluation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 143: 69-100. doi:[10.1002/qj.2947](https://doi.org/10.1002/qj.2947).

Kadasch, E., Sühling, M., Gronemeier, T., Raasch, S. (2021): Mesoscale nesting interface of the PALM model system 6.0. *Geoscientific Model Development*, 14(9), 5435-5465.

Kiseleva, O., Gantner, L., Kalthoff, N., Kossmann, M., Holst, C., 2023: Evaluation of the Urban Climate Model PALM-4U over Hilly Terrain Using Wind and Turbulence Observations. *Meteorol. Z.* (submitted).

Langer, I., Fakharizadehshirazi, E., Werner, J.(2021), Spatial variation of physiologically equivalent temperature in different Local Climate Zones of a large city during a hot spell, *Met. Z.* Vol. 30,2, 24-36. DOI:[10.1127/metz/2020/0996](https://doi.org/10.1127/metz/2020/0996)

Li H., Meier F., Lee X., Chakraborty T., Liu J., Schaap M., Sodoudi S. (2018): Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin. *Science of The Total Environment*, 636, 818–828. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.254>.

Maronga, B., G. Groß, S. Raasch, S. Banzhaf, R. Forkel, W. Heldens, F. Kanani-Sühling, A. Matzarakis, M. Mauder, D. Pavlik, J. Pfafferott, S. Schubert, G. Seckmeyer, H. Sieker, K. Trusilova (2019a): Development of a new urban climate model based on the model PALM - Project overview, planned work, and first achievements, *Met. Z.*, Vol. 28, 2, 105-119. DOI: [10.1127/metz/2019/0909](https://doi.org/10.1127/metz/2019/0909).

Maronga, B., S. Banzhaf, C. Burmeister, T. Esch, R. Forkel, D. Fröhlich, V. Fuka, K.F. Gehrke, J. Geletič, S. Giersch, T. Gronemeier, G. Groß, W. Heldens, A. Hellsten, F. Hoffmann, A. Inagaki, E. Kadasch, F. Kanani-Sühring, K. Ketelsen, B. A. Khan, C. Knigge, H. Knoop, P. Krč, M. Kurppa, H. Maamari, A. Matzarakis, M. Mauder, M. Pallasch, D. Pavlik, J. Pfafferoth, J. Resler, S. Rissmann, E. Russo, M. Salim, M. Schrempf, J. Schwenkel, G. Seckmeyer, S. Schubert, M. Sühring, R. von Tils, L. Vollmer, S. Ward, B. Witha, H. Wurps, J. Zeidler, and S. Raasch (2019b): Overview of the PALM model system 6.0, Geosci. Model Dev. Discuss., resubmitted November 2019 DOI: [10.5194/gmd-2019-103](https://doi.org/10.5194/gmd-2019-103)

Raasch, S. and M. Schröter (2001): PALM - A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers, Meteorol. Z., 10, 363-372 DOI: [10.1127/0941-2948/2001/0010-0363](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2001/0010-0363)

Resler, J., P. Krc, M. Belda, P. Jurus, N. Benesova, J. Lopata, O. Vlcek, D. Damaskova, K. Eben, P. Derbek, B. Maronga, and F. Kanani-Sühring, 2017: PALM-USM v1.0: A new urban surface model integrated into the PALM large-eddy simulation model, Geosci. Model Dev., 10, 3635–3659, DOI: [10.5194/gmd-10-3635-2017](https://doi.org/10.5194/gmd-10-3635-2017).

Samad, A., Kiseleva, O., Holst, C. C., Wegener, R., Kossmann, M., Meusel, G., Fiehn, A., Erbertseder, T., Becker, R., Roiger, A., Stanislavsky, P., Klemp, D., Emeis, S., Kalthoff, N., & Vogt, U. (2023). Meteorological and air quality measurements in a city region with complex terrain: Influence of meteorological phenomena on urban climate. Meteorologische Zeitschrift. DOI: [10.1127/metz/2023/1124](https://doi.org/10.1127/metz/2023/1124)

Scherer, D., Antretter F., Bender S., Cortekar J., Emeis S., Fehrenbach U., Groß G., Halbig G., Hasse J., Maronga B., Raasch S., Scherber K. (2019a): Urban Climate Under Change [UC]<sup>2</sup> - A National Research Programme for Developing a Building-Resolving Atmospheric Model for Entire City Regions. Met. Z., Vol. 28, 2, 95-104. DOI: [10.1127/metz/2019/0913.s](https://doi.org/10.1127/metz/2019/0913.s)

Scherer, D., Ament F., Emeis S., Fehrenbach U., Leitl B., Scherber K., Schneider C., Vogt U. (2019b): Three-dimensional observation of atmospheric processes in three German cities. Met. Z., Vol. 28, 2, 121-138, DOI: [10.1127/metz/2019/0911](https://doi.org/10.1127/metz/2019/0911).

Scherer, D., Fehrenbach, U., Grassmann, T., Holtmann, A., Meier, F., Scherber, K., Pavlik, D., Höhne, T., Kanani-Sühring, F., Maronga, B., Ament, F., Banzhaf, S., Langer, I., Halbig, G., Kohler, K., Queck, R., Stratbücker, S., Winkler, M., Wegener, R., Zeeman, M. (2019c): [UC]<sup>2</sup>-Datenstandard "Stadtklima im Wandel" Version 1.3, [http://www.uc2-program.org/uc2\\_datenstandard.pdf](http://www.uc2-program.org/uc2_datenstandard.pdf)

Sodoudi S., Zhang H., Chi X., Müller F., Li H. (2018): The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 34, 85-96. DOI: [10.1016/j.ufug.2018.06.002](https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.06.002).

Di Sabatino Silvana , Riccardo Buccolieri, Helge R. Olesen, Matthias Ketzel, Ruwim Berkowicz, Jorg Franke, Michael Schatzmann, K. Heinke Schlünzen, Bernd Leitl, Rex Britter, Carlos Borrego, Ana Margarida Costa, Silvia Trini Castelli, Tamir G. Reisin, Antti Hellsten, Jarkko Saloranta, Nicolas Moussiopoulos, Fotios Barmpas, Krzysztof Brzozowski, Istvan Goricsan, Marton Balczo, John G. Bartzis, George Efthimiou, Jose Luis Santiago, Alberto Martilli, Martin Piringer, Kathrin Baumann-Stanzer, Marcus Hirtl, Alexander A. Baklanov, Roman B. Nuterma, Alexander V. Starchenko (2011), COST 732 in practice: the MUST model evaluation exercise, *International Journal of Environment and Pollution (IJEP)*, Vol. 44, No. 1/2/3/4

Steuri, B., Heese, I. (Hrsg., 2019): Evaluationsbericht zum neuen Stadtklimamodell PALM-4U

TUB (2019) Vergleichsmessungen der Lufttemperatur und relativen Feuchte in der Klimakammer. BMBF Verbundprojekt "Dreidimensionale Observierung atmosphärischer Prozesse in Städten". Fachbereich Klimatologie, Institut für Ökologie, Technische Universität Berlin, Version 09.01.2019, 26. S..

VDI (2017) Richtlinie 3783 Blatt 9: Umweltmeteorologie - Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.2.1: Konzept zur Evaluierung des PALM-4U-Modells. Durchgezogene Linien zeigen den Daten- und Informationsfluss. Gepunktete Linien geben die jeweiligen Partner an, die für die Durchführung von Modellsimulationen und Evaluierungsroutinen verantwortlich sind. Modul C-Partner sind die Praxispartner (Scherer et al., 2019).....	8
Abb. 3.0.1: Wetterlage im Validierungszeitraum VAL01 (17.01.2017 06:00 UTC bis 18.01.2017 06:00 UTC). Quelle: TUBklima.....	14
Abb. 3.0.2: Wetterlage im Validierungszeitraum VAL02 (16.07.2018 06:00 UTC bis 18.07.2018 06:00 UTC). Quelle: TUBklima.....	15
Abb. 3.1.1: Modelldomänen von PALM-4U, wie sie für die Validierungsläufe VALM01v2 und VALM02v2 verwendet wurden. Die Parent Domäne umfasst eine Fläche von 47 km x 39 km und wurde mit einer Auflösung von 16 m berechnet. Innerhalb dieser Domäne befinden sich die Child Domänen „TU Campus“ (rot markiert) und „Rothenburg“ (blau markiert), die jeweils eine Fläche von 2,8 km x 2,8 km abdecken und mit einer Auflösung von 2 m berechnet wurden. Quelle: Tobias Gronemeier (LUH). .....	17
Abb. 3.1.2: Vergleich des modellierten (PALM-4U parent) und gemessenen (Obs) Temperaturverlaufs für die Messstationen in der Berliner Parent Domäne während des Winterlaufs. Zusätzlich wird der COSMO-Antrieb für die Lufttemperatur während der Modelllaufzeit dargestellt. Es wurden pro Zeitschritt die Antriebe der vier Seiten der untersten Ebene des Modells gemittelt. Gütemaße (Medianwerte): RMSD: 3.45 K, r_pears: 0.84, skv: 84.59 %, MD: -3.20 K. Quelle: TUBklima.....	19
Abb. 3.1.3: Vergleich der Mean Deviation zwischen der modellierten und gemessenen Temperatur in Sechs-Stunden-Zeiträumen während VAL01. Links die Daten der Child Domain Stationen, rechts die der Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Quelle: TUBklima.....	20
Abb. 3.1.4: Mittlere MAE [K] der sechs Zeitintervalle (06-09 UTC, 10-13 UTC, 14-17 UTC, 18-21 UTC, 22-01 UTC und 02-05 UTC) vom 17. Januar 2017 der vier Baukörper auf dem Gelände der Technischen Universität Berlin. Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).....	21
Abb. 3.1.5: MAE der 2 m Temperatur in den LCZs von Berlin vom 17.01.2017. Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).....	21
Abb. 3.1.6: Beispiel am Standort GutsMuths für den Vergleich von Vertikalprofilen der potenziellen Temperatur am 18.01.2017 um 4:00 UTC, VALM01v1/VALR01. Gütemaße: Rsq=erklärte Varianz, r=Korrelationskoeffizient nach Pearson, rho= Korrelationskoeffizient nach Spearman, MSE=mean square error, RMSE=root mean square error, MAE=mean absolute error, bias=Abweichung der Mittelwerte, sd obs=Standardabweichung der	

Beobachtung, sd mod= Standardabweichung des Modells. (Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck, UAgeo).....	22
Abb. 3.1.7: 10-Minuten-Mittelwerte der beobachteten Lufttemperatur (schwarz), der simulierten Lufttemperatur (orange) und die stündlich gemittelte Lufttemperatur an der DWD-Station Berlin-Alexanderplatz (grün) während der VAL01-Simulationsperiode (17.01.2017 06:00 UTC bis 18.01.2017 06:00 UTC). Quelle: HUBgeo.....	23
Abb. 3.1.8: Vergleich der Messung (VALR01) der 2 m Temperatur in der Child-1-Domain mit den Modellergebnissen (VALM01) vom 17.01.2017 um den Ernst-Reuter-Platz. Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).....	24
Abb. 3.1.9: Vergleich des modellierten (PALM-4U parent) und gemessenen (Obs) Temperaturverlaufs für die Messstationen in der Berliner Parent Domäne während des Sommerlaufs. Zusätzlich wird der COSMO-Antrieb für die Lufttemperatur während der Modelllaufzeit dargestellt. Es wurden pro Zeitschritt die Antriebe der vier Seiten der untersten Ebene des Modells gemittelt. Gütemaße (Medianwerte): RMSD: 1.41 K, r_pear: 0.95, skv: 95.0 %, MD: -0.43 K. Quelle: TUBklima. ....	25
Abb. 3.1.10: Vergleich der Mean Deviation zwischen der modellierten und gemessenen Temperatur in Sechs-Stunden-Zeiträumen während VAL02. Links die Daten der Child Domain Stationen, rechts die der Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Quelle: TUBklima.....	26
Abb. 3.1.11: 10-Minuten-Mittelwert der beobachteten (schwarz) und simulierte Lufttemperatur (orange) während der VAL02-Simulationsperiode (16.07.2018 06:00 UTC bis 18.07.2018 06:00 UTC). Quelle: HUBgeo.....	27
Abb. 3.1.12: Tagesgang der 4 m Temperatur unter einem Baum in der Child-2 -Domain und rechts die zugehörige qq-Verteilung zwischen PALM-4U (rot) und der Beobachtung (schwarz). Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).....	28
Abb. 3.1.13: Temperaturdifferenz (PALM-4U-Beobachtung) vom 16.07.2018 in der Child-1- und Child-2 Domain sowie unter Bäumen. Die Boxplot Darstellung zeigt den Wertebereich der Differenzen aller Stationen in den entsprechenden Child-Domain's (obere Abb.) sowie unter den Bäumen (unten links). Abb. unten rechts zeigt den Verlauf der entsprechenden Mittelwerte für jede Stunde (Child-1 (rot), Child-2 (grün) und Bäume (blau)) als Differenzwert zwischen PALM-4U und Beobachtung. Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).....	29
Abb. 3.1.14: Streudiagramm der Stationsdaten gegenüber PALM-4U für alle Stationen im Bereich des SVF < 0.29 (links) sowie im Bereich zwischen 0.49 und 0.59 (rechts) vom 16.07.2018 in der Parent Domain für die 2 m Temperatur. Der grau schattierte Bereich zeigt den Bereich $\pm$ einer Standardabweichung um den jeweiligen Mittelwert. (Rot: Regressionsgerade von der Beobachtung zu PALM-4U und Schwarz: Winkelhalbierende	

zwischen Beobachtung und PALM-4U). Quelle: Ines Langer (FUBmeteo)..... 30

Abb. 3.1.15: Streudiagramm der Stationsdaten gegenüber PALM-4U für alle Stationen im Bereich des SVF < 0.29 (links) sowie im Bereich zwischen 0.49 und 0.59 (rechts) vom 16.07.2018 in der Parent Domain für die 2 m spezifische Feuchte. Der grau schattierte Bereich zeigt den Bereich  $\pm$  einer Standardabweichung um den jeweiligen Mittelwert. (Rot: Regressionsgerade von der Beobachtung zu PALM-4U und Schwarz: Winkelhalbierende zwischen Beobachtung und PALM-4U). Quelle: Ines Langer (FUBmeteo)..... 31

Abb. 3.1.16: Streudiagramm der Stationsdaten gegenüber PALM-4U für alle Stationen im Bereich der LCZ 2 (obere Abb.) und LCZ 6 (untere Abb.) vom 16.07.2018 (Tag 1) und vom 17.07.2018 (Tag 2) in der Parent Domain. Der grau schattierte Bereich zeigt den Bereich  $\pm$  einer Standardabweichung um den jeweiligen Mittelwert. (Rot: Regressionsgerade von der Beobachtung zu PALM-4U und Schwarz: Winkelhalbierende zwischen Beobachtung und PALM-4U). Quelle: Ines Langer (FUBmeteo)..... 32

Abb. 3.1.17: Streudiagramm der Stationsdaten gegenüber PALM-4U für alle Stationen im Bereich der LCZ A (obere Abb.) und G (untere Abb.) vom 16.07.2018 (Tag 1) und Tag 2 (17.07.2018) in der Parent Domain. Der grau schattierte Bereich zeigt den Bereich  $\pm$  einer Standardabweichung um den jeweiligen Mittelwert. (Rot: Regressionsgerade von der Beobachtung zu PALM-4U und Schwarz: Winkelhalbierende zwischen Beobachtung und PALM-4U). Quelle: Ines Langer (FUBmeteo)..... 33

Abb. 3.1.18: Stündlicher Vergleich der Vertikalprofile von modellierter (PALM) und gemessener (OBS (Drohne)) Temperatur für den Standort Berlin, Ernst-Reuter-Platz (tuerpl) vom 16.07.2018 06:00 UTC bis 17.07.2018 06:00 UTC. Gütemaße: RMSE=root mean square error, MSE=mean squared error, bias=Abweichung der Mittelwerte,  $R^2$ =Bestimmtheitsmaß. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk)..... 34

Abb. 3.1.19: Bias (links) und  $R^2$  (rechts) der Temperatur für Modell und Beobachtung im Tagesgang. Der betrachtete Zeitraum umfasst den 16.07.2018 06:00 UTC bis 17.07.2018 06:00 UTC für den Ernst-Reuter-Platz in Berlin. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk). ..... 35

Abb. 3.1.20: Beispiele am Standort Gutsmuths für den Vergleich von Vertikalprofilen der potenziellen Temperatur der Modellierung und Messungen für ausgewählte Uhrzeiten aus VALM02v1/VALR02, links: 12 Uhr, rechts 2 Uhr. ( $R_{sq}$ =erklärte Varianz,  $r$ =Pearson Korrelationskoeffizient,  $\rho$ =Spearman Korrelationskoeffizient, MSE=mean square error, RMSE=root mean square error, MAE=mean absolute error, sd=Standardabweichung). Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo)..... 36

Abb. 3.1.21: Tagesgang der Vertikalprofile der potenziellen Temperatur am Standort Gutsmuths für den Zeitraum 16. bis 18. Juli 2018, oben: PALM-4U, unten: Messung, VALM02v2/VALR02. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo).37

Abb. 3.1.22: Vergleich des RMSE zu verschiedenen Uhrzeiten für die Vertikalprofile der potentiellen Temperatur (K) (links) und des Mischungsverhältnisses (g/kg) (rechts) für VALM02v1 und VALM02v2 am Standort Gutsmuths, Childdomain. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo).....	38
Abb. 3.1.23: Vergleich der Lufttemperatur der Simulationsergebnisse (VALM04, grün) und der stationären Messungen in Bad Cannstatt, Stuttgart für die Child- (orange) und Parent-Domain (schwarz). Quelle: USifk. ....	39
Abb. 3.1.24: Vergleich der Lufttemperatur der Simulationsergebnisse (VALM04, grün) und der stationären Messungen in Schwabenzentrum, Stuttgart für die Child- (orange) und Parent-Domain (schwarz). Quelle: USifk.....	40
Abb. 3.1.25: Vergleich von mit PALM 4U modellierten (rot) und gemessenen (blau) Temperaturprofile am 08.07.2018. Quelle: FZJiek8.....	40
Abb. 3.1.26: Vergleich von mit PALM 4U modellierten (rot) und gemessenen (blau) Temperaturprofile am 09.07.2018. Quelle: FZJiek8.....	41
Abb. 3.1.27: Stündlicher Vergleich der Vertikalprofile von modellierter (PALM) und gemessener (OBS (Drohne)) Temperatur für den Standort Stuttgart, Marienplatz (marienpl) vom 08.07.2018 06:00 UTC bis 09.07.2018 06:00 UTC. Gütemaße: RMSE=root mean square error, MSE=mean squared error, bias=Abweichung der Mittelwerte, R <sup>2</sup> =Bestimmtheitsmaß. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).....	42
Abb. 3.1.28: Bias (links) und R <sup>2</sup> (rechts) der Temperatur für Modell und Beobachtung im Tagesgang. Der betrachtete Zeitraum umfasst den 08.07.2018 06:00 UTC bis 09.07.2018 06:00 UTC für den Marienplatz in Stuttgart. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).....	43
Abb. 3.1.29: WRF Ergebnisse für bodennahe Temperatur und Wind am 13. Februar 2018 um 06:00:00 UTC, unterlegt durch die Modelltopografie, mit einigen Städten markiert zur Orientierung. Quelle: IMK-TRO Sachbericht 2022. ....	44
Abb. 3.1.30: PALM-4U Ergebnisse für den selben Zeitpunkt wie in Abb. 3.1.29. Gezeigt sind Wind und Temperatur 15 m über der Oberfläche. Quelle: IMK-TRO Sachbericht 2022..	45
Abb. 3.1.31: Zeitreihen von Vertikalprofilen der potenziellen Temperatur im Zeitraum vom 05.06.2019 5:00 UTC bis 06.06.2019 5:00 UTC für einen innerstädtischen Standort in Augsburg, oben: PALM-4U, unten: Messungen mit einem Hexacopter. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo).....	46
Abb. 3.1.32: Links: Zeitreihe der potenziellen Temperaturen für den 05.06.2019 - 06.06.2019 (thermische Referenzsituation) in Augsburg, blau: Messungen an 43 Stationen, rot: entsprechende Werte aus der PALM-4U Simulation, Parent Domain. Rechts: Boxplots der mittleren Abweichungen (Bias) und der erklärten Varianz (Rsq) für den paarweisen Vergleich der Messungen mit dem Modelloutput. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph	

Beck (UAgeo).....	47
Abb. 3.1.33: Links: Zeitreihe der potenziellen Temperaturen für den 26.06.2019 (thermische Belastungssituation) in Augsburg, blau: Messungen an 43 Stationen, rot: entsprechende Werte aus der PALM-4U Simulation, Parent Domain. Rechts: Boxplots der mittleren Abweichungen (Bias) und der erklärten Varianz (Rsq) für den paarweisen Vergleich der Messungen mit dem Modelloutput. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo).....	48
Abb. 3.1.34: Boxplots der potenziellen Temperatur in Augsburg aufgeteilt nach Local Climate Zones (LCZs). Das x kennzeichnet den jeweiligen Mittelwert. Links: potentielle Temperatur in 2m Höhe über Grund aus PALM-4U. Rechts: potenzielle Temperatur aus einem stationären Messnetz, die Zahlen auf der x-Achse geben die Anzahl der Messstandorte in der jeweiligen LCZs an. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo). ....	49
Abb. 3.1.35: Stündlicher Vergleich der Vertikalprofile von modellierter (PALM) und gemessener (OBS (Drohne)) Temperatur für den Standort Hannover, Maschsee vom 06.08.2020 04:00 UTC bis 07.08.2020 04:00 UTC. Gütemaße: RMSE=root mean square error, MSE=mean squared error, bias=Abweichung der Mittelwerte, R <sup>2</sup> =Bestimmtheitsmaß. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).....	50
Abb. 3.1.36: Stündlicher Vergleich der Vertikalprofile von modellierter (PALM) und gemessener (OBS (Drohne)) Temperatur für den Standort Hannover, Altenbekener Damm vom 06.08.2020 04:00 UTC bis 07.08.2020 04:00 UTC. Gütemaße: RMSE=root mean square error, MSE=mean squared error, bias=Abweichung der Mittelwerte, R <sup>2</sup> =Bestimmtheitsmaß. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).....	51
Abb. 3.1.37: Bias (links) und R <sup>2</sup> (rechts) der Temperatur für Modell und Beobachtung im Tagesgang. Der betrachtete Zeitraum umfasst den 06.08.2020 04:00 UTC bis 07.08.2020 04:00 UTC für die Standorte Maschsee und Altenbekener Damm in Hannover. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).....	52
Abb. 3.1.38: Vergleich der 10-Minuten-Mittelwerte von modellierter („PALM“) und gemessener („OBS“) Temperatur für den Standort Hannover, Südstadt für fünf temporär installierte Klimamessstationen vom 06.08.2020 04:00 UTC bis 07.08.2020 04:00 UTC. Rechts oben ist die Temperaturdifferenz von Modell (PALM) und Beobachtung (OBS) im Tagesgang aufgetragen. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk). ....	53
Abb. 3.1.39: Vergleich der 10-Minuten-Mittelwerte von modellierter (PALM) und gemessener (OBS (Klimamessstationen)) Temperatur für den Standort Hannover, für fünf temporär installierte Klimamessstationen vom 06.08.2020 04:00 UTC bis 07.08.2020 04:00 UTC. Gütemaße: RMSE=root mean square error, MSE=mean squared error, bias=Abweichung der Mittelwerte, R <sup>2</sup> =Bestimmtheitsmaß. Rot: Regressionsgerade PALM-OBS, grau:	

Winkelhalbierende. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).....	54
Abb. 3.1.40: Vergleich des modellierten (PALM-4U parent) und gemessenen (Obs) Verlaufs der spezifischen Feuchte für die Messstationen in der Berliner Parent Domäne während des Winterlaufs. Zusätzlich wird der COSMO-Antrieb für die spezifische Feuchte während der Modelllaufzeit dargestellt. Es wurden pro Zeitschritt die Antriebe der vier Seiten der untersten Ebene des Modells gemittelt. Gütemaße (Medianwerte): RMSD: 0.38 g/kg, r_pearson: -0.09, skv: 38.31 %, MD: -0.30 g/kg. Quelle: TUBklima.....	55
Abb. 3.1.41: Vergleich der Mean Deviation zwischen der modellierten und gemessenen spezifischen Feuchte in Sechs-Stunden-Zeiträumen während VALM01/VALR01. Links die Daten der Child Do-main Stationen, rechts die der Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Quelle: TUBklima.....	56
Abb. 3.1.42: 10-Minuten-Mittelwerte der aus den Beobachtungen berechneten spezifischen Luftfeuchte (blau) und die simulierte spezifische Luftfeuchte (rot) während des VALM01-Simulationszeitraums (17.01.2017 06:00 UTC bis 18.01.2017 06:00 UTC). Quelle: HUBgeo. ....	57
Abb. 3.1.43: Vergleich der 2 m spezifischen Feuchte (VALR01) in der Child-1-Domain mit den Modellergebnissen (VALM01) vom 17.01.2017 um den Ernst-Reuter-Platz. Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).....	58
Abb. 3.1.44: Beispiele am Standort GutsMuths für den Vergleich von Vertikalprofilen der potenziellen Temperatur (links) und des Mischungsverhältnisses (rechts), jeweils am 18.01.2017 um 4:00 UTC, VALM01v1/VALR01. Gütemaße: Rsq=erklärte Varianz, r=Korrelationskoeffizient nach Pearson, rho= Korrelationskoeffizient nach Spearman, MSE=mean square error, RMSE=root mean square error, MAE=mean absolute error, bias=Abweichung der Mittelwerte, sd obs=Standardabweichung der Beobachtung, sd mod= Standardabweichung des Modells. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo).....	59
Abb. 3.1.45: Vergleich des modellierten (PALM-4U parent) und gemessenen (Obs) Verlaufs der spezifischen Feuchte für die Messstationen in der Berliner Parent Domain während des Sommer-laufs. Zusätzlich wird der COSMO-Antrieb für die spezifische Feuchte während der Modelllaufzeit dargestellt. Es wurden pro Zeitschritt die Antriebe der vier Seiten der untersten Ebene des Modells gemittelt. Gütemaße (Medianwerte): RMSD: 1.51 g/kg, r_pearson: 0.80, skv: 199.54 %, MD: -0.94 g/kg. Quelle: TUBklima. ....	60
Abb. 3.1.46: Vergleich der Mean Deviation zwischen der modellierten und gemessenen spezifischen Feuchte in Sechs-Stunden-Zeiträumen während VAL02. Links die Daten der Child Do-main Stationen, rechts die der Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Quelle: TUBklima.....	60

Abb. 3.1.47: Stündlicher Vergleich der Vertikalprofile von modellierter (PALM) und gemessener (OBS (Drohne)) spezifischer Feuchte für den Standort Berlin, Ernst-Reuter-Platz (tuerpl) vom 16.07.2018 06:00 UTC bis 17.07.2018 06:00 UTC. Gütemaße: RMSE=root mean square error, MSE=mean squared error, bias=Abweichung der Mittelwerte, R <sup>2</sup> =Bestimmtheitsmaß. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).....	62
Abb. 3.1.48: Bias (links) und R <sup>2</sup> (rechts) der Spezifischen Feuchte für Modell und Beobachtung im Tagesgang. Der betrachtete Zeitraum umfasst den 16.07.2018 06:00 UTC bis 17.07.2018 06:00 UTC für den Ernst-Reuter-Platz in Berlin. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk). .....	63
Abb. 3.1.49: 10-Minuten-Mittelwert der beobachteten (schwarz) und simulierte Luftfeuchtigkeit (orange) während der VAL02-Simulationsperiode (16.07.2018 06:00 UTC bis 18.07.2018 06:00 UTC). Quelle: HUBgeo.....	64
Abb. 3.1.50: Beispiele für Vertikalprofile des Mischungsverhältnisses am Standort Gutmuths um 12 Uhr (links) und 2 Uhr (rechts), VALM02v1/VALR02. (Rsq=erklärte Varianz, r=Pearson Korrelationskoeffizient, rho=Spearman Korrelationskoeffizient, MSE=mean square error, RMSE=root mean square error, MAE=mean absolute error, sd=Standardabweichung). Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo). .....	65
Abb. 3.1.51: Stündlicher Vergleich der Vertikalprofile von modellierter (PALM) und gemessener (OBS (Drohne)) spezifischer Luftfeuchte für den Standort Stuttgart, Marienplatz (marienpl) vom 08.07.2018 06:00 UTC bis 09.07.2018 06:00 UTC. Gütemaße: RMSE=root mean square error, MSE=mean squared error, bias=Abweichung der Mittelwerte, R <sup>2</sup> =Bestimmtheitsmaß. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).....	66
Abb. 3.1.52: Bias (links) und R <sup>2</sup> (rechts) der Spezifischen Feuchte für Modell und Beobachtung im Tagesgang. Der betrachtete Zeitraum umfasst den 08.07.2018 06:00 UTC bis 09.07.2018 06:00 UTC für den Marienplatz in Stuttgart. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).....	67
Abb. 3.1.53: Vergleich der relativen Luftfeuchtigkeit der Simulationsergebnisse (VALM04) und der stationären Messungen in Bad Cannstatt, Stuttgart.....	68
Abb. 3.2.1: Vergleich der modellierten (PALM-4U parent) und gemessenen (Obs) Windgeschwindigkeiten für die Messstationen in der Berliner Parent Domäne während des Winterlaufs. Quelle: TUBklima.....	69
Abb. 3.2.2: Vergleich der Mean Deviation zwischen den modellierten und gemessenen Windgeschwindigkeiten in Sechs-Stunden-Zeiträumen während VALM01. Rechts die Daten der Parent Stationen, die in den Child Domains liegen, links die der Child Domain Stationen. Quelle: TUBklima.....	69
Abb. 3.2.3: Vergleich des modellierten (PALM-4U parent) und gemessenen (Obs) Verlaufs der Wind-richtung für die Messstationen in der Berliner Parent Domäne während des Winterlaufs. Quelle: TUBklima.....	70

Abb. 3.2.4: Vergleich der Mean Deviation zwischen der modellierten und gemessenen Windrichtungen in Sechs-Stunden-Zeiträumen während VALM02. Links die Daten der Parent Stationen, die in den Child Domains liegen, rechts die der Child Domain Stationen. 71

Abb. 3.2.5: 10-Minuten-Mittelwerte der beobachteten Windgeschwindigkeit (schwarz), der simulierten Windgeschwindigkeit (orange) und die stündlich gemittelte Windgeschwindigkeit an der DWD-Station in Berlin-Alexanderplatz (grün) während der VAL01-Simulationsperiode (17.01.2017 06:00 UTC bis 18.01.2017 06:00 UTC). Quelle: HUBgeo..... 72

Abb. 3.2.6: 10-Minuten-Mittelwert der beobachteten Windrichtung (schwarz), simulierte Windrichtung (orange) und stündlich gemittelte Windrichtung an der DWD-Station in Berlin-Alexanderplatz (grün) während der VAL01-Simulationsperiode (17.01.2017 06:00 UTC bis 18.01.2017 06:00 UTC). Quelle: HUBgeo..... 73

Abb. 3.2.7: Vergleich der modellierten (PALM-4U parent) und gemessenen (Obs) Windgeschwindigkeiten für die Messstationen in der Berliner Parent Domäne während des Sommerlaufs. Quelle: TUBklima..... 74

Abb. 3.2.8: Vergleich der Mean Deviation zwischen den modellierten und gemessenen Windgeschwindigkeiten in Sechs-Stunden-Zeiträumen während VALM02. Rechts die Daten der Parent Stationen, die in den Child Domains liegen, links die der Child Domain Stationen. Quelle: TUBklima..... 75

Abb. 3.2.9: Vergleich des modellierten (PALM-4U parent) und gemessenen (Obs) Verlaufs der Windrichtung für die Messstationen in der Berliner Parent Domäne während des Sommerlaufs. Quelle: TUBklima..... 76

Abb. 3.2.10: Vergleich der Mean Deviation zwischen der modellierten und gemessenen Windrichtungen in Sechs-Stunden-Zeiträumen während VALM02. Links die Daten der Parent Stationen, die in den Child Domains liegen, rechts die der Child Domain Stationen. Quelle: TUBklima..... 76

Abb. 3.2.11: Vergleich der simulierten und gemessenen Windgeschwindigkeit und der Windrichtung (Pfeilspitzen - Ausrichtung in Grad) am Standort TU Campus am 17. Juli 2018. Quelle: TUBklima..... 77

Abb. 3.2.12: Vergleich der Windgeschwindigkeiten (oben) und der Windrichtungen (unten, Süd: -180° und 180°, Nord: 0°) am Standort TU Campus zwischen 16. Juli 2017 08:00 UTC und 17. Juli 2018 06:00 UTC (links) sowie zwischen 17. Juli 2017 08:00 UTC und 18. Juli 2018 06:00 UTC (rechts). Quelle: TUBklima..... 78

Abb. 3.2.13: Beispiele für Vergleiche der Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit in PALM-4U und den Messungen zu verschiedenen Uhrzeiten für VALM02/VALR02. Oben: Standort Gutsmuths, unten: Tempelhofer Feld. Für den Vergleich wurden die Messprofile innerhalb

der Modellschichten gemittelt („UAS mean“), das Originalprofil wurde zusätzlich eingezeichnet („UAS orig“). Folgende Gütemaße wurden berechnet:  $R_{sq}$ =erklärte Varianz,  $r$ =Pearson Korrelationskoeffizient,  $\rho$ =Spearman Korrelationskoeffizient, MSE=mean square error, RMSE=root mean square error, MAE=mean absolute error, sd=Standardabweichung, obs=Beobachtung, mod=PALM-4U. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo)..... 80

Abb. 3.2.14: Vergleich des RMSE zu verschiedenen Uhrzeiten für die Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit [m/s] für VALM02v1 und VALM02v2 am Standort Gutmuths, Child Domain. Quelle: Annette Straub, Andreas Philipp, Christoph Beck (UAgeo)..... 81

Abb. 3.2.15: Vergleich zwischen simulierten PALM-4U Daten (b, d) und gemessenen Lidar Daten (a, c) für horizontale (a, b) und vertikale (c, d) mittlere 10-min Windgeschwindigkeiten. Der Zeitraum umfasst 48 Stunden vom 13. bis 15. Februar 2018 00:00 UTC. .... 81

Abb. 3.2.16: Potentielle Temperatur (Isolinien), Horizontalwind (Pfeile), Grenzschichtcharakteristika (CBL, NBL, and RL) und Bewölkung. (a) Beobachtung. (b) Simulation. Blaue Punkte: Radiosonde an mschnarren, grüne Punkte: Radiosonde an erwshoettpl, rote Punkte: Ceilometer an mschnarren. Wolkenuntergrenze und Bedeckungsgrad (in Achteln) sind von Ceilometerdaten (mschnarren) abgeleitet. Dreiecke zeigen (von rechts nach links) Sonnenaufgang, Sonnenuntergang und wieder Sonnenaufgang. .... 82

Abb. 3.2.17: Stündliche Mittelwerte und Standardabweichungen der Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Referenzdaten (rot) und Simulationen (blau) auf 1000 m asl und 410 m asl..... 84

Abb. 3.3.1: Gemessene (türkis) und im Modell simulierte (violett) Globalstrahlung (rsd), kurzwellige Reflexstrahlung (rsu), langwellige Gegenstrahlung (rld), langwellige Ausstrahlung (rlu) und Strahlungsbilanz ( $Q^*$ ) während der Periode VALM02/VALR02 am Standort rothenburg. Quelle: TUBklima..... 86

Abb. 3.3.2: Absolute Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Strahlungsflüssen am Standort rothenburg (oben) und korrespondierende Wolkenbedeckung am nahegelegenen Ceilometer-Standort im Grunewald. Quelle: TUBklima..... 87

Abb. 3.3.3: Tagesgang der Strahlungsbilanz ( $Q^*$ ), der Globalstrahlung ( $K_{\downarrow}$ ), der kurzwelligen Reflexstrahlung ( $K_{\uparrow}$ ), der langwelligen Gegenstrahlung ( $L_{\downarrow}$ ) und der langwelligen Ausstrahlung ( $L_{\uparrow}$ ) für die zur Evaluation genutzten Messungen auf einem Gründach am Flughafen BER im Vergleich zu PALM-4U..... 88

Abb. 3.4.1: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) kinematischen Impulsflüsse über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Kovarianzen aus den Windkomponenten u und w (links) sowie v und w (rechts). Messpunkt war die Eddy-

Kovarianz-Station auf dem Dach des TU-Berlin Hauptgebäudes. Quelle: TUBklima..... 89

Abb. 3.4.2: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) kinematischen sensiblen Wärmeflüsse über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Kovarianzen aus der vertikalen akustischen Temperatur  $t_{va}$  und der Windkomponente  $w$ . Messpunkt war die Eddy-Kovarianz-Station auf dem Dach des TU-Berlin Hauptgebäudes. Quelle: TUBklima.90

Abb. 3.4.3: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) Böenfaktoren über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Verhältnisse aus den Standardabweichungen der Windkomponente  $u$  und dem Mittelwert von  $u$  (links) sowie den Standardabweichungen der Windkomponente  $v$  und dem Mittelwert von  $v$  (rechts). Messpunkt war die Eddy-Kovarianz-Station auf dem Dach des TU-Berlin Hauptgebäudes. Quelle: TUBklima..... 90

Abb. 3.4.4: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) kinematischen Impulsflüsse über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Kovarianzen aus den Windkomponenten  $u$  und  $w$  (links) sowie  $v$  und  $w$  (rechts). Messpunkt war die Eddy-Kovarianz-Station auf dem Dach des TU-Berlin Hauptgebäudes. Quelle: TUBklima..... 91

Abb. 3.4.5: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) kinematischen Impulsflüsse über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Kovarianzen aus den Windkomponenten  $v$  und  $w$ . Messpunkte waren die Eddy-Kovarianz-Stationen auf dem Messturm in der Rothenburgstraße. Links sind die Flüsse in 10 m Messhöhe, rechts die in 40 m dargestellt. Quelle: TUBklima. .... 91

Abb. 3.4.6: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) kinematischen sensiblen Wärmeflüsse über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Kovarianzen aus der vertikalen akustischen Temperatur  $t_{va}$  und der Windkomponente  $w$ . Messpunkt war die Eddy-Kovarianz-Station auf dem Dach des TU-Berlin Hauptgebäudes. Quelle: TUBklima.92

Abb. 3.4.7: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) kinematischen sensiblen Wärmeflüsse über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Kovarianzen aus der vertikalen akustischen Temperatur  $t_{va}$  und der Windkomponente  $w$ . Messpunkte waren die Eddy-Kovarianz-Stationen auf dem Messturm in der Rothenburgstraße. Links sind die Flüsse in 10 m Messhöhe, rechts die in 40 m dargestellt. Quelle: TUBklima..... 92

Abb. 3.4.8: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) Böenfaktoren über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Verhältnisse aus den Standardabweichungen der Windkomponente  $u$  und dem Mittelwert von  $u$  (links) sowie den Standardabweichungen der Windkomponente  $v$  und dem Mittelwert von  $v$  (rechts). Messpunkt war die Eddy-Kovarianz-Station auf dem Dach des TU-Berlin Hauptgebäudes. Quelle: TUBklima..... 93

Abb. 3.4.9: Vergleich der gemessenen (ref) und berechneten (mod) Böenfaktoren über 30-Minuten-Zeiträume. Dargestellt sind die Verhältnisse aus den Standardabweichungen der Windkomponente  $v$  und dem Mittelwert von  $v$ . Messpunkte waren die Eddy-Kovarianz-

Stationen auf dem Messturm in der Rothenburgstraße. Links sind die Böenfaktoren in 10 m Messhöhe, rechts die in 40 m dargestellt. Quelle: TUBklima. ....	93
Abb. 3.4.10: Tagesgang des fühlbaren (QH), latenten (QE) und konduktiven Wärmeflusses des Gründachsubstrats (QG) für die zur Evaluation genutzten Messungen auf einem Gründach am Flughafen BER im Vergleich zu PALM-4U.....	95
Abb. 3.4.11: (a) Zeitlicher Verlauf der Grenzschichthöhe abgeleitet aus Ceilometerdaten an mschnarren (stündliche Mittelwerte und Standardabweichungen - rote Linie) und PALM-4U-Simulationen für das 3x3 km <sup>2</sup> -Gebiet (räumliche Mittelwerte und Standardabweichungen – blaue Linie) sowie die Grenzschichthöhe aus dem Radiosondenaufstieg um 10:45 UTC an mschnarren. (b) Profile der potenziellen Temperatur, $\Theta$ , spezifischer Feuchte q, u- und v-wind Komponenten von Radiosonden an mschnarren um 10:45 UTC (durchgezogene rote Linie) und PALM-4U-Simulationen für das 3x3 km <sup>2</sup> -Gebiet (räumliche Mittelwerte und Standardabweichungen) um 11:00 UTC (blaue durchgezogene und gestrichelte Linie). Die gepunkteten Linien zeigen die Grenzschichthöhen aus Beobachtung (rot) und Simulation (blau).....	97
Abb. 3.4.12: Zeitreihen von $\sigma_w^2$ auf der Höhe von 350 m agl, (a) stündlich gleitend und (b) dreistündlich gleitend von Vertikalwinden aus Referenzdaten an den Positionen cityhall (rot), cityafus (lila) und aus Simulationsdaten an den Positionen cityhall (blau), cityafus (himmelblau). Die gepunktete Linie in a) und b) zeigt 3x3 km <sup>2</sup> räumlich aggregierte $\sigma_w$ , 3x32 und die durchgezogene schwarze Linie in a) stündlich gleitende in b) dreistündlich gleitende Mittelwerte, die aus $\sigma_w$ , 3x32 berechnet sind. Die Standardabweichung ist grau hinterlegt. ....	98
Abb. 3.4.13: Mittlere Varianz der beiden horizontalen u,v (links) und der vertikalen w (rechts) Windkomponenten in der gesamten Grenzschicht am 23. August 2020 auf Basis der hochaufgelösten 20 Hz Messungen am Wettermast Hamburg sowie der PALM-4U Simulation mit 10 m und 1 m Gitterauflösung in allen drei Raumrichtungen. ....	99
Abb. 3.4.14: Wand-parallele (a) und wand-normale (b) Turbulenzintensitäten für verschieden raue Oberflächen sowie die entsprechenden PALM-4U Simulationen mit unterschiedlichen Rauigkeiten.....	101
Abb. 3.4.15: Die Modellgebäude wurden im Windkanal WOTAN als freistehende Gebäude platziert. Abb. (a) zeigt die Positionen der Messprofile im Windkanal und in den PALM-4U Simulationen. Die in lila markierten Messprofile sind bei seitlicher Anströmung aufgenommen worden. In grün ist das Messprofil im Luv und in orange das Profil im Lee des Modellgebäudes markiert. Detailaufnahmen der Fassadenrauigkeiten der Modellgebäude im Windkanal mit mäßig rauer Fassade (b) und rauer Fassade (c) sind ebenfalls dargestellt.....	102
Abb. 3.4.16: Logarithmische wandnormale Profile der jeweiligen wandparallelen mittleren Geschwindigkeiten für die seitliche Anströmung (a) und für die Strömung vor dem	

Modellgebäude (b) auf mittlerer Gebäudehöhe. Die mittleren Geschwindigkeiten wurden durch die Referenzgeschwindigkeit $u_{ref}(z = 45 \text{ m})$ , gemessen in der Anströmung vor dem Gebäude, normiert.....	103
Abb. 3.4.17: Logarithmische wandnormale Profile der jeweiligen wandnormalen turbulenten Flüsse $u'v'$ bzw. $u'w'$ für die seitliche Anströmung vor dem Staupunkt (a), die seitliche Anströmung hinter dem Staupunkt (b), für die Strömung vor (c) und hinter dem Modellgebäude (d) auf mittlerer Gebäudehöhe. Die Legende entspricht jener aus Abb. 3.4.16. ....	104
Abb. 3.4.18: Logarithmische wandnormale Profile der jeweiligen Quadrantenanteile der turbulenten Flüsse für die seitliche Anströmung hinter dem Staupunkt in der PALM-4U Simulation und für die Windkanalmessung bei glatter Fassade.....	105
Abb. 3.5.1: Aus Messwerten berechnete (türkis) und im Modell simulierte (violett) bioklimatische Indizes während der Periode VALM02/VALR02 am Standort schillerosz, Quelle: TUBklima.....	106
Abb. 3.6.1: 10-Minuten-Mittelwerte der beobachteten PM10-Konzentration (schwarz) und der simulierten PM10-Konzentration (orange) während der VAL01-Simulationsperiode vom 17.01.2017 06:00 UTC bis zum 18.01.2017 06:00 UTC. ....	108
Abb. 3.6.2: 10-Minuten-Mittelwert der beobachteten (schwarz) und simulierte PM10 Konzentration (orange) während der VAL02-Simulationsperiode (16.07.2018 06:00 UTC bis 18.07.2018 06:00 UTC).....	109
Abb. 3.6.3: 1-Minuten-Mittelwert der beobachteten PM10 Konzentration (schwarz) und simulierte PM10 Konzentration (orange) für eine Fahrradtrajektorie während der VAL02-Simulationsperiode vom 16.07.2018 06:00 UTC bis zum 18.07.2018 06:00 UTC.....	110
Abb. 3.6.4: Vergleich der stündlichen mittleren PM10-Konzentrationsverteilung zwischen VALM04 simulierten (MOD) und gemessenen (OBS) Werten am Marienplatz, Quelle: USifk. ....	111
Abb. 3.6.5: Vergleich des Ozonmischungsverhältnisses ( $trO_3$ ) simuliert von PALM-4U für 35 m Höhe über Grund mit den beobachteten Daten von Mobilab (blau) und verschiedenen Stationen im Hintergrund von Berlin. Quelle: FZJiek8.....	113
Abb. 3.6.6: Mittleres Höhenprofil für Ozon für die simuliert in VALM01. Quelle: FZJiek8.	113
Abb. 3.6.7: Zeitverlauf des mittleren Höhenprofile für Ozon simuliert für VALM01. Quelle: FZJiek8.....	114
Abb. 3.6.8: Zeitverlauf des mittleren Höhenprofile für Stickoxide ( $NO_x$ ) und PM10 simuliert für VALM01. ....	115
Abb. 3.6.9: Vertikal integrierte $NO_2$ -Konzentrationen (Säulendichten in Moleküle/cm <sup>2</sup> ) über Berlin von PALM-4U simuliert (VALM02) (oben) und von TROPOMI beobachtet für die	

angegebenen synoptischen Zeitpunkte innerhalb der IOP-4 (Sommer Berlin 2018). Quelle: DLRFdf	115
Abb. 3.6.10: NO <sub>2</sub> -Vertikalprofile von PALM-4U (blau) und POLYPHEMUS/DLR (rot) über Berlin während der IOP4. Quelle: DLRFdf	116
Abb. 3.6.11: Zeitreihen von NO <sub>2</sub> -Konzentrationen an ausgewählten Stationen in Berlin während der IOP4, die verschiedene, stadtklimatologisch relevante Umgebungen repräsentieren. Die Kurven zeigen die Ergebnisse von PALM-4U (VALM02, rot), POLYPHEMUS/DLR (blau) und in-situ Umgebungsluft BLUME Messnetz (grün). Die Auswertungen wurden für alle Stationen mit Datenverfügbarkeit durchgeführt. Quelle: DLRFdf	117
Abb. 3.6.12: Wie Abb. 3.6.11, nur für die Verkehrsstation DEBE061 und NO <sub>2</sub> -Konzentrationen im Vergleich PALM-4U Parent (oben) und Child Domain (unten)	119
Abb. 3.6.13: Links: X- und Y- Koordinaten der N02 und N03-Domäne von VALM04 in Stuttgart zusammen mit den Koordinaten der mobilen Messungen von Cessna (DLR, grün) und MobiLab (FZJ, blau). Rechts: Zeitverläufe des simulierten (rot) und beobachteten (blau) Ozonmischungsverhältnisses, Quelle: FZJiek8	120
Abb. 3.6.14: Vergleich von mit PALM 4U modellierten (rot) und gemessenen (blau) Höhenprofilen von Ozon am 08.07.2018. Mittlere Ozonwerte von Hintergrundstationen in grün, Hintergrundwerte von COSMO in orange. Quelle: FZJiek8	121
Abb. 3.6.15: Vergleich von mit PALM 4U modellierten (rot) und gemessenen (blau) Höhenprofilen von Ozon am 09.07.2018. Mittlere Ozonwerte von Hintergrundstationen (grün), Hintergrundwerte von COSMO (orange). Quelle: FZJiek8	122
Abb. 3.6.16: Vergleich von mit PALM 4U modellierten (rot) und gemessenen (blau) Höhenprofilen von Stickstoffdioxid am 08.07.2018. Die Hintergrundwerte von COSMO sind orange. Quelle: FZJiek8	123
Abb. 3.6.17: Vergleich von mit PALM 4U modellierten (rot) und gemessenen (blau) Höhenprofilen von Stickstoffdioxid am 09.07.2018. Die Hintergrundwerte von COSMO sind orange. Quelle: FZJiek8	124
Abb. 3.6.18: Räumliche Verteilung der Stickoxide in 2 m Höhe über Grund simuliert mit PALM4U (links) und beobachtet mit dem MobiLab (rechts). Quelle: FZJiek8	125
Abb. 3.6.19: Relative Häufigkeitsverteilung der simulierten (oben) und beobachteten (unten) Mischungsverhältnisse für Stickoxide bei einer Messfahrt am 08.07.2018. Die Daten wurden für die Domäne N02 mit einer Gitterweite von 10 m simuliert. Quelle: FZJiek8	126
Abb. 3.6.20: Relative Häufigkeitsverteilung der simulierten (oben) und beobachteten (unten) Mischungsverhältnisse für Stickoxide für den 08.07.2018 und den 09.07.2018. Die Daten wurden für die Domäne N03 mit einer Gitterweite von 2 m simuliert. Quelle: FZJiek8	126

Abb. 3.6.21: Vergleich der NO<sub>2</sub>-Konzentrationen von den Simulationsergebnissen (VALM04) und die stationären Messungen am (a) Hauptstätterstraße, (b) Am Neckartor, (c) Hohenheimerstraße, und (d) Arnulf-Klett-Platz, Stuttgart. Quelle: USifk .....127

Abb. 3.6.22: Vergleich der NO-Konzentrationen von den Simulationsergebnissen (VALM04) und die stationären Messungen am Bad Cannstatt, Stuttgart. Quelle: USifk.....128

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.0.1: Tabelle mit vereinbarten statistischen Größen und deren Definition. Teilweise tauchen, je nach Autoren, verschiedene Schreibweisen und Abkürzungen auf. * Für die Standardabweichung der Windrichtung wurde die Methode nach Yamartino (1984) verwendet. ....	13
Tab. 3.1.1: Die Werte der statistischen Gütemaße, aggregiert über den gesamten Validierungszeit-raum, jeweils die Medianwerte. Child: Stationen in den Child Domains. ParentC: Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Quelle: TUBklima.....	20
Tab. 3.1.2: Die Werte der statistischen Gütemaße, aggregiert über den gesamten Validierungszeit-raum, jeweils die Medianwerte. Child: Stationen in den Child Domains. ParentC: Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Quelle: TUBklima.....	27
Tab. 3.1.3: Die Werte der statistischen Gütemaße, aggregiert über den gesamten Validierungszeit-raum, jeweils die Medianwerte. Child: Stationen in den Child Domains. ParentC: Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Quelle: TUBklima.....	56
Tab. 3.1.4: Die Werte der statistischen Gütemaße, aggregiert über den gesamten Validierungszeit-raum, jeweils die Medianwerte. Child: Stationen in den Child Domains. ParentC: Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Quelle: TUBklima.....	61
Tab. 3.2.1: Die Werte der statistischen Gütemaße, aggregiert über den gesamten Validierungszeit-raum, jeweils die Medianwerte. ParentC: Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Child: Stationen in den Child Domains. Quelle: TUBklima. ....	70
Tab. 3.2.2: Die Werte der statistischen Gütemaße, aggregiert über den gesamten Validierungszeit-raum, jeweils die Medianwerte. ParentC: Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Child: Stationen in den Child Domains. Quelle: TUBklima. ....	71
Tab. 3.2.3: Die Werte der statistischen Gütemaße, aggregiert über den gesamten Validierungszeit-raum, jeweils die Medianwerte. ParentC: Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Child: Stationen in den Child Domains. Quelle: TUBklima. ....	75
Tab. 3.2.4: Die Werte der statistischen Gütemaße, aggregiert über den gesamten Validierungszeit-raum, jeweils die Medianwerte. ParentC: Parent Stationen, die in den Child Domains liegen. Child: Stationen in den Child Domains. Quelle: TUBklima. ....	77
Tab. 3.2.5: RMSE und NRMSE der Windgeschwindigkeit und RMSE der Windrichtung zwischen Referenzdaten und PALM-4U-Simulationen für 1000 m asl und 410 m asl. Die Angaben ohne Klammern gelten für den Zeitraum von 0000 UTC am 14. August bis 1200 UTC am 15. August und die Werte mit Klammern gelten für den Zeitraum von 0000 bis 2100 UTC am 14. August. Für den NRMSE wurde der RMSE mit dem Tagesmittelwert von $\sigma_w$ (1.8 m s <sup>-1</sup> ) normiert. ....	83

Tab. 3.5.1: RMSE und Pearson-Korrelationskoeffizient für die vier biometeorologischen Indizes. Quelle: TUBklima .....	107
Tab. 3.6.1: Systematische Auswertung zweier ausgewählter Verkehrsstationen in Berlin für die Modellsysteme PALM-4U und POLYPHESMUS/DLR bezüglich der Stationsmessungen der Umgebungsluft für NO <sub>2</sub> . Quelle: DLRdfd .....	118



## Annex 1

Übersicht Teilprojekte (TP) in Projektphase 1, Projektleiter (Principal Investigators, PI), Institutionen und Akronyme

TP	PI	Institution	Acronym
1	Dieter Scherer	Technische Universität Berlin (TUB), Fachgebiet Klimatologie	TUBklima
1	Andreas Philipp	Universität Augsburg (UA), Institut für Geographie	UAgeo
1	Jörn Welsch	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen Berlin	SenSWB
1	Andreas Kerschbaumer	Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin	SenUVKB
2	Christoph Schneider	Humboldt-Universität zu Berlin (HUB), Geographisches Institut	HUBgeo
3	Uwe Ulbrich	Freie Universität Berlin (FUB), Institut für Meteorologie	FUBmeteo
4	Stephan Weber	Technische Universität Braunschweig (TUBS), Institut für Geoökologie	TUBSgeo
5	Erika von Schneidmesser	Institute of Advanced Sustainability Studies Potsdam	IASS
6	Dieter Klemp	Forschungszentrum Jülich (FZJ), Institut für Energie- und Klimaforschung	FZJiek8
7	Stefan Emeis	Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Meteorologie und Atmosphärische Klimaforschung, Umweltforschung	KITimkifu
7	Norbert Kalthoff	Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Troposphärenforschung	KITimktro
8	Ulrich Vogt	Universität Stuttgart (US), Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik	USifk
8	Ulrich Reuter	Amt für Umweltschutz Stuttgart, Abteilung Stadtklimatologie	AfUSklima
9	Valeri Goldberg	Technische Universität Dresden (TUDD), Professur für Meteorologie	TUDDmeteo
10	Bernd Leitl	Universität Hamburg (UHH), Meteorologisches Institut	UHHmeteo
10	Felix Ament	Universität Hamburg (UHH), Meteorologisches Institut	UHHmeteo
11	Meinolf Koßmann	Deutscher Wetterdienst (DWD), Geschäftsbereich Klima und Umwelt	DWDku1
12	Günter Groß	Leibniz Universität Hannover (LUH), Institut für Meteorologie und Klimatologie	LUHimuk
13	Peter Trute	GEO-NET Umweltconsulting GmbH	GEONET
14	Thilo Erbertseder	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum	DLRdfd
14	Anke Roiger	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Physik der Atmosphäre	DLRpa

Übersicht Teilprojekte (TP) in Projektphase 2, Projektleiter (Principal Investigators, PI), Institutionen und Akronyme

TP	PI	Institution	Acronym
01	Dieter Scherer	Technische Universität Berlin, Fachgebiet Klimatologie	TUBklima
02	Tobias Sauter	Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut	HUBgeo
03	Uwe Ulbrich	Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie	FUBmeteo
04	Stephan Weber	Technische Universität Braunschweig, Institut für Geoökologie	TUBSgeo
05	Thilo Ebertseder	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum	DLRdfd
06	Dieter Klemp	Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung	FZJiek8
07	Christopher Holst,	Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Meteorologie und Atmosphärische Klimaforschung, Umweltforschung	KITimkifu
07	Olga Kiseleva	Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Troposphärenforschung	KITimkro
08	Ulrich Vogt	Universität Stuttgart, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik	USifk
08	Rayk Rinke	Amt für Umweltschutz, Luftreinhaltung, Klimaschutz	AfUSklima
09	Valeri Goldberg	Technische Universität Dresden, Professur für Meteorologie	TUDDmeteo
10	Bernd Leitl	Universität Hamburg, Meteorologisches Institut	UHHmeteo
10	Felix Ament	Universität Hamburg, Meteorologisches Institut	UHHmeteo
11	Andreas Philipp, Christoph Beck	Universität Augsburg, Institut für Geographie	UAgeo
12	Günter Groß	Leibniz Universität Hannover, Institut für Meteorologie und Klimatologie	LUHimuk