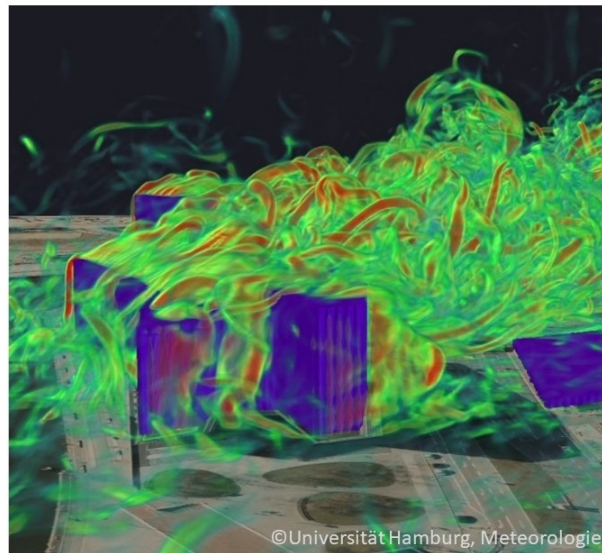


# [UC]<sup>2</sup>-Evaluierungsbericht

## Teil 1

Version 2, 05.06.2024



Erbertseder, T., Schneider, C., Ament, F., Fehrenbach, U., Fritz, S., Goldberg, V., Grassmann, T., Hansen, A., Heusinger, J., Holtmann, A., Kalthoff, N., Kiseleva, O., Klemp, D., Koßmann, M., Langer, I., Leitl, B., Maronga, B., Meier, F., Meusel, G., Meyer-Kornblum, A., Philipp, A., Queck, R., Raasch, S., Roiger, A., Samad, A., Scherber, K., Schneidmesser von, E., Sühning, M., Venkatraman Jagatha, J., Vogt, U., Weber, S., Wegener, R., Scherer, D.

Arbeitsgruppe 'Modellevaluierung' der Fördermaßnahme

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

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Vorwort

Der vorliegende Evaluierungsbericht (Teil 1) 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.

Teil 1 des [UC]<sup>2</sup>-Evaluierungsberichtes umfasst das Evaluierungskonzept, einen Überblick zum Modellsystem und den Simulationsergebnissen sowie die Beschreibung der qualitätsgeprüften Referenzdaten. In Teil 2 des Evaluierungsbericht werden die Evaluierungsergebnisse vorgestellt. Ferner werden Kerndiagnostiken beschrieben, welche die Grundlage für ein weiterentwickeltes Evaluierungskonzept für moderne Stadtklimamodelle schaffen sollen. 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 Auswirkungen des globalen Klimawandels werden sich diese Probleme in den nächsten Jahrzehnten weiter verstärken und zusätzliche Anstrengungen zur Minderung und Anpassung erforderlich machen.

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

---

<sup>1</sup> Die Arbeitsgruppe Modellevaluierung begann in der Förderphase 1 (2016-2019) und wurde in Phase 2 der Fördermaßnahme (2019-2023) als programmweite Aktivität fortgeführt

Berlin. Bisher verfügbare Stadtklimamodelle sind 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 decken nur kleinere Stadtgebiete ab und können 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, muss 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 waren 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 möglichst gering bleiben sollen. Daher bestand ein weiteres zentrales Ziel der Fördermaßnahme darin, ausgewählte Anwendungsbeispiele und Nutzerkreise direkt in die Modellentwicklung und Erhebung der Messdaten zu integrieren, um die Praxistauglichkeit des Stadtklimamodells und der Messkonzepte und Analysewerkzeuge sicherzustellen.

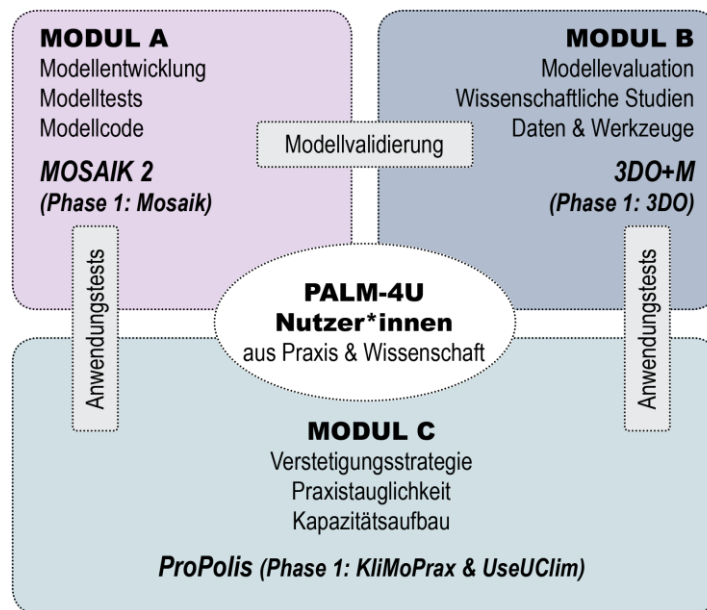


Abb. 0.1: Modellvalidierung als modulübergreifende Aufgabe in der Fördermaßnahme [UC]². Quelle: Antonina Krueger, GERICS Helmholtz-Zentrum Hereon.

Um das breite Spektrum und die Komplexität der Forschungs- und Entwicklungsaufgaben zu adressieren, wurde die Fördermaßnahme<sup>2</sup> [UC]² 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.....	2
1. Einleitung.....	7
1.1 Zielsetzung.....	7
1.2 [UC] <sup>2</sup> -Evaluierungsstrategie .....	7
1.3 Konventionen und Definitionen.....	18
1.4 Gliederung des Evaluierungsberichts.....	20
2. Modellbeschreibung, Konfiguration und Simulationsergebnisse .....	22
2.1 PALM-4U Konfiguration .....	22
2.2 Simulationen für die Modellstädte Berlin, Hamburg und Stuttgart .....	29
2.3 Zusätzliche Simulationen mit PALM-4U und Sondermessungen.....	30
2.4 Performance des PALM-4U Codes / technische Validierung .....	55
2.5 Vorwärtsoperatoren.....	55
2.6 Zusätzliche Simulationen mit anderen Modellen .....	56
3. Qualitätsgeprüfte Referenzdatensätze aus LTO- und IOP-Messungen .....	62
3.1 [UC]2-Datenmanagementsystem .....	62
3.2 Lufttemperatur und -feuchte (M. Koßmann) .....	66
3.3 Wind (O. Kiseleva).....	76
3.4 Strahlung und Wolken (A. Holtmann).....	89
3.4.1 Strahlung .....	89
3.4.2 Wolken .....	92
3.5 Turbulenz und Eddy-Kovarianz (F. Ament, A. Hansen) .....	93
3.6 Thermischer Wirkungskomplex (R. Queck).....	98
3.7 Luftchemie (S. Weber, D. Klemp, T. Erbertseder, C. Schneider).....	105
3.7.1 Feinstaub (PM10, PM2.5 und UFP).....	105
3.7.2 Spurengase .....	112
4. Schlussfolgerungen und Ausblick .....	139
Danksagung .....	140
Abkürzungsverzeichnis.....	141
Quellenverzeichnis .....	146
Abbildungsverzeichnis.....	152
Tabellenverzeichnis.....	163
Annex 1 .....	164
Annex 2 .....	167

**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 im Projektverbund entwickelten und umgesetzten Evaluierungsstrategie. Er umfasst das Evaluierungskonzept unter Darlegung und Diskussion der genutzten qualitätsgesicherten Referenzdatensätze und erlaubt letztlich die Bewertung von PALM-4U hinsichtlich seiner Genauigkeit, möglicher Anwendungen und Grenzen der Anwendungsmöglichkeiten. Der Evaluierungsbericht Teil 1 trägt als wesentlicher Baustein zur Dokumentation und Bewertung des Erfolgs der gesamten [UC]<sup>2</sup>-Fördermaßnahme bei.

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

Das Konzept zur Evaluierung des Stadtklimamodells PALM-4U ist in Abb. 1.2.1 dargestellt und zeigt den allgemeinen Daten- und Informationsfluss zur Evaluierung von PALM-4U (Scherer et al., 2019a). Partner aus den Modulen A und B waren in enger Zusammenarbeit hauptsächlich für die Modellvalidierung verantwortlich. Modul A führte dabei schwerpunktmäßig technische und Plausibilitätsprüfungen (interne Validierung) einzelner PALM-4U-Komponenten durch, das heißt 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 Rückkopplung der Evaluierungsergebnisse an Modul A zur Bewertung und gegebenenfalls Verbesserung des Modells war hierbei elementar.

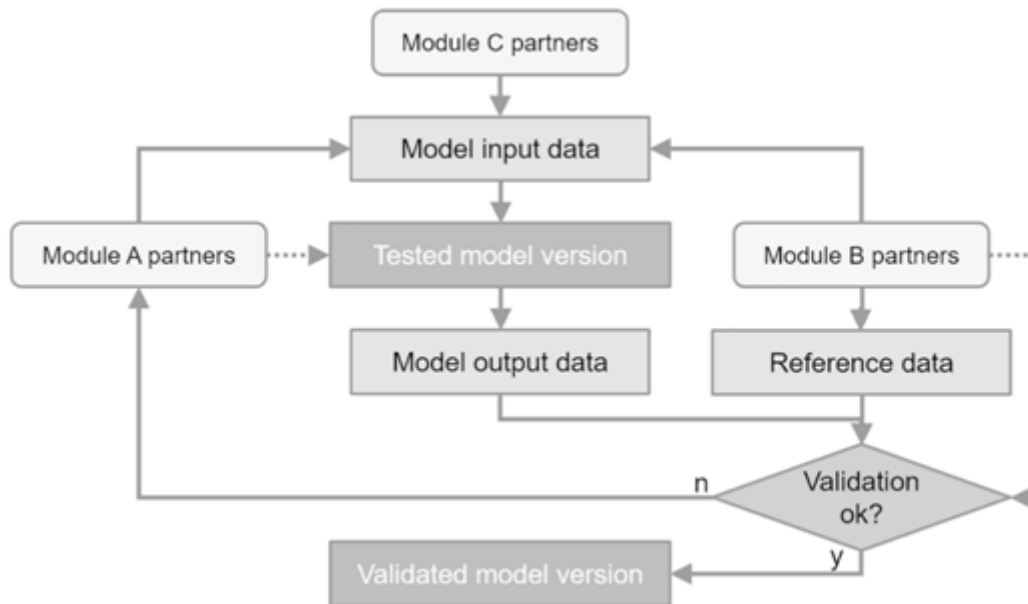


Abb. 1.2.1: Konzept zur Evaluierung von PALM-4U. Durchgezogene Linien zeigen den Daten- und Informationsfluss. Gepunktete Linien geben die jeweiligen Partner an, die für die Durchführung von Modellsimulationen und Evaluierungsroutinen verantwortlich sind. Modul C-Partner sind die Praxispartner. Quelle: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

Qualitätsgesicherte Referenzdatensätze zur Evaluierung von PALM-4U wurden durch Modul B in [UC]<sup>2</sup> entweder aus bestehenden Langzeitbeobachtungen (Long Term Observations, LTOs) aufbereitet, in Intensivmesskampagnen (Intense Observation Periods, IOPs) und Sondermesskampagnen erhoben sowie durch physikalische Experimente im Grenzschichtwindkanal gewonnen (siehe Tabelle 1.2.1). Die IOPs sind von 1 bis 4 nummeriert und wurden in Berlin, Hamburg und Stuttgart in Phase 1 der Fördermaßnahme durchgeführt. Hierzu entwickelte Modul B einen umfangreichen experimentellen Forschungsaufbau, um dreidimensionale Datensätze zu atmosphärischen Prozessen über Städten mit sehr hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung über ausreichend lange Zeiträume zu erfassen. Darüber liegen Datensätze satellitengestützter Beobachtungen für die drei Stadtregionen vor (Scherer et al., 2021).

Berlin, die Hauptstadt und größte deutsche Stadt, wurde ausgewählt, da sie ideale Bedingungen für die Validierung städtischer Klimamodelle bietet. Atmosphärische Prozesse und damit das städtische Klima und die Bedingungen bezüglich der Luftqualität in Berlin werden weder durch topografisch induzierte Prozesse noch durch Land-Seewind-Effekte oder andere durch die Küste induzierte Einflüsse maskiert. Im Gegensatz dazu sind in Hamburg maritime Einflüsse vorhanden. Stuttgart ist eine der deutschen Städte mit den größten Problemen bei der Luftqualität, die maßgeblich durch die geografische Lage in topografisch komplexem Gelände verursacht bzw. verschärft werden. Topografisch induzierte Prozesse wie Kaltluftströme können jedoch auch die Luftqualität in Städten das



ganze Jahr über positiv beeinflussen und die Auswirkungen der städtischen Wärmeinsel in Sommernächten abschwächen.

Neben Fragestellungen auf gesamtstädtischer Skala wurden für die Evaluierung spezifischer Prozesse auch Intensivbeobachtungsgebiete (Intense Observation Locations, IOLs) gewählt (wie z. B. der TUB Campus Charlottenburg in Berlin für die Evaluierung des Stadtklimas in einem verkehrsreichen und stark versiegelten Innenstadtbereich). Für die IOLs wurden zudem physikalische Experimente im Grenzschichtwindkanal (Environmental Wind Tunnel Laboratory, EWTL) für Idealfälle durchgeführt, welche bei der primären Evaluierung von Strömungsverhältnissen (Windfeld und Turbulenz) eine Schlüsselrolle im Evaluierungskonzept einnehmen.

Tab. 1.2.1: Kategorien der in [UC]<sup>2</sup> erhobenen, aufbereiteten sowie qualitätsgeprüften Referenzdatensätze:

<b>LTO - Long Term Observations</b>	bestehende und in [UC] <sup>2</sup> neu durchgeführte und aufbereitete Langzeitbeobachtungen	gesamtstädtisch: Berlin, Hamburg, Stuttgart (Abb. 1.2.2, 1.2.4, 1.2.6)
<b>IOP - Intense Observation Periods</b>	in [UC] <sup>2</sup> durchgeführte Intensivmesskampagnen zur Gewinnung von qualitätsgesicherten Referenzdatensätzen	gesamtstädtisch Berlin, Stuttgart, Hamburg; IOP-1, Winter 2017 IOP-2, Sommer 2017 IOP-3, Winter 2018 IOP-4, Sommer 2018
<b>IOL - Intense Observation Locations</b>	Intensivbeobachtungsgebiete zur Evaluierung spezifischer stadtklimatischer Prozesse gekoppelt an PALM-4U Domänen mit Lupenfunktion in höchster räumlicher Auflösung (1-2 m)	TUB Campus Charlottenburg, Berlin und Rothenburgstraße, Berlin (Abb. 1.2.3); HafenCity Universität, Hamburg (Abb. 1.2.5) Stuttgart-Zentrum (Abb. 1.2.7)
<b>EWTL - Environmental Wind Tunnel Laboratory</b>	in [UC] <sup>2</sup> durchgeführte physikalische Experimente im Grenzschichtwindkanal (Idealfälle)	TUB Campus Charlottenburg, Berlin und Rothenburgstraße, Berlin (Abb. 1.2.3); HafenCity Universität, Hamburg (Abb. 1.2.5) Stuttgart-Zentrum (Abb. 1.2.7)

Das Konzept für die Messungen in Berlin verfolgte zwei Ziele. Daten von LTO-Standorten, die unterschiedliche städtische Strukturen repräsentieren und über die gesamte Stadt verteilt sind, wurden verwendet, um die innerstädtische Variabilität der atmosphärischen Bedingungen sowohl in Bodennähe als auch in der Planetary Boundary Layer (PBL) zu charakterisieren (Abb. 1.2.2). Somit ermöglichen diese Daten die Analyse und Bewertung von mesoskaligen Mustern in oberflächennahen atmosphärischen Variablen wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit oder Konzentrationen von Luftschadstoffen sowie von vertikalen Profilen von Wind, Turbulenz oder Aerosolkonzentrationen, die sowohl aus Beobachtungen als auch mittels numerischer Simulationen abgeleitet wurden. Messungen, während der IOPs fanden hauptsächlich in den beiden IOLs in Berlin statt (Abb. 1.2.3), für die PALM-4U-Simulationen unter Verwendung von Modelldomänen mit einem Gitterabstand von 1 bzw. 2 m durchgeführt worden sind. Da sich viele der LTO-Standorte auch innerhalb der beiden IOLs befinden, decken die resultierenden Datensätze ein breites Spektrum atmosphärischer Variablen ab, die gleichzeitig an einer Vielzahl von Standorten in verschiedenen vertikalen Ebenen mit modernster Instrumentierung gemessen wurden. Beobachtungsdaten von LTO in Berlin sind aus verschiedenen Quellen umfassend verfügbar (Abb. 1.2.2) und ermöglichen detaillierte Untersuchungen städtischer atmosphärischer Prozesse.

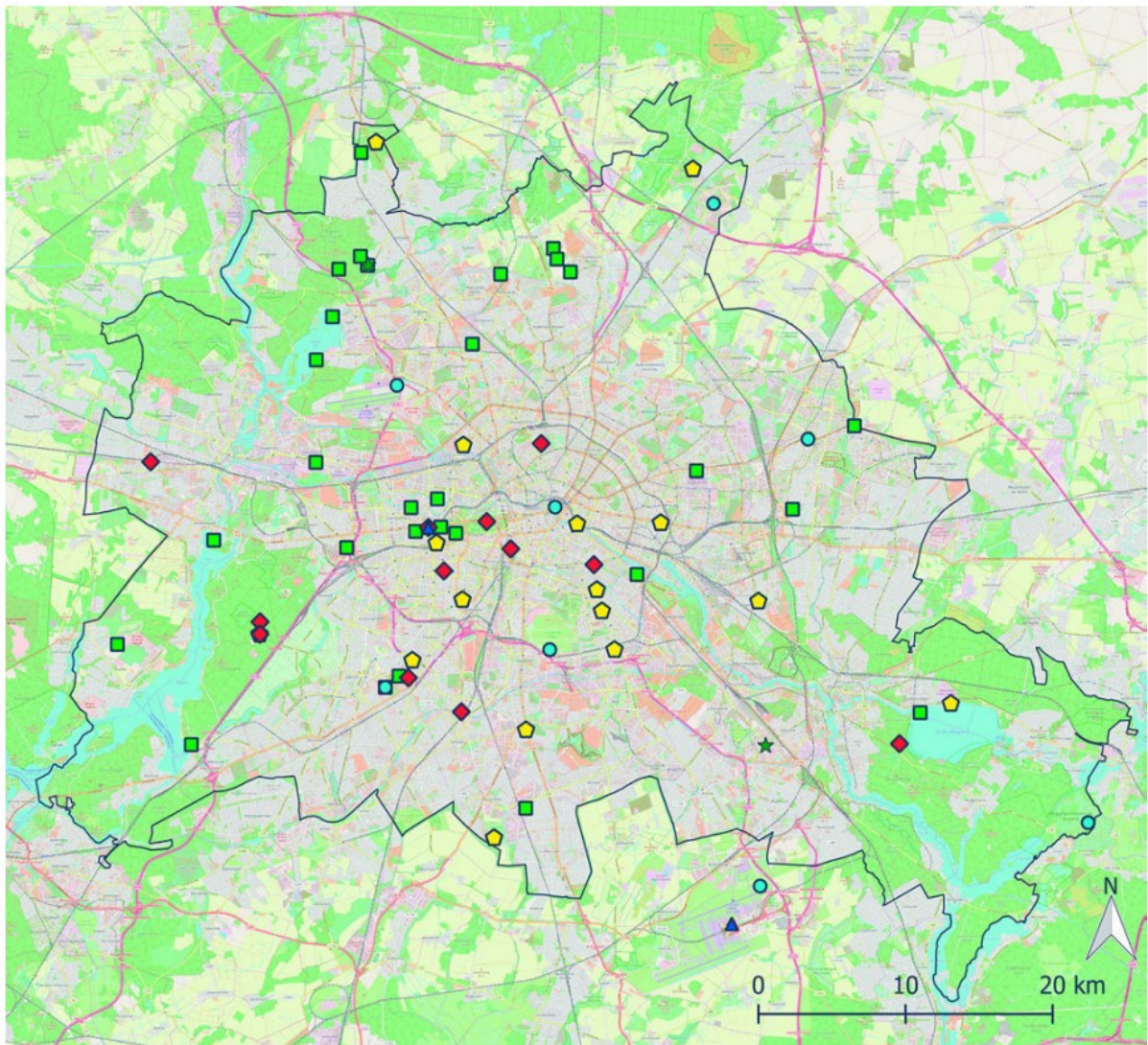


Abb. 1.2.2: LTOs in Berlin (schwarze Linie: Stadtgrenze) im Rahmen von [UC]<sup>2</sup>. Daten der LTOs werden von folgenden Institutionen bereitgestellt (Akronyme siehe Annex 1): SenUVKB, Berliner Luftgüte Messnetz (BLUME) (gelbe Pentagone); DWD (Cyan-Kreise); FUBmeteo (hellgrüne Quadrate); HUBgeo (dunkelgrüne Sterne); TUBklima: (rote Diamanten); TUBSgeo (dunkelblaue Dreiecke). Kartenquelle: OpenStreetMap – veröffentlicht unter OdbL 1.0. Quelle: Scherer et al. 2019b.

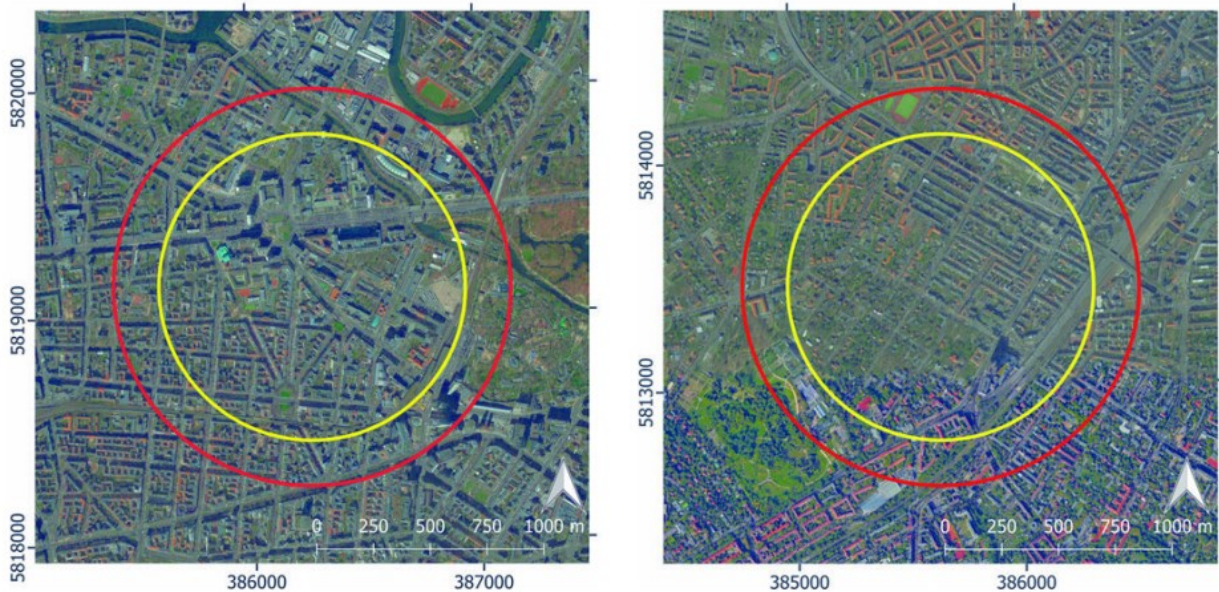


Abb. 1.2.3: IOLs in Berlin (Akronyme siehe Annex 1). Links: TUB Campus Charlottenburg; rechts: Rothenburgstraße, Steglitz. Rote Kreise: maßstabsgetreue Modelle (Radius 875 m) für Windkanalversuche (EWTL) des UHHmeteo; gelbe Kreise: zu analysierende Bereiche (Radius 675 m). Die Kartendarstellungen sind in WGS84 / Pseudo-Mercator-Projektion. Koordinaten an Bildrändern sind in UTM33 angegeben. Kartenquelle: © 2017 GeoBasis-DE / BKG (© 2009), Google. Quelle: Scherer et al. 2019b.

In Hamburg wurde eine zweistufige LTO-Strategie implementiert, um sowohl regionale als auch lokale Wetterbedingungen in der Stadt zu beobachten und atmosphärische Veränderungen durch die städtische Umwelt zu bewerten (Abb. 1.2.4). Die IOPs in Hamburg waren die kleinskaligen Gegenstücke der LTOs, die Referenzdaten für die Modellevaluierung, insbesondere für Wind und Turbulenzen, boten. Die Umgebung der HafenCity Universität Hamburg (HCU) an der Elbe direkt im Stadtzentrum wurde als Zielgebiet ausgewählt, da sie vergleichsweise einfache Strömungsbedingungen aufweist (Abb. 1.2.5). Ein erneuter zweistufiger Ansatz, bei dem sowohl der Antrieb als auch die lokale Reaktion gemessen wurden, ermöglichte die Erstellung eines genau definierten Testfalls für Modelle, die Strömungen über und um das HCU-Gebäude simulieren.

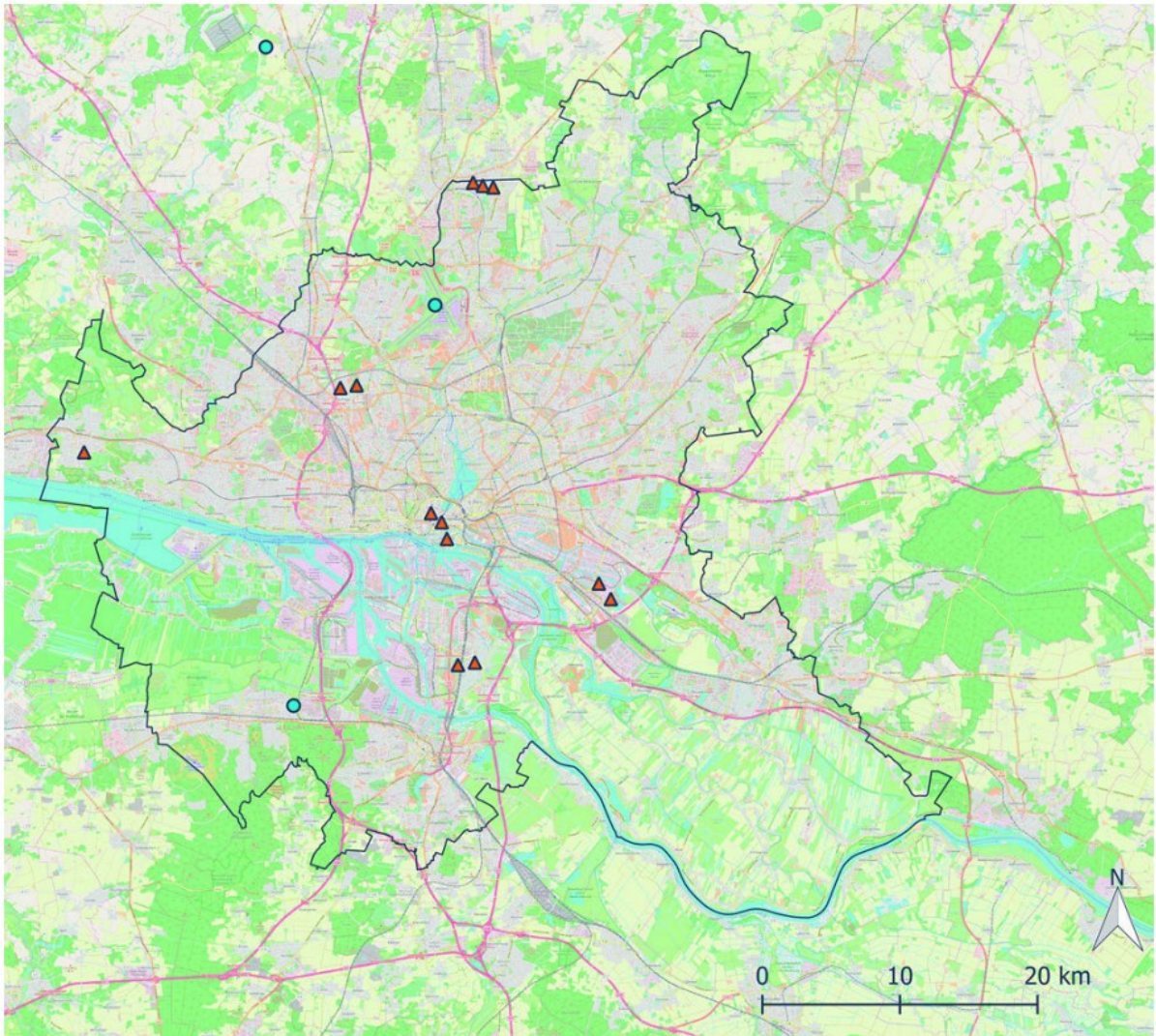


Abb. 1.2.4: LTOs in Hamburg (schwarze Linie: Stadtgrenze) im Rahmen von [UC]<sup>2</sup>. Daten der LTOs werden von folgenden Institutionen bereitgestellt (Akronyme siehe Annex 1): DWD (Cyan-Kreise); UHHmeteo (orangefarbene Dreiecke). Kartenquelle: OpenStreetMap - veröffentlicht unter ODbL 1.0. Quelle: Scherer et al. 2019b.

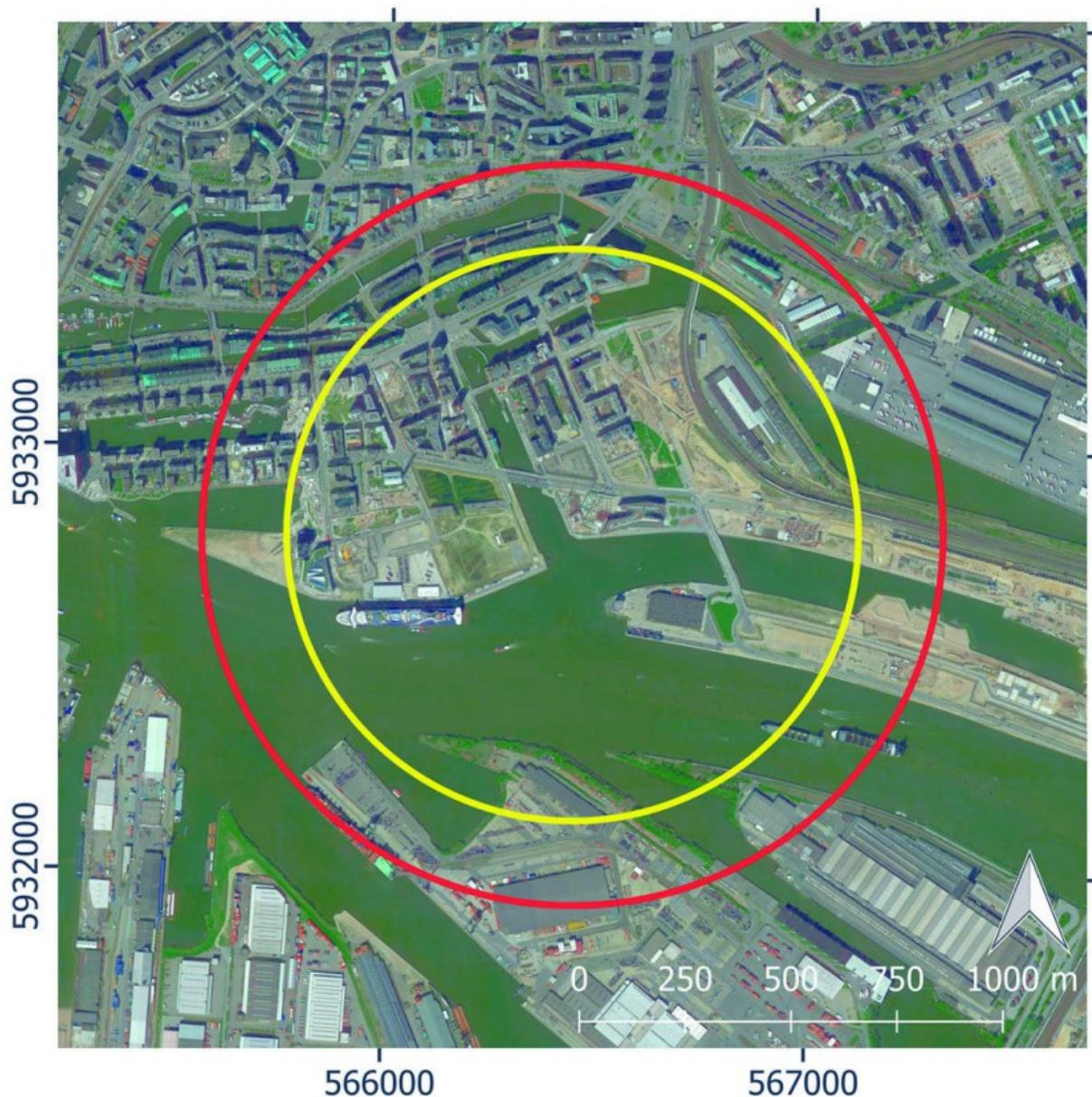


Abb. 1.2.5: IOL in der Hamburger HafenCity (Akronyme siehe Annex 1). Roter Kreis: Modell (1: 500; Radius 875 m) zur Verwendung durch Windkanalversuche (EWTL) des UHHmeteo; gelber Kreis: zu analysierende Fläche (Radius 675 m). Die Bilder sind in WGS84 / Pseudo-Mercator-Projektion. Koordinaten an Bildrändern sind in UTM32. Kartenquelle: © 2017 GeoBasis-DE / BKG (© 2009), Google. Quelle: Scherer et al. 2019b.

Die in Stuttgart durchgeführten Messungen dienten der Erfassung von Daten zu topografisch induzierten Winden und deren Veränderungen durch das Stadtgefüge (Abb. 1.2.6 und 1.2.7). Insbesondere die Rolle der Luftströmungen für die Verteilung von Luftschadstoffen ist von größter Bedeutung, da Stuttgart eine der deutschen Städte mit den höchsten Konzentrationen an Luftschadstoffen ist. Messungen, während der IOPs konzentrierten sich auf zwei IOLs in Stuttgart, von denen eine auch für Windkanalversuche herangezogen wurde.

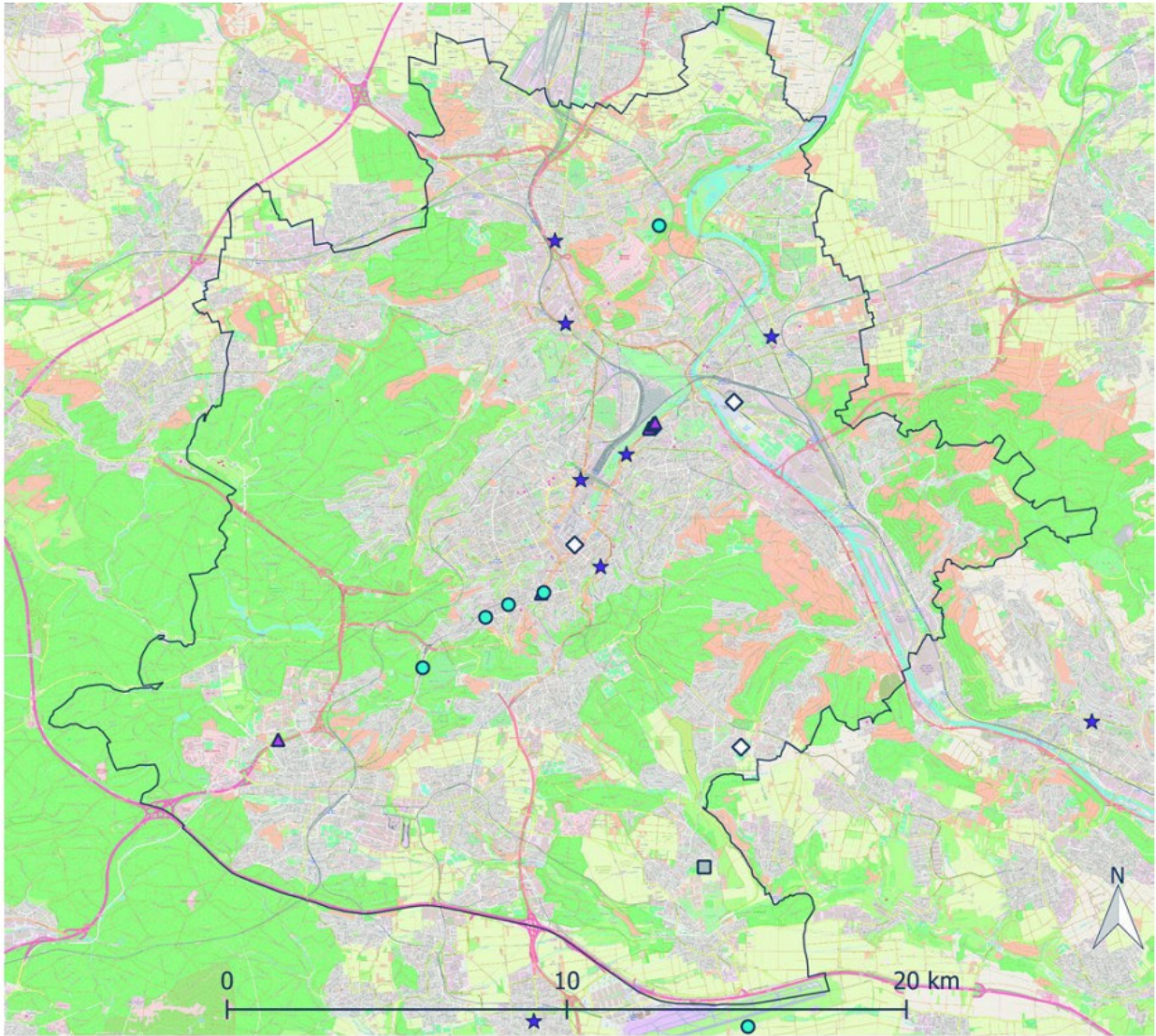


Abb. 1.2.6: LTOs in Stuttgart (schwarze Linie: Stadtgrenze) im Rahmen von [UC]<sup>2</sup>. Daten der LTOs werden von folgenden Institutionen bereitgestellt (Akronyme siehe Annex 1): Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (lila Sterne); AfUSklima (weiße Diamanten); DWD (Cyan-Kreise), Universität Hohenheim (graues Quadrat), USIfk (rosa Dreiecke). Kartenquelle: OpenStreetMap - veröffentlicht unter ODbL 1.0. Quelle: Scherer et al. 2019b.

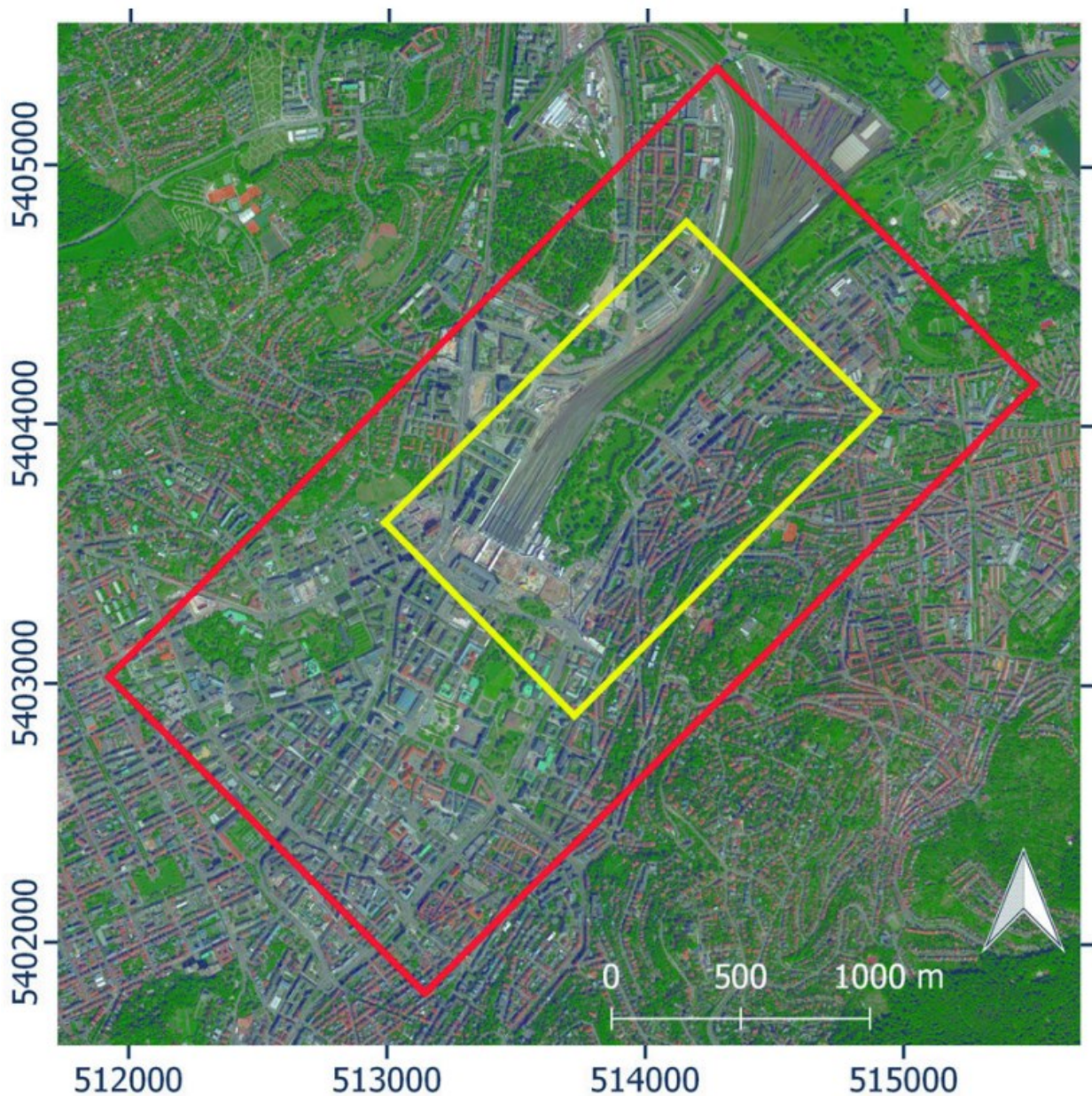


Abb. 1.2.7: IOL in Stuttgart (Akronyme siehe Annex 1). Rotes Rechteck: Modell im Maßstab (1: 500; Ausdehnung 875 m) für Windkanalversuche des UHHmeteo; gelbes Rechteck: zu analysierende Fläche (Ausdehnung 675 m). Die Bilder befinden sich in S84 / Pseudo-Mercator-Projektion. Koordinaten an Bildrändern sind in UTM32. Kartenquelle: © 2017 GeoBasis-DE / BKG (© 2009), Google. Quelle: Scherer et al. 2019b.

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



In der Fördermaßnahme [UC]<sup>2</sup> wurden daher die Modellergebnisse nicht nur mit Messdaten (siehe auch Tabelle 1.2.1), sondern auch mit Daten aus Windkanalversuchen (EWTL) und Ergebnissen weiterer numerischer Modelle verglichen. Dieses Vorgehen betrifft sowohl den RANS-Modus (RANS: Reynolds-averaged Navier Stokes) als auch den LES-Modus des PALM-4U-Modells. Die Bewertung umfasste 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, die daher gründlich zu analysieren sind. Die Genauigkeit eines Modells in Bezug auf einzelne Variablen zu kennen, bedeutet nicht, dass ein Modell für jeden Zweck im Zusammenhang der betrachteten Variablen geeignet wäre. Dies ist vielmehr eine noch komplexere Aufgabe, da auch zweckspezifische Anforderungen an die Datengenauigkeit bekannt sein müssen. Diese Aufgabe bleibt für weitere und folgende Forschungsaktivitäten bestehen.

Hochauflösende Simulationen wurden im LES-Modus durchgeführt, während die stadtweiten Simulationen entweder im RANS- oder im LES-Modus durchgeführt wurden. PALM-4U erfordert sehr detaillierte und genaue Eingabedaten für Anfangs- und Randbedingungen für eine bestimmte Simulation. Diese Datensätze sind entweder statisch, wie z. B. Daten aus Geographischen Informationssystemen (GIS) und der Fernerkundung (Remote Sensing, RS) zur Topographie, Landbedeckung, Gebäudegeometrie, oder dynamisch, wie eben die Atmosphärendaten. Darüber hinaus stellten die Partner von Modul B (Dreidimensionale Observierung atmosphärischer Prozesse in Städten, 3DO) 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 sind. PALM-4U ist dadurch in der Lage, Ausgabedaten für diese Orte mit voller zeitlicher Auflösung zu erzeugen, was für die Untersuchung von z. B. Turbulenzphänomenen nötig 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 Hundert Terabyte für jede Variable erforderlich sind.

Je nach Modelldomäne mussten statische und dynamische Eingabedaten erneut aufbereitet oder aus allgemeinen Datenquellen interpoliert werden. Die Partner in [UC]<sup>2</sup> haben mit PALM-4U Ideal- und Realfallsimulationen für IOP und IOL durchgeführt und die Modellausgangsdaten mit Referenzdaten verglichen, 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 priorisieren Variablen, die für praktische Anwendungen von wesentlicher Bedeutung sind und von Modul C-Partner identifiziert wurden. Eine wesentliche Herausforderung bei der Modellbewertung bestand darin, die verschiedenen Unsicherheitsquellen, das heißt, die Fehler in Eingabe- und Referenzdatensätzen sowie Modelldefizite zu bewerten. s

### 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, 2017a: 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, 2017a):

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 wird, 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 ...*

#### Bewertung der Modellergebnisse der Testfälle

Die Bewertung der Modellergebnisse erfolgt anhand normierter Werte. Zur Bewertung wird beispielsweise die Trefferquote  $q$  herangezogen, die auf Basis der zu prüfenden Modellergebnisse  $P_i$  und der Vergleichswerte  $O_i$  den Anteil der insgesamt richtig simulierten

Werte ( $n$ ) an der Gesamtzahl der Vergleichswerte ( $N$ ) angibt:

$$q = \frac{n}{N} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N n_i$$

mit

$$n_i = \begin{cases} 1 & \text{falls } \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \leq D \text{ oder } |P_i - O_i| \leq W \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Dabei werden die zu prüfenden Modellergebnisse  $P_i$  über die Vergleichswerte  $O_i$  (Observations = Messwerte) normiert und mit der maximal zulässigen Abweichung  $D$  verglichen. Alternativ kann auch mit absoluten zulässigen Abweichungen  $W$  evaluiert werden. Die Trefferquote kann systematisch für jeden Modellparameter, für den Vergleichswerte bzw. Messwerte vorliegen, ermittelt werden. Die Werte für  $D$  und  $W$  können z. B. aus der VDI Richtlinie (2017b, Tabelle 2) entnommen werden.

Alle zur Evaluierung der Modellergebnisse verwendeten Diagnostiken und statistischen Größen werden in Teil 2 des Evaluierungsberichts dargelegt.

#### 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. Modellbeschreibung, Konfiguration und Simulationsergebnisse

Nach COST 732 umfasst dieses Kapitel eine kurze Beschreibung der Eigenschaften des Modells, des beabsichtigten Anwendungsbereichs, des theoretischen Hintergrunds, auf dem die Modellentwicklung basiert, sowie der Software- und Hardwareanforderungen.

### 2.1 PALM-4U Konfiguration

Das PALM-Modellsystem (Parallelized Large-Eddy Simulation Model) wird seit 1997 am Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMUK) der Leibniz Universität Hannover (LUH) kontinuierlich weiterentwickelt (Raasch and Schröter, 2001). Es dient der Untersuchung von mikro- und mesoskaligen turbulenten Grenzschichtströmungen in der Atmosphäre und im Ozean (Gronemeier et al., 2017, Gronemeier und Sühling, 2019). PALM umfasst eine Reihe fortschrittlicher Funktionen wie die Verwendung komplexer Topographien, nichtzyklische Randbedingungen mit turbulenter Strömung, ein eingebettetes Lagrange-Partikelmodell, das die explizite Behandlung der Tröpfchenphysik ermöglicht, ein Windkraftanlagenmodell zur Simulation vollständiger Windparks einschließlich Nachlaufeffekte und eine Schnittstelle zum Hinzufügen benutzerdefinierter Codeergänzungen (Maronga et al. 2015, 2020).

Im Rahmen der Fördermaßnahme [UC]<sup>2</sup> wurde das Modell in Zusammenarbeit mit zahlreichen Forschungsinstituten für städtische Anwendungen (PALM for urban applications; PALM-4U) erheblich erweitert (Maronga et al., 2019; Maronga et al., 2020). Dies umfasst die explizite Behandlung städtischer Oberflächen (Resler et al., 2017, Gehrke et al., 2021) und Innenräume (Pffafferoth et al., 2021), Aerosole (Kurppa et al., 2019) und chemische Prozesse (Khan et al., 2021), urbane Strahlungsprozesse (Krc et al., 2021), aber auch ein LES-Nesting (Hellsten et al., 2021) sowie ein Nesting in größerskalige Modelldomänen (Kadasch et al., 2021). Die Datenein- und -ausgabe erfolgt im NetCDF-Format. PALM ist für eine hohe Leistung auf allen modernen Prozessorarchitekturen optimiert und lässt sich auf mehrere Zehntausend Prozessoren skalieren. Bei PALM-4U handelt es sich wie bei PALM um freie Software, die unter den Bedingungen der GNU General Public License (v3) weitergegeben und geändert werden kann. Eine Dokumentation findet sich unter <http://palm4u.org>.

Zum besseren Verständnis im Hinblick auf die Modellevaluierung sind nachfolgend einige Eigenschaften und Besonderheiten von PALM-4U kurz beschrieben.

## Reynolds-averaged Navier Stokes Turbulenzparametrisierung (RANS)

Als Alternative zum turbulenzauflösenden LES-Modus bietet PALM-4U eine Turbulenzparametrisierung mittels RANS. Hierzu wurde eine sogenannte TKE- $\varepsilon$ -Parametrisierung (Kato und Launder, 1993; Lopez et al., 2005) implementiert, die auf zwei prognostischen Gleichungen für die turbulente kinetische Energie (TKE) und deren Dissipationsrate  $\varepsilon$  basiert.

Der RANS-Modus bietet gegenüber dem LES-Modus Performance-Vorteile, aber nur für den Fall, dass große Gitterweiten ( $> 50$  m) verwendet werden. Für solche Fälle werden Gebäude nicht explizit vom Modellgitter aufgelöst.

## Nesting und Kopplung an großskalige Modelle

PALM/PALM-4U verfügt über eine Schnittstelle, über welche die Ausgabedaten gröberskaliger Modelle als Randbedingungen verwendet werden können. Das zusätzliche Softwarepaket INIFOR (INitialization and FORcing, Kadasch et al., 2021) wird mit PALM ausgeliefert und ermöglicht die Verarbeitung der Datenausgabe von COSMO (Consortium for Small-scale Modeling, <http://www.cosmo-model.org/>). Die Unterstützung für die ICON-Modellkette (Icosahedral Nonhydrostatic Weather and Climate Model, <https://code.mpimet.mpg.de/projects/iconpublic>) und das Weather Research and Forecasting Model (WRF, <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>) wurde in der zweiten Förderphase von [UC]<sup>2</sup> durch Modul A (Model-based city planning and application in climate change 2, MOSAIK-2) hinzugefügt. Auf diese Weise können geeignete Eingabedaten für PALM-4U bereitgestellt werden. Die verarbeiteten Daten können dann in PALM-4U als Dirichlet-Randbedingungen verwendet werden. Darüber hinaus wurde eine Selbstverschachtelung (LES-Nesting) von PALM-4U realisiert, welche die Verwendung des Modells als Lupenwerkzeug ermöglicht. Dadurch ist es möglich, große Modellgebiete zu simulieren um mesoskalige Prozesse abzubilden, gleichzeitig aber auch eine hohe räumliche Gitterauflösung in ausgewählten Gebieten zu ermöglichen, um mikroskalige Prozesse zu erfassen. Dies hat sich gerade im Rahmen der IOPs und dem Zoom auf die IOLs bewährt. Um COSMO-Modelldaten mit Dirichlet-Randbedingungen zusammen mit dem LES-Modus zu verwenden, ist es außerdem möglich, die COSMO-Daten im RANS-Modus an PALM-4U weiterzuleiten und LES-Domänen darin zu verschachteln.

## Behandlung der Landoberfläche

Für natürliche und versiegelte Oberflächen in städtischen Umgebungen verwendet PALM-4U ein Landoberflächenmodell (Gehrke et al., 2021), welches auf der Landoberflächenparametrisierung des ECMWF-ISL Modells (H\_TESSEL) basiert. Das Schema besteht aus einem Energiebilanzlöser für alle Arten von Vegetations-, Wasser- und Asphaltflächen sowie einem mehrschichtigen Bodenmodell zur Berücksichtigung der vertikalen Diffusion von Wärme und Wasser im Boden. Für natürliche bewachsene Oberflächen verwendet der Energiebilanzlöser das Konzept einer Hautschicht, die keine Wärmekapazität aufweist, aber die Isolationswirkung von Pflanzen berücksichtigt. In Abwesenheit von Vegetation wird kein Hautschichtansatz (skin layer approach) verwendet und die Oberflächentemperatur wird gleich der äußersten Boden- oder Pflasterschicht gesetzt.

Vegetation kann subgrid-skalig definiert werden und wird dann im Landoberflächenmodell behandelt (z. B. kurzes Gras). Für hohe Vegetation (z. B. Bäume) bietet PALM-4U ein 3D-Canopy-Modell an, das auf einem Widerstandskraftansatz und einer Blattflächendichteverteilung basiert. Das Canopy-Modell ist somit vollständig an das Bodenmodell gekoppelt und ein Energiebilanzlöser für die Blatttemperatur wird bei allen Gittervolumenelementen mit einer Blattflächendichte gelöst. Auch die Transpiration der 3D-Canopy-Elemente wird berechnet (Krc et al., 2021).

## Behandlung städtischer Oberflächen

Für städtische Oberflächenelemente (d. h. Gebäudefassaden und Dächer) wurde eine angepasste Version des Landoberflächenmodells entwickelt. Es besteht aus einem Energiebilanzlöser für die Oberflächentemperatur und einem mehrschichtigen Modell für das Wandmaterial. Das Wandmodell folgt einem Kachelansatz (engl.: tile approach), sodass Bruchteile von massiven Wänden, Fenstern und grünen Fassaden separat behandelt werden. Details des vorläufigen Stadtoberflächenmodells sind in Resler et al. (2017) beschrieben.

## Raumklima und Gebäudeenergiebedarf

Um die Wechselwirkung der Gebäude mit der Atmosphäre zu berechnen, steht in PALM-4U ein umfassendes Raumklimamodell zur Verfügung. Dieses Modell modelliert die Innentemperatur auf Basis des repräsentativen Wärmeaustauschs eines jeden Gebäudes je nach Wanddicke, Isolation, Fensterflächenanteil, Fassadenmaterial, etc. und berechnet sowohl den Energiebedarf jedes Gebäudes als auch die Abwärme, die an die Atmosphäre abgegeben wird. Das Modell wird als optionales Modul integriert, das mit der Temperatur



der innersten Wandschicht der jeweiligen Gebäudefassaden als Eingangsparameter an das Wandmodell gekoppelt wird. Auch die durch Fenster transmittierte Strahlung wird auf das Innenraummodell übertragen. Die Innentemperatur wird dann basierend auf den Gebäudeeigenschaften (z. B. Isolierung, Klimaanlage und Heizung) berechnet. Im Gegenzug wird die Innentemperatur als Randbedingung auf das Wandmodell übertragen, während Abwärme aus Heizung oder Klimatisierung als zusätzliche Größe in der prognostischen Gleichung für die Temperatur auf dem Dach, als typischer Ort für die Abgabe dieser Energie in die Atmosphäre, an die Atmosphäre zurück- bzw. eingespeist wird.

### Strahlungsübertragung in der Stadthindernisschicht (Urban Canopy Layer, UCL)

Zusätzlich zu den atmosphärischen Strahlungsmodellen in PALM (Clear-Sky-Modell und Rapid Radiative Transfer Model; RRTMG) wird ein Strahlungstransportschema implementiert. Es verwendet die einfallende kurzwellige und langwellige Strahlung, die durch einen der in PALM verwendeten Strahlungsmodelle (d. h. entweder das Clear-Sky-Modell oder RRTMG) bereitgestellt wird, als Randbedingung an der Oberseite der UCL. Direkte und diffuse Strahlung werden getrennt behandelt. Das Urban Surface Model (USM)-Strahlungsschema (Krc et al., 2021) modelliert darauf basierend Mehrfachreflexionen zwischen Gebäude- und Landoberflächen, Abschattung der direkten und diffusen Strahlung durch Gebäude und Bäume, sowie Absorption und Transmission kurzwelliger Strahlung in Baumbeständen. Diese Prozesse umfassen die Berechnung der einfallenden Strahlungskomponenten auf jedem Oberflächenelement des Gitters auf der Grundlage des Sonnenstandes und der Verschattung gemäß der Geometrie des städtischen Bestandes (*Canopy*): i) langwellige Wärmeabgabe basierend auf der Oberflächentemperatur jedes Oberflächenelements; ii) endlich iterierte Reflexionen von kurz- und langwelliger Strahlung an allen Oberflächen; iii) Absorption von Strahlung durch einzelne Oberflächenelemente aufgrund ihrer Eigenschaften (Albedo, Emissionsgrad); und iv) teilweise Absorption von kurzwelliger Strahlung durch die Vegetation. Zu Einzelheiten siehe auch Resler et al. (2017) sowie Krc et al. (2021). Die 3D-Vegetation erfordert eine spezielle Behandlung sowohl der langwelligen als auch der kurzwelligen Strahlung, einschließlich der Wärmekapazität der Blätter. Da dieses Schema nur die Strahlungsflüsse an den Oberflächenelementen vorhersagt, werden zusätzliche Anstrengungen unternommen, um die erforderlichen Strahlungsmengen für Gittervolumenelemente bereitzustellen, die nicht an Oberflächen für die Photolyse gebunden sind, wenn das Chemiemodul (vgl. folgender Absatz) verwendet wird.

## Chemiemodul

In PALM wurde ein vollständiges Chemiemodul implementiert (Khan et al., 2021). Die chemischen Spezies werden als Euler'sche Konzentrationsfelder behandelt, die miteinander reagieren und möglicherweise neue Verbindungen erzeugen können. Zur Beschreibung der Gasphasenchemie wurde die neueste Version des Kinetischen-Präprozessors (Kinetic Preprocessor, KPP 1) 2.3 in PALM-4U implementiert (siehe auch Damian et al., 2002; Sandu et al., 2003; Sandu und Sander, 2006). Dies ermöglicht die direkte Generierung von Fortran-Quellcode aus einer Liste chemischer Ratengleichungen. Es wurde ein zusätzlicher Präprozessor (KPP 4) entwickelt, der den Code an PALM anpasst und automatisch Schnittstellenroutinen zwischen den KPP-generierten Modulen und PALM generiert. Auf diese Weise ist die Chemie in PALM-4U voll flexibel und leicht austauschbar. Das Chemiemodul ist in den Modi RANS und LES implementiert. Für den RANS-Modus steht ein komplexeres Chemiemodul zur Verfügung, während für den LES-Modus standardmäßig ein stark vereinfachter photostationärer Ozon-Stickstoff-Mechanismus verwendet wird, um die Rechenzeit für chemische Transformationen und die Advektion der Spezies auf einem angemessenen Niveau zu halten. Weiterhin werden trockene und nasse Depositionsprozesse von Gasen und Partikeln berücksichtigt. Zudem ist in PALM-4U ein Emissionsmodul implementiert, wodurch räumlich und zeitlich hochaufgelöste Emissionen unterschiedlicher Substanzen wie Ozon, PM<sub>10</sub>, NO, NO<sub>2</sub> etc., vorgegeben werden können. Um die Aerosolphysik zu modellieren, wurde zudem ein vereinfachtes Aerosolmodell (ISORROPIA) implementiert.

Um komplexere aerosolphysikalische Prozesse darzustellen, wurde das Aerosolmodul SALSA (Sectional Aerosol module for Large Scale Applications, Kokkola et al. 2008) implementiert, welches für größerskalige Anwendungen entwickelt wurde (Kurppa et al. 2019).

Die Chemie ist wie die meteorologischen Größen im mesoskaligen Nesting implementiert. Dadurch ist es möglich, an den Modellgebietsrändern zeitlich und räumlich variierende Hintergrundkonzentrationen vorzugeben. Für die IOPs wurden diese Informationen aus WRF-CHEM abgeleitet. Eine Erweiterung des zu entwickelnden Präprozessors für ICON-ART ist für Ende 2023 vorgesehen.

## Multiagentensystem

Der herkömmliche Ansatz zur Bewertung humanbiometeorologischer Aspekte in städtischen Gebieten ist ein Euler-Ansatz, d. h. die flächendeckende Bewertung relevanter Parameter und Indizes und die anschließende Kartierung und Zonierung dieser Parameter. Bei diesem Ansatz

werden in der Regel sozioökonomische Aspekte der Stadtbewohner vernachlässigt, z. B. Merkmale des Wohnorts wie Alter, Hautempfindlichkeit, Wohlstand oder Bevölkerungsdichte sowie die typischen Verhaltens- und Bewegungsmuster dieser Bewohner. Um diesen zusätzlichen Parametern Rechnung zu tragen, wurde in PALM-4U ein Multiagentensystem implementiert, das eine neue Qualität humanbiometeorologischer Bewertungsstudien ermöglicht. Das Multiagentensystem ist ein Lagrange-Ansatz, bei dem Gruppen (von Hundert bis zu mehreren Tausend) einzelner Agenten an ausgewählten Orten von Interesse in der Modelldomäne freigesetzt werden (siehe z. B. Bruse, 2007; Gross, 2015). Jeder Agent kann individuelle Merkmale aufweisen (Alter, Kleidung, Geschwindigkeit, Startpunkte, Ziele usw.), so dass typische Bevölkerungsgruppen statistisch dargestellt und im Modell freigegeben werden können. Jeder Agent kann sich nach einem Pfadfindungsalgorithmus bewegen, der nicht nur die Eigenschaften des Agenten berücksichtigt, sondern auch die atmosphärischen Bedingungen in seiner Umgebung, z. B. Sonne oder Schatten, und nach einem optimalen Kompromiss zwischen dem schnellsten und dem bequemsten Pfad sucht. Der Pfadfindungsalgorithmus basiert auf einem Potentialansatz, bei dem die Bewegungsrichtung aus der Summe der auf den Agenten einwirkenden Kräfte bestimmt wird. Das Potenzial selbst kann als Ergebnis einer Kraft in Richtung des Zielbereichs und zusätzlicher Kräfte aufgrund von Hanglagen, verbotenen Bereichen (Gebäude), beschatteten und unbeschatteten Standorten oder der Besetzung von Bereichen durch andere Agenten angesehen werden. Das Multiagentensystem eignet sich nicht nur zur Bewertung des thermischen Komforts (siehe auch Abschnitt "Humanbiometeorologie") und der Relevanz des konventionellen Euler-Ansatzes, sondern auch zur Untersuchung von Fluchtwegen bei Unfällen, die möglicherweise mit der Freisetzung gefährlicher und giftiger Substanzen verbunden sind.

### Humanbiometeorologie

Die Bewertung des menschlichen Wärme- und Windkomforts bzw. -stresses sowie der Exposition gegenüber UV-Strahlung erfolgt sowohl nach klassischer Euler-Methode als auch nach dem Lagrange-Ansatz des Multiagentensystems. Standardmäßige biometeorologische Indizes wie die Physiologisch Äquivalente Temperatur (Physiological Equivalent Temperature; PET), die Gefühlte Temperatur (Perceived Temperature; PT) und der Universelle Thermische Klimaindex (Universal Thermal Climate Index; UTCI) sowie der Windkomfort werden flächendeckend direkt vom Biometeorologiemodul in PALM-4U berechnet und als Ausgabedaten bereitgestellt. Das Modul basiert auf den vorhandenen Modellen RayMan (Radiation on the human body, Matzarakis et al., 2010) und Sky-Helios (Matzarakis und Matuschek, 2011). Darüber hinaus wird ein Lagrange-Ansatz in dem Sinne

implementiert, dass der Wärme- und Windkomfort für die im städtischen Umfeld freigesetzten Wirkstoffe geschätzt wird. Da die etablierten humanbiometeorologischen Indizes jedoch nur für den stationären meteorologischen Zustand definiert sind, ist eine Anpassung und möglicherweise Neudefinition bzw. zeitliche Integration dieser Indizes erforderlich, da die Bewegungen der Agenten nicht unter stationären atmosphärischen Bedingungen stattfinden. Das Biometeorologiemodul ermöglicht so nicht nur die automatische Ermittlung relevanter Parameter für Stress bzw. Komfort, die berechneten Indizes und Parameter können auch in den Pfadfindungsalgorithmus des Multiagentensystems einbezogen werden. Beispielsweise kann eine übermäßige Ultraviolettstrahlungsexposition im Sommer zu einer Kraft in Richtung der Flächen führen, die von Gebäuden und Vegetation beschattet werden und daher günstig sind. Auf diese Weise können sich die Agenten bei verbessertem Komfort im Stadtgebiet zurechtfinden.

### Virtuelles Messmodul

Für eine Evaluierung der von PALM-4U simulierten meteorologischen und chemischen Daten ist ein Vergleich der Modelldaten mit Beobachtungsdaten essenziell. Während verschiedener Intensivmesskampagnen wurden in Berlin, Stuttgart und Hamburg sowohl stationäre als auch instationäre (Fußgänger, Radfahrer, Drohnen) Messungen vorgenommen. Um räumlich komplexe Trajektorien im Modell zu emulieren, wurde ein sogenanntes virtuelles Messmodul entwickelt. Darin können dem Modell mittels einer vorab prozessierten NetCDF Datei räumlich und zeitlich abhängige Messkoordinaten übergeben werden. Während der Simulation werden die gewünschten Variablen zeitlich hochaufgelöst gemessen und entsprechend dem UC2 Datenstandard ausgegeben. Dies ermöglicht eine genaue Erfassung der atmosphärischer Größen an den jeweiligen Messorten, welche über PALM-4U's 2D/3D oder maskierten Standardausgaben nicht möglich ist. Für die Erstellung der NetCDF Datei wurde der Präprozessor `palm_cvd` entwickelt, welcher die Datensätze der IOPs liest und entsprechend verarbeitet. Ebenso können zusätzliche Messstandorte oder Trajektorien über eine Konfigurationsdatei vorgegeben werden. Eine Vorgabe von Messstandorten über `geo.json` ist ebenfalls realisiert.

## 2.2 Simulationen für die Modellstädte Berlin, Hamburg und Stuttgart

Alle Simulationen wurden mit PALM-4U 6.0 gerechnet (Maronga et al., 2020).

Simulationenläufe (VALM\*):

Tab. 2.2.1: Überblick zu den vereinbarten Simulationen für Berlin und Hamburg und ihren wesentlichen Merkmalen. Für Berlin wurden jeweils zwei Simulationen (Version 1 und Version 2) für den Winter 2017 (VALM01) und den Sommer 2018 (VALM02) durchgeführt. Version 2 (V2) wurde mit Verbesserungen des luftchemischen Moduls von PALM-4U gerechnet. Bei der Simulation für den Winter 2017 wurde das Nesting nur für den TU Campus durchgeführt.

	Berlin			Hamburg
Gebiet	TU Campus (2.8 x 2.8 km)	Rothenburg (2.8 x 2.8 km)	gesamt (47 x 39 km)	HafenCity Uni
Winter	V1: 1 m	-	V1: 15 m	-
	V2: 2 m	-	V2: 16 m	
Sommer	2 m (V1 und V2)	2 m (V1 und V2)	16 m (V1 und V2)	1 m
Zeit	24 h + Atmosphären-Spinup (6 h)			<12 h
Modus	LES			LES
Simulation	Realfall			Idealfall
Prozess	Thermodynamik, Luftchemie			Dynamik

Tab. 2.2.2: Überblick zu den Simulationen für Stuttgart und ihren wesentlichen Merkmalen:

	Stuttgart		
Gebiet	Region Stuttgart (50 x 50 km)	Stadt Stuttgart (20 x 20 km)	Neckartor (2 x 2 km)
Winter	40 m	10 m	2 m
Sommer	40 m	10 m	2 m
Zeit	≥24 h + Atmosphären-Spinup 4 h		
Modus	LES		
Simulation	Realfall		
Prozess	Thermodynamik, Luftchemie		

Tab. 2.2.3: Die vereinbarten Evaluierungszeiträume für Modellsimulationen (VALM\*) und Referenzmessungen (VALR\*) im Überblick:

Evaluierungszeiträume	Start	Ende	Modus	Ort
VALM01, VALR01 (V1 und V2)	17.01.2017 6:00 UTC	18.01.2017 6:00 UTC	LES	Berlin
VALM02, VALR02 (V1 und V2)	16.07.2018 6:00 UTC	18.07.2018 6:00 UTC	LES	Berlin
VALM03*, VALR03*	14.02.2017 6:00 UTC	16.02.2017 6:00 UTC	LES	Stuttgart
VALM04, VALR04	08.07.2018 4:00 UTC	09.07.2018 19:00 UTC	LES	Stuttgart
VALM05, VALR05	Idealfall**		LES	Hamburg

\* VALM03 wurde im Rahmen der Fördermaßnahme nicht gerechnet, daher wurde der Evaluierungsfall VALR03 nicht ausgewertet, ist aber im Bericht zur Dokumentation der Messungen aufgeführt.

\*\* Der Idealfall mit LES für Hamburg wurde vorgezogen und bereits in Phase 1 von [UC]<sup>2</sup> durchgeführt.

### 2.3 Zusätzliche Simulationen mit PALM-4U und Sondermessungen

Zusätzlich zu den mit Modul A für die Evaluierung vereinbarten Simulationen für die Modellstädte Berlin, Hamburg und Stuttgart, führten die Teilprojekte in Modul B in Projektphase 2 eigene PALM-4U Simulationen durch.

Tab. 2.3.1: Zusätzliche PALM-4U Simulationen der TPs zur Evaluierung von PALM-4U in Projektphase 2.

TP / Institution	Variable (Variablen namen siehe Übersicht in Annex 1)	Start	Ende	Ort, Name Domäne	Domänengrößen in Metern (parent, child)
4 / TUBSgeo	hfss, hfls, wspeed, rlus, ts, t_soil, m_soil	30.07.2017 00:00 UTC	31.07.2017 00:00 UTC	Gründach BER	parent: 4000x4000  child: 400x400
7 / KITimktro	w, ta, q, wspeed	20.06.2018  00:00:00 UTC	20.06.2018  18:00:00 UTC	Stuttgart  (Innenstadt, Neckartal)	12000x12000
7 / KITimktro	u, v, ta, q	14.08.2017  00:00:00 UTC	15.08.2017  18:00:00 UTC	Stuttgart  (Innenstadt, Neckartal)	12000x12000
9 / TUDDmeteo	ta, q, rsd, rld, ts, Tmrt, PT, PET, UTCI	17.06.2021 19:00:00 UTC	22.06.2020 19:00:00 UTC	Dresden Innenstadt	parent: 6000x6000 child: 1200x1200
10 / UHHmeteo	u,v,w, u'v', u'w'	23.08.2020 00:00 UTC	24.08.2020 00:00 UTC	Hamburg	parent: 6400x6400x2400 child1: 480x480x480
11 / UAgeo	theta, q, wspeed	04.06.2019 12:00 UTC	06.06.2019 06:00 UTC	Augsburg	parent: 8800x6400 child1: 560x560 child2: 640 x1040
11 / UAgeo	theta, q, wspeed	25.06.2019 12:00 UTC	27.06.2019 00:00 UTC	Augsburg	parent: 8800x6400 child1: 560x560 child2: 640x1040
12 / LUHimuk	u_av, v_av, w_av, ta_av, rh_av, theta_av, e_av, q_av, wspeed_a v, wdir_av	06.08.2020 0:00 UTC	07.08.2020 4:00 UTC	Hannover (Südstadt)	2595x3035

## Evaluierung des in PALM-4U implementierten Gründachmoduls (TP4, TUBSgeo)

PALM-4U enthält ein Gründachmodul, das es ermöglicht die meteorologischen Auswirkungen von sowohl extensiver als auch intensiver Dachbegrünung zu simulieren. Das Modul wird derzeit mit Eddy-Kovarianzmessungen, die auf einem ca. 8600 m<sup>2</sup> großen extensiven Gründach am Flughafen BER durchgeführt werden, evaluiert (Heusinger und Weber 2017a, Konopka et al., 2021). Extensive Gründächer sind durch geringe Substrattiefen und trockenresistente Vegetation gekennzeichnet und daher auf Grund der vergleichsweise niedrigen statischen Anforderungen und Pflegebedürfnisse der Standard in Deutschland und weltweit (Heusinger und Weber, 2017). Als Zielgrößen der Untersuchung wurden die sensiblen und latenten Wärmeflussdichten, die kurzwellige reflektierte Strahlung und langwellige Ausstrahlung des Gründachs sowie die volumetrische Bodenfeuchte des Substrats definiert. Die turbulenten Wärmeflüsse wurden auf dem Gründach mittels eines Ultraschallanemometers (CSAT3A, Campbell Sci.) in Kombination mit einem Infrarotgasanalysator (EC150, Campbell Sci.) in einer Höhe von 1,15 m erhoben. Kurz- und langwellige Strahlungsflüsse wurden in 2 m Höhe gemessen (NR01, Campbell Sci.). Die Bodenfeuchte wurde in 5 cm Substrattiefe mittels einer TDR Sonde gemessen (CS616, Campbell Sci.). Weitere Details zum Messaufbau sind in Konopka et al. (2021) dokumentiert.

Der statische Treiber für die Simulationen, der das Modellgebiet definiert, wurde mit Hilfe der vom IBP entwickelten, cloud-basierten GUI zunächst mit einer horizontalen Ausdehnung von 4000 x 4000 m<sup>2</sup> für die parent domain und 400 x 400 m<sup>2</sup> für die child domain erstellt. Das Modellgebiet erstreckte sich bis in eine Höhe von ~2700 m. Die horizontale und vertikale Auflösung betrug 10 m für die parent domain (bis 500 m über Grund) und 2 m für die child domain. Ab einer Höhe von 500 m wurde ein Streckungsfaktor von 1.08 für die Höhe der Gitterzellen eingesetzt bis zu einer maximalen Gitterzellenweite von 60 m.





Abb. 2.3.1: Visualisierung des mit der PALM-4U GUI erstellten statischen Treibers. Der rote Rahmen kennzeichnet die parent domain (4000 m x 4000 m) und der blaue Rahmen die child domain (400 m x 400 m). Vegetationsflächen sind in grün gekennzeichnet und Gebäude in rot. Graue und weiße Areale sind Asphaltflächen. Quelle: J. Heusinger (TUBSgeo).

Das Modellgebiet war auf das zu untersuchende Gründach am Parkhaus P7 des Flughafens BER zentriert (Abb. 2.3.1). Die horizontale Ausdehnung der parent domain wurde zunächst mit 4000 m auf das ca. zweifache der Grenzschichthöhe festgelegt. In Rücksprache mit dem PALM-4U Entwicklerteam wird derzeit die Größe des Modellgebiets auf 24 x 15 km<sup>2</sup> deutlich erhöht, um realistische Turbulenzcharakteristika innerhalb der child domain zu garantieren und eine Anströmdistanz bei wechselnden Windrichtungen von ca. 12 km vom Modellrand zur child domain zu gewährleisten.

Die für den statischen Treiber benötigten Geodaten werden mit dem QGIS Plugin palmclassify erstellt. Das Plugin ermöglicht die Zuordnung und Klassifizierung von Geodaten zu den unterschiedlichen in PALM-4U vorhandenen Oberflächentypen. Die klassifizierten Daten können anschließend als geoJSON Datei exportiert und in der PALM-4U GUI weiter aufbereitet werden. Die Geodaten basieren im Wesentlichen auf dem Digitalen Basis-Landschaftsmodell inklusive eines 3D Gebäudedatensatzes (LoD1), das vom LGB (Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg) bereitgestellt wird. Aufgrund der erheblichen Größe der von palmclassify generierten Outputdateien, müssen zur Bearbeitung der Daten innerhalb der GUI Anpassungen erfolgen. Für die meteorologischen Randbedingungen wurden COSMO-DE Reanalysedaten für den 30.07.2017 verwendet und mit Hilfe der PALM-4U-Schnittstelle INIFOR zu einem dynamischen Treiber aufbereitet. Der

simulierte Tag war ein typischer heißer Tag mit Lufttemperaturen über 30 °C und relativ hoher Wasserverfügbarkeit beim untersuchten Gründach (Abb. 2.3.2). An diesem Tag schwankte die Windrichtung zwischen ca. 120° in den Morgenstunden und 250° am Abend.

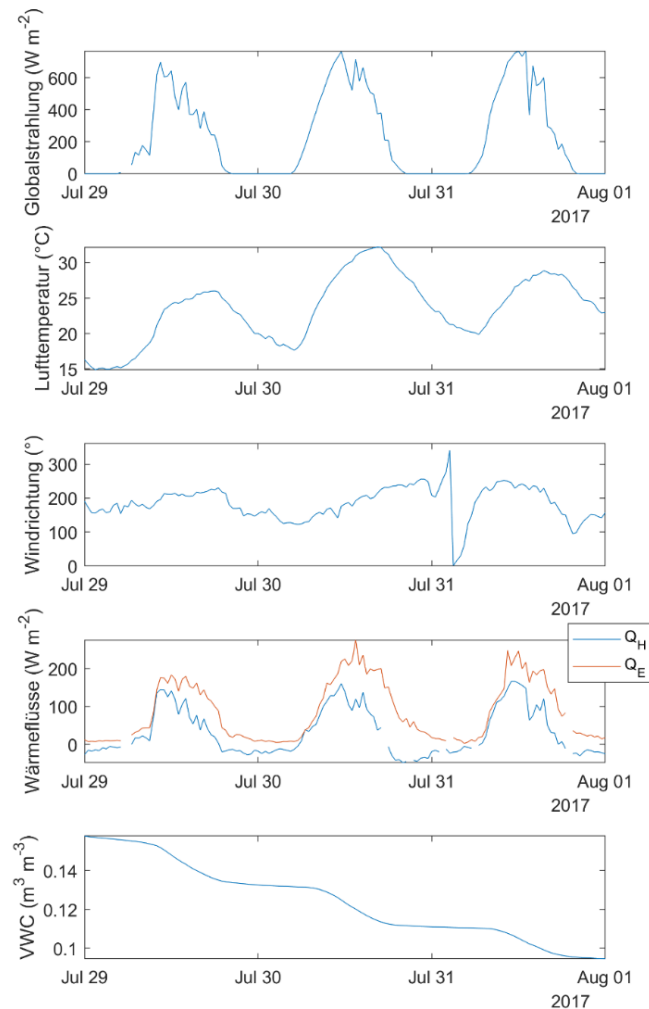


Abb. 2.3.2: Meteorologische Bedingungen während des Simulationszeitraums am 30.07.2017 an der auf dem Gründach BER befindlichen Messstation. Die auf dem Gründach gemessenen sensiblen ( $Q_H$ ) und latenten ( $Q_E$ ) Wärmeflüsse, sowie die volumetrische Bodenfeuchte (VWC) sind ebenfalls dargestellt. Quelle: J. Heusinger (TUBSgeo).

Die Simulation wurde für 24 Stunden durchgeführt und begann um 0 UTC. Vor Simulationsbeginn wurde ein Modell-Spinup über 72 Stunden vorgenommen. Weitere für die Simulation wichtige Parameter sind in Tabelle 2.3.1 angegeben. Die Modellrechnungen wurden auf einem Supercomputer des Norddeutschen Verbunds für Hoch- und Höchstleistungsrechnen (HLRN) mit 800 Rechenkernen durchgeführt.

Tab. 2.3.2: Modelleinstellungen für die Modellläufe in PALM-4U.

	Parameter	Einstellung
<b>Modellgebiet (parent)</b>	Breiten-, Höhengrad (°)	13.4819 °N, 52.3490 °E
	Äquidistantes Gitter	bis 500 m Höhe
	Nicht-Äquidistantes Gitter (x, y, z)	Ab 500 m mit Streckungsfaktor 1.08
	Zahl der Gitterboxen (nx, ny, nz)	399 x 399 x 100
	Gitterboxgröße des vertikal äquidistanten Gitters (dx, dy, dz)	10 m x 10 m x 10 m
	Nicht-äquidistantes Gitter ab 500 m	Streckung von dz von 10 m auf maximal 60 m
<b>Modellgebiet (child)</b>	Breiten-, Höhengrad (°)	13.5099 °N, 52.3641 °E
	Zahl der Gitterboxen (nx, ny, nz)	199 x 199 x 200
	Gitterboxgrößen (dx, dy, dz)	2 m x 2 m x 2 m
<b>Modellzeit</b>	Start-Zeit	30.07.2017, 0:00 UTC
	End-Zeit	31.07.2017, 0:00 UTC
	Initialisierungszeit (Spinup)	72 h
	Simulationsdauer	24 h
<b>Meteorologie</b>	Randbedingungen	INIFOR – d. h. Meteorologie aus COSMO-DE
	Drucklöser	„multigrid“
	Constant flux layer	ja
	Prognostische Gleichungen für Wasserdampf-Mischungsverhältnis	ja
	Kurzwellige Einstrahlung	Durch Messungen vorgegeben („external“).

## PALM-4U Simulation in Stuttgart (TP7)

### Simulation 1: Stationsbezogene Validierung der Varianz des Vertikalwindes

Der Arbeitsschwerpunkt liegt auf der Simulation der Struktur und Entwicklung der konvektiven Grenzschicht (CBL). Um die CBL zu charakterisieren, müssen die turbulenten Prozesse erfasst werden. Die Turbulenzparameter lassen sich aus zeitlich hochaufgelösten Messungen und Simulationen der Vertikalgeschwindigkeit bestimmen. Infolgedessen sollen zeitlich hochaufgelöste, stationsbezogene Modellergebnisse des Vertikalwindes analysiert und mit den Messergebnissen verglichen werden.

Die PALM-4U-Simulationen wurden für einen wolkenfreien Sommertag, den 20. Juni 2018 (IOP-4) durchgeführt. Das Modellgebiet mit einer Größe von  $12 \times 12 \text{ km}^2$  deckt das Gebiet um den Stuttgarter Kessel und das Neckartal ab (Abb. 2.3.1). Vertikal erstreckt sich die Modelldomäne bis in 2,5 km Höhe. Die vertikale und horizontale Gitterweite beträgt 10 m. Der statische Treiber beinhaltet, die für die Region Stuttgart aufbereiteten Daten des DLR, ergänzt um Daten aus OpenStreetMaps (Modul A). Die meteorologischen Antriebsdaten für die Simulation basieren auf operationellen Ausgaben des mesoskaligen Modells COSMO-D2 (Deutscher Wetterdienst, DWD). Der Evaluierungslauf wurde mithilfe des PALM-Modell-Systems 21.10 UNIBWCluster durchgeführt. Die Simulationszeit betrug 18 Stunden ab 00:00 UTC am 20.06.2018.

Als Referenzdaten für die Evaluierung wurden die Vertikalwindprofile von zwei Doppler-Wind-LIDARen (Windcube WLS8 und HALO Photonics) benutzt. Die Windlidargeräte wurden im Stuttgarter Zentrum auf Gebäudedächern positioniert: Windcube auf dem Dach des Rathauses (*cityhall*); und HALO auf dem Gebäudedach vom „Amt für Umweltschutz“ (*cityafus*). Die beiden Messstationen lagen auf gleicher Höhe von ca. 330 m asl und waren 630 m voneinander entfernt. Die Windcube-Daten haben eine zeitliche Auflösung von 7 s und die HALO-Daten haben eine zeitliche Auflösung von 1 s. Diese Daten wurden komplementiert durch Radiosondenmessungen (Wind, Lufttemperatur, Luftfeuchte) an der Station *mschnarren* (DWD).

Mithilfe zeitlich hochaufgelöster (10 s), stationsbezogener Modellergebnisse wurden die vertikalen Profile des Vertikalwindes (*cityhall*, *cityafus*) und die vertikalen Profile von Wind, Temperatur, Feuchte (*mschnarren*) produziert. Für das Gebiet mit der Größe von  $3 \times 3 \text{ km}^2$  (Abbildung 2.3.3) wurde sowohl der 3D-Output der Vertikalwinde und Temperaturen mit 15 min Auflösung als auch der hochaufgelöste Output des Vertikalwindes (10 sec) auf der Höhe von 350 m agl ausgegeben.

Die Varianz der Vertikalgeschwindigkeit wurde sowohl aus Modellergebnissen als auch aus Messungen abgeleitet und verglichen. Die Modellergebnisse wurden mithilfe der im zweiten Projektjahr beschriebenen Matlab-Skripten visualisiert und mit Referenzdaten verglichen.

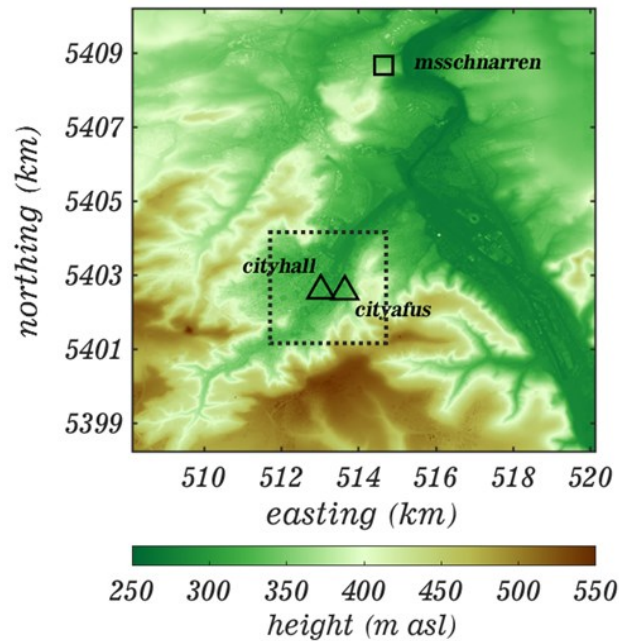


Abb. 2.3.3: Simulationsgebiet (Orographie plus Gebäude) mit Messstationen (Dreieck – Lidar, Viereck – Radiosonde): Rathaus (cityhall), Amt für Umweltschutz (cityafus), Schnarrenberg (msschnarren). Das gepunktete Viereck von 3 x 3 km<sup>2</sup> markiert das Gebiet für die Varianzberechnung. Quelle: KITimktro.

Zuerst wurde die zeitliche Entwicklung der konvektiven Grenzschicht analysiert. Die von Ceilometerdaten (msschnarr) abgeleiteten Grenzschichthöhen stimmen mit den Simulationsergebnissen gut überein (Abbildung 2.3.4a). Die simulierten Grenzschichthöhen wurden mithilfe der Gradient-Methode aus den mittleren Profilen der potentiellen Temperatur für das 3x3 km<sup>2</sup>-Gebiet (Abbildung 2.3.3) bestimmt. Die Profile der potentiellen Temperatur, der spezifischen Feuchte und des Horizontalwindes aus Radiosondendaten (msschnarr) zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den Modelldaten (Abbildung 2.3.4b). 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 asl festgelegt. Die gleitenden stündlichen Varianzen des Vertikalwinds ( $\sigma_w^2$ ) an den Referenzstationen cityhall und cityafus, sowie die räumlichen 15-min-Varianzen für das 3x3 km<sup>2</sup>-Gebiet ( $\sigma_{3x3}^2$ ) wurden berechnet und auf der Abbildung Abb. 2.3.4a dargestellt.

Die zeitlichen Verläufe von stündlichen Varianzen zeigen eine große Amplitude bis zu 2,5 m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>. 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. Die NRMSE-Werte zwischen  $\sigma_{3 \times 3}^2$  und  $\sigma_w^2$ -Referenzdaten für die Stationen cityhal und cityafus betragen entsprechend 17% und 22%. Diese Ergebnisse zeigen, dass eine stündliche Statistik von zwei Lidaren bei den herrschenden Bedingungen (Windgeschwindigkeit von  $1 \text{ m s}^{-1}$ ) für die PALM-Evaluierung nicht ausreichend ist.

Da die Anzahl der Lidare nicht erhöht werden kann, wurde das Intervall der  $\sigma_w^2$ -Berechnung bis zu drei Stunden erhöht (Abbildung 2.3.5). Obwohl die drei stündlichen Varianzen eine bessere Übereinstimmung zueinander und mit den räumlichen Varianzen aufweisen, muss angemerkt werden, dass ein Zeitfenster von 3 Stunden bei nichtstationären Bedingungen ungeeignet für die Berechnung der Statistik ist.

Mithilfe eines zeitlich hochaufgelösten räumlichen Modell-Outputs wurde daher die Anzahl von Lidaren berechnet, die eine adäquate PALM-Evaluierung anhand einer stündlichen Statistik erlaubt (Kiseleva et al., 2023). Es wurde festgestellt, dass auf einem  $3 \times 3 \text{ km}^2$  großen Gebiet bei Platzierung von 9 bis 25 Lidaren der NRMSE-Wert bis auf 10% reduziert wird. Dies ist durchaus eine realistische Anzahl von Lidaren. So wurden zum Beispiel 20 Lidare bei der Perdigão-Kampagne (Vasiljević et al., 2015; Mann et al., 2018) und 9 Lidare bei der FESSTVal-Kampagne (Lundgren et al., 2022) verwendet.

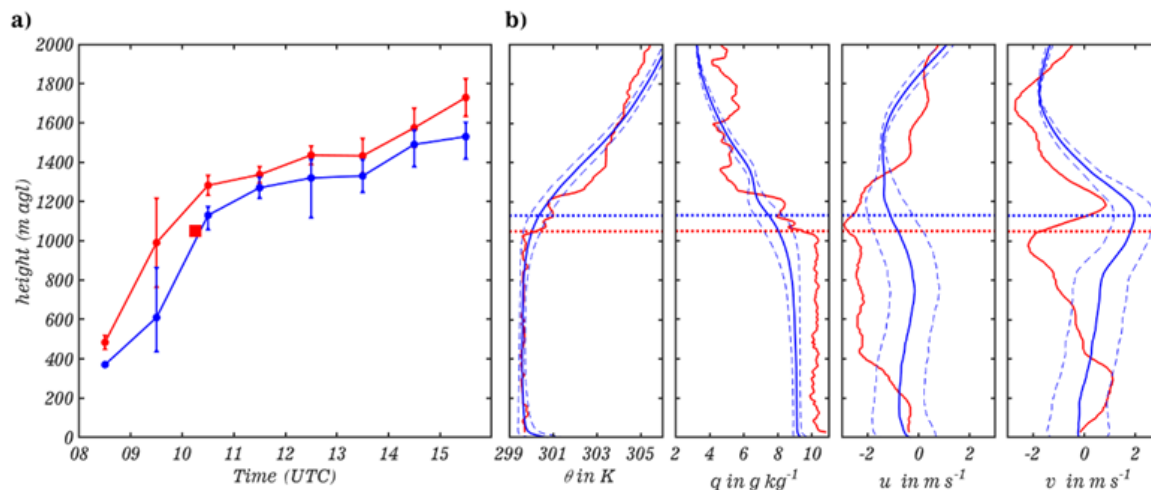


Abb. 2.3.4: (a) Zeitlicher Verlauf der Grenzschichthöhe abgeleitet aus Ceilometerdaten an msschnarr (stündliche Mittelwerte und Standardabweichungen - rote Linie) und PALM-4U-Simulationen für das  $3 \times 3 \text{ km}^2$  Gebiet (räumliche Mittelwerte und Standardabweichungen - blaue Linie) sowie die Grenzschichthöhe aus dem Radiosondenaufstieg um 10:45 UTC an msschnarr. (b) Profile der potentiellen Temperatur  $\theta$ , der spezifischen Feuchte  $q$ , u- und v-wind Komponenten von Radiosonden an msschnarr um 10:45 UTC (durchgezogene rote Linie) und PALM-4U-Simulationen für das  $3 \times 3 \text{ km}^2$  Gebiet (räumliche Mittelwerte und Standardabweichungen) um 11:00 UTC (blaue durchgezogene und gestrichelte Linie). Die gepunkteten Linien zeigen die Grenzschichthöhen aus der Beobachtung (rot) bzw. der Simulation (blau). Quelle: KITimktro.

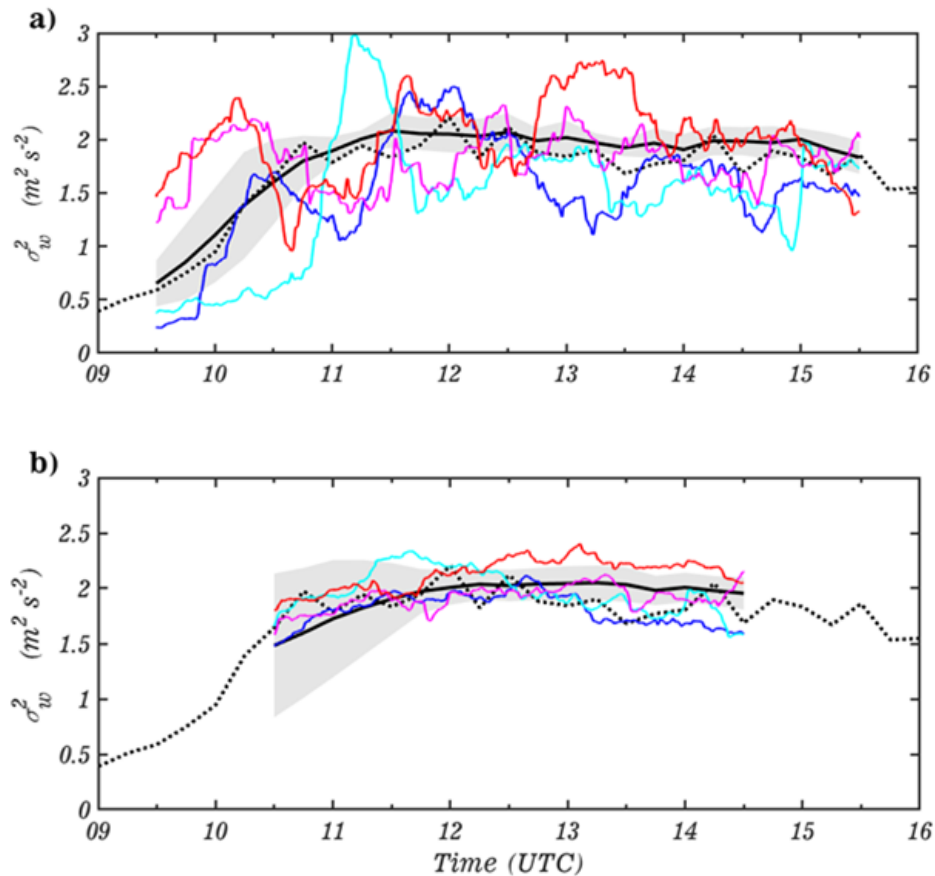


Abb. 2.3.5: Zeitreihen von Vertikalwinden auf der Höhe von 350 m agl, (a) stündlich gleitend (b) dreistündlich gleitend aus Referenzdaten an den Positionen cityhall (rot), cityafus (lila) und aus Simulationsdaten an den Positionen cityhall (blau), cityafus (himmelblau). Die gepunktete Linie in a) und b) zeigt  $\sigma_{w,3 \times 3}^2$  und die durchgezogene schwarze Linie in a) stündlich gleitend in b) dreistündlich gleitende Mittelwerte, die aus  $\sigma_{w,3 \times 3}^2$  berechnet sind. Die Standardabweichung ist grau hinterlegt. Quelle: KITimktro.

## Simulation 2: Evaluierung dreidimensionaler Strömungsfelder in der Grenzschicht

Der Arbeitsschwerpunkt liegt auf der Simulation der räumlich-zeitlichen Verteilung des Horizontalwindfeldes unter Berücksichtigung der Stabilität der Atmosphäre. Das Simulationsgebiet mit der Größe von 48x48 km<sup>2</sup> deckte das Territorium um den Stuttgarter Kessel und das Neckartal ab (Abb. 2.3.6). Vertikal erstreckte sich die Modelldomäne bis in 4 km Höhe. Die vertikale und horizontale Gitterweite betrug 40 m. Der Evaluierungslauf wurde mithilfe des PALM-Modell-Systems 21.10 UNIBWCluster durchgeführt. Die Simulationszeit betrug 39 Stunden: von 00:00 UTC am 14.08.2017 bis 20:00 UTC am 15.08.2017.

Der statische Treiber beinhaltet die für die Region Stuttgart aufbereiteten Daten des DLR, ergänzt mit Daten aus OpenStreetMaps (Modul A). Die meteorologischen Antriebsdaten für die Simulation basieren auf operationellen Ausgaben des mesoskaligen Modells COSMO-DE (Deutscher Wetterdienst, DWD).

Als Referenzdaten für die Modellevaluierung dienten die Profile der Windrichtung und Windgeschwindigkeit von virtuellen Masten (*wolfram*, *uthbherzogen*, *naehter*, *citycannstat*, *bcmercedes*, *citywera*) mit 15 min Auflösung, von einem Windlidar mit 10 min Auflösung (*cityhall*), komplementiert von Windmessungen mit Radiosonden (*mschnarren*, DWD) und Fesselsonden (*erwschoettl*, DWD). (Abb. 2.3.6).

Mithilfe stationsbezogener Modell-Ausgaben („Masked-Output“) wurden u- und v-Windkomponenten, Lufttemperatur und Luftfeuchte mit der 10 min Auflösung, den Referenzpositionen entsprechend, ausgegeben. Die Simulationsergebnisse wurden mithilfe der im zweiten Projektjahr geschriebenen Matlab-Skripten visualisiert und mit Referenzdaten verglichen.

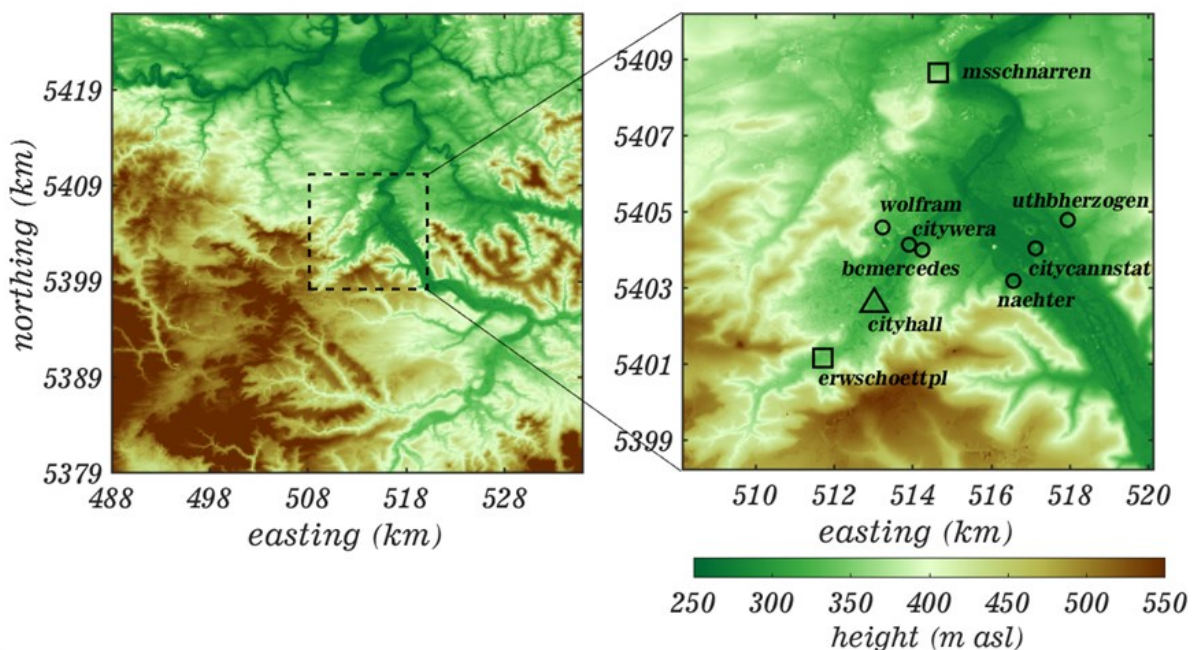


Abb. 2.3.6: Links: Simulationsgebiet (Orographie plus Gebäude). Rechts: Ausschnitt des Simulationsgebiets mit Messstationen (Dreieck – Lidar, Kreise – virtuelle Masten, Vierecke – Radiosonde/Fesselsonde): Erwin-Schöttle-Platz (*erwschoettpl*), Rathaus (*cityhall*), Schnarrenberg (*msschnarren*) und virtuelle Masten 1-6 (*wolfram*, *uthbherzogen*, *naehter*, *citycannstat*, *bcmercedes*, *citywera*). Quelle: KITimktro.

Zum Vergleich der Simulationsergebnissen mit den Referenzdaten wurden zwei charakteristische Höhen definiert. Die erste Höhe von 410 m asl ( $\approx 100$  m agl) liegt innerhalb der nächtlichen Grenzschicht und die zweite Höhe in der Mitte der konvektiven Grenzschicht auf 1000 m asl ( $\approx 700$  m agl) (Abb. 2.3.6). Verglichen wurden die Zeitreihen der stündlich



gemittelten Windgeschwindigkeiten und -richtungen. Auf der Abbildung 2.3.6 sind diese Vergleiche für die ausgewählten Stationen citywera, cityhall (Stuttgarter Becken) und citycannstat (Neckartal) dargestellt.

Die beobachteten Zeitreihen zeigen eine gute Übereinstimmung zu den simulierten Werten auf der Höhe von 1000 m asl. Für eine Höhe von 410 m asl gab das Modell den zeitlichen Verlauf der Windrichtung und -geschwindigkeit bis 09:00 UTC am 15.08.2017 adäquat wieder. Nach 09:00 UTC überschätzte das Modell die Windgeschwindigkeit im Stuttgarter Becken. 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 Talwind 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-4U wiedergegeben. Der statistische Vergleich ist in der Tabelle 2.3.3 zusammengefasst.

Tab. 2.3.3: 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 00:00 UTC am 14.08. 12:00 am 15.08.2017. Die Werte in Klammern gelten für den Zeitraum von 00:00 bis 21:00 UTC am 14.08.2017. Quelle: KITimktro.

<b>1000 m asl (700 m agl)</b>			
	Windgeschwindigkeit (m s <sup>-1</sup> )		Windrichtung (°)
	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 (m s <sup>-1</sup> )		Windrichtung (°)
	RMSE	NRMSE	RMSE
cityhall	1,6 (0,7)	0,8 (0,4)	29,6 (34,8)
erwschoettl	2	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)

### Evaluierung der thermischen Belastungsindexe mit Bezug zur Simulation von Stadtbäumen in PALM-4U (TP09)

Im Fokus der zusätzlichen PALM-4U Simulationen in Dresden steht die Wirkung von Grünflächen, Parks und Straßenbäumen auf das thermische Wohlbefinden von Stadtbewohnern. Im Rahmen des Programms "Stadtklima im Wandel" wurde PALM um ein Modul zur Berechnung des Thermischen Komforts erweitert ("Human Thermal Comfort Module"). Des Weiteren wurde das "Plant Canopy Model" stark überarbeitet. Neben einer generellen Evaluierung des Biometeorologie Moduls, soll der Einfluss der Vegetationsdarstellung auf die Ergebnisse untersucht werden.

Die Gründe für die separate Simulation eines kleineren Modellgebietes in Dresden sind vielseitig. Zuallererst erlaubt die Konzentration auf den thermischen Komfort Variantenrechnungen, da die Rechenzeiten durch das Abschalten nicht notwendiger Module in PALM-4U verkürzt werden. Weiterhin liegen für das Gebiet südlich des Großen Gartens bereits Messungen in und um Einzelbäume vor (Gillner et al. 2015). Zusätzlich wurden im

Stadtgebiet von Dresden bereits mehrere Messkampagnen mit mobilen Messsystemen durchgeführt. Zum ergänzenden Vergleich liegen Simulationen mit ENVI-met vor. Ein weiterer Grund für die Simulation in Dresden war eine Praxisanwendung von PALM-4U im Dresdner Stadtzentrum im Rahmen von Propolis (Modul C). In Synergie mit GEO-net konnten die Simulationen deutlich effizienter durchgeführt werden. In dieser Testanwendung wurde die Auswirkung der Bebauung einer Freifläche auf den thermischen Komfort untersucht.

Die Simulationen gliedern sich in eine Parent Domain, die das gesamte Stadtzentrum von Dresden umfasst, und eine Child Domain in Dresden-Strehlen südlich des Großen Gartens (siehe Abbildung 2.3.7). Als Zeitraum wurde ein wolkenloser Sommertag zur Sommersonnenwende (21.06.) ausgewählt. Nach einer spinup time von 24 h, erfolgten Simulationen von 24 h.

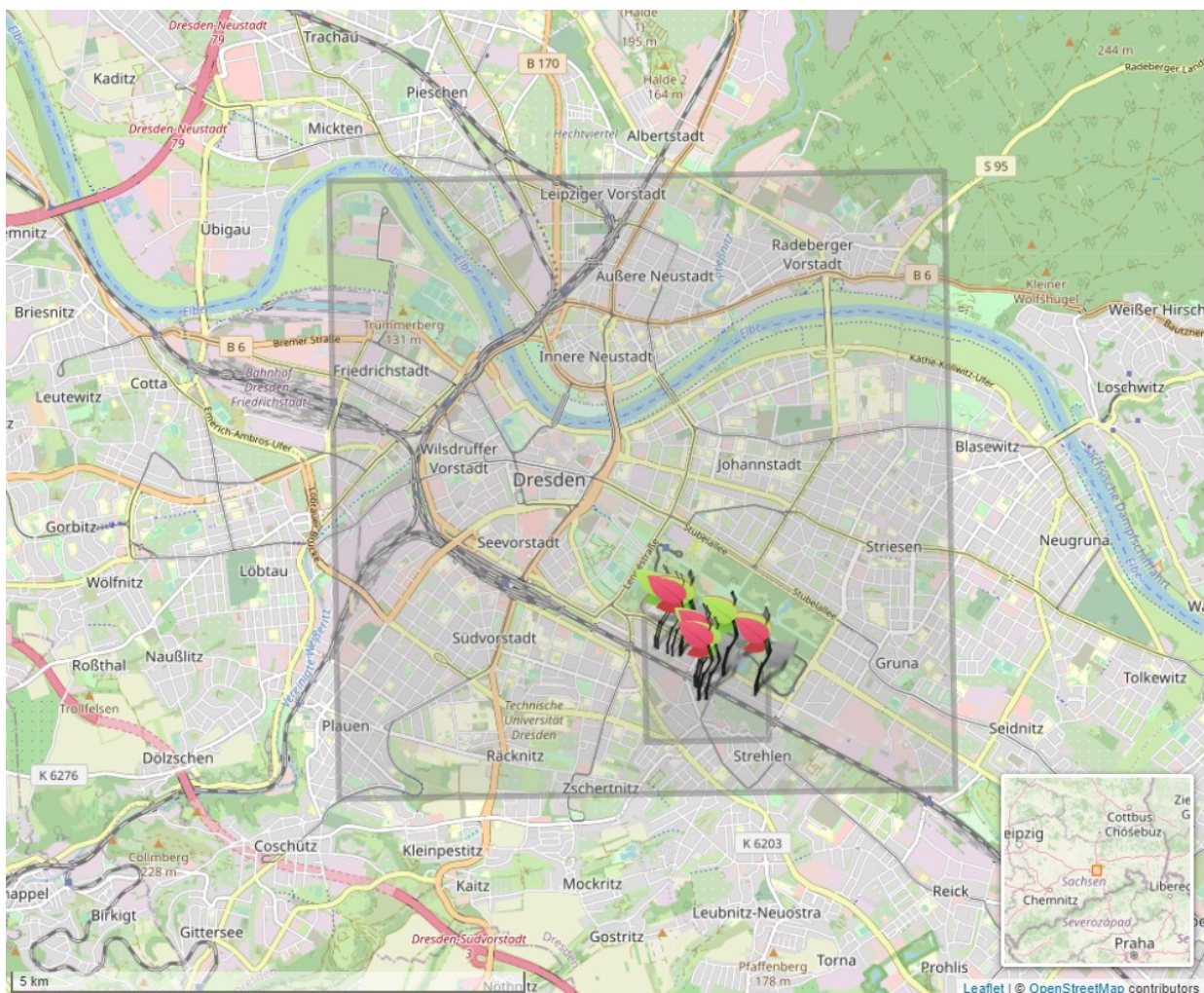


Abb. 2.3.7: Parent- und Child-Domain; Basisimulation für Dresden als graue Quadrate, die Blätter symbolisieren Bäume, an denen meteorologische Messungen durchgeführt wurden. Quelle: TUDDmeteo.

Für die Parent Domain soll die Variabilität meteorologischer Größen im Stadtgebiet, einschließlich Innenstadt und Elbauen, simuliert und evaluiert werden. Sie hat eine Größe von

6 km × 6 km und eine Gitterauflösung von 10 m. Die Lage der Parent Domain wurde so gewählt, dass die in der Testanwendung untersuchte Freifläche im Zentrum liegt. Die Höhe der Modelldomäne wurde auf 3000 m festgelegt, um eine uneingeschränkte Entwicklung der urbanen Grenzschicht zu ermöglichen. Die vertikale Auflösung beträgt 10 m.

Anhand der Child Domains sollen kleinräumige Effekte und die Möglichkeiten der effektiven Abbildung der Vegetation untersucht werden. Die Ausdehnung in x, y, z Richtung ist 1200 m × 1200 m × 600 m, die Gitterauflösung beträgt in alle Richtungen 2 m. Die Einbettung in die Parent Domain erfolgt durch "one-way" Nesting.

Die statischen Treiber des Gebietes basieren auf Daten der Stadt Dresden, die durch GEOnet aufbereitet und bereitgestellt wurden. Die Vegetation wurde aus den bereitgestellten Baumkatastern bestimmt und mit dem flächendeckend vorliegenden Grünvolumen (Hecht et al., 2017) ergänzt. Zur Evaluierung des "PALM Create Static Driver" Tools canopy\_generator.py wurde die Vegetation von 6 Straßenzügen direkt mit einem terrestrischen Laserscanner vermessen und in Vergleichssimulationen verwendet (Abbildung 2.3.8).

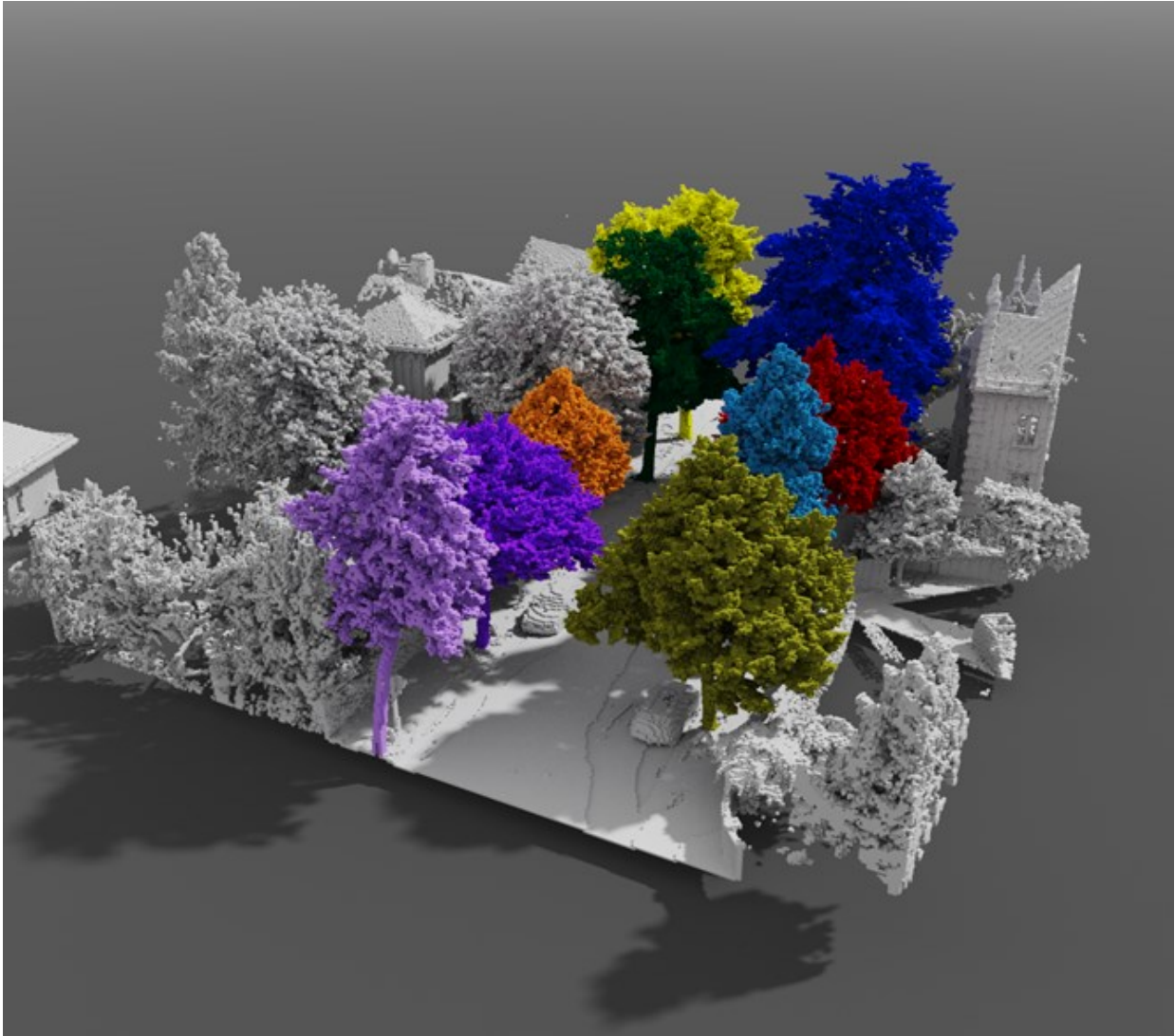


Abb. 2.3.8: Voxelrepräsentation der Blattflächendichte abgeleitet aus Messungen mit einem terrestrischen Laserscanner, Kantenlänge 0,1 m. Quelle: TUDDmeteo.

Für den dynamischen Antrieb wurden in der untersten Modellschicht ein Wind von 1 m/s aus Westen, eine Temperatur von 297 K und für die Feuchte ein Mischungsverhältnis von 0,012 kg/kg vorgegeben. Zum Startzeitpunkt der Simulation um 21:00 wurden eine neutrale Schichtung im Bodenbereich und eine Inversion an der Oberkante der atmosphärischen Grenzschicht angenommen. Zwischen den Schichtgrenzen 0 m, 1200 m und 1400 m wurden dabei die linearen Gradienten für die Temperatur mit jeweils 0,0, 1,5 und 0,15 K pro 100 m und für das Mischungsverhältnis mit -0,00033, -0,0015 und -0,00009 kg/kg pro 100 m vorgegeben.

In den Simulationen wurden die Module für: "urban surface", "land surface", "radiation", "plant canopy" und "biometeorology" genutzt. Für die Rechnungen auf dem HPC der TU Dresden (Bull/ATOS, Taurus, <https://tu-dresden.de/zih/hochleistungsrechnen/hpc>) wurden verschiedene Konfigurationen getestet. Ein guter Kompromiss zwischen Rechenzeit und

Energieaufwand konnte unter Nutzung von 288 CPUs gefunden werden.

### PALM-4U Simulation Wettermast Hamburg (TP10)

Für die detaillierte Evaluation der urbanen Windverhältnisse und Turbulenz wurde eine realistische PALM-4U Simulation für Hamburg für den Zeitraum von 00:00 UTC bis 23:59 UTC des 23. August 2020 durchgeführt. Das Modellgebiet ist dabei zentriert um den Wettermast Hamburg am östlichen Stadtrand. Der 300 m hohe Wettermast Hamburg stellt auf sechs Höhenstufen hochaufgelöste Windmessungen mit bis zu 20 Hz bereit, die eine ideale Datenbasis für eine differenzierte Evaluation der Turbulenz- und Windverhältnisse von PALM-4U darstellen. Das Modellgebiet ist 6400 x 6400 x 2400 m groß (Parent Domain) und weist eine Auflösung von 10 m in alle Raumrichtungen auf. Insbesondere für eine bessere Darstellung turbulenter Prozesse in der Grenzschicht, wurde ein Modellgebiet mit einer Auflösung von 1 und einer Größe von 480 x 480 x 480 m (Child Domain) zentriert um den Wettermast Hamburg in die Simulation mittels Ein-Wege Nesting integriert (Abbildung 2.3.9).

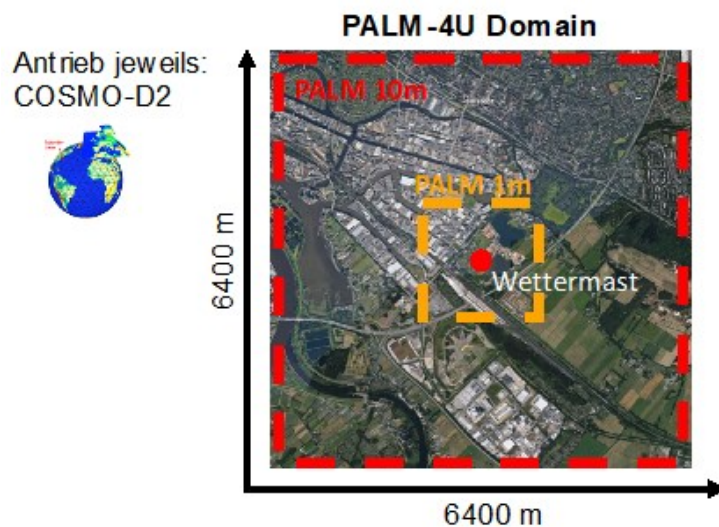


Abb. 2.3.9: Modellgebiete der Parent und Child Domain der realistischen PALM-4U Simulation rund um den Wettermast Hamburg am östlichen Stadtrand. Quelle Satellitenbild: Google Earth.

Die PALM-4U Simulation wurde mit realen Antriebsdaten der operationellen COSMO-D2 Analysen des Deutschen Wetterdienstes angetrieben. Die statischen Daten der Simulation, wie beispielsweise die Geometrien der Gebäude, sowie die Vegetation, wurden auf Basis des von der DLR (Modul A) zur Verfügung gestellten Datensatzes generiert. Als Ausgabevariablen wurden für beide Modellgebiete die drei Windrichtungskomponenten  $u$ ,  $v$  und  $w$  mit 10 Hz für den Gitterpunkt am Wettermast Hamburg im Zentrum des Modellgebiets herausgeschrieben.

### Sondermessungen in der Südstadt Hannovers

In der Niedersächsischen Landeshauptstadt Hannover fanden im Sommer 2020 Sondermessungen meteorologischer Parameter am Maschsee und im Altenbekener Damm in der Südstadt statt. Hierbei wurde einerseits durch die Installation von fünf Wetterstationen über einen Zeitraum von ca. drei Monaten, andererseits durch eine Sondermesskampagne über 24 h mit zwei Drohnen an verschiedenen Standorten nahe dieser Stationen mit Aufstiegen bis 300 m ü. G. ein umfangreicher dreidimensionaler Datensatz erhoben. Abbildung 2.3.10 zeigt die genauen Positionen der Messungen an, während in Annex 2 Informationen zu den exakten Messzeiträumen und gemessenen Parametern zu finden sind.



Abb. 2.3.10: Standorte der Sondermessungen, bestehend aus einer Theodor-Friedrichs-Station am Maschsee, vier Thiess-Stationen an Straßenlaternen im Altenbekener Damm sowie zwei Drohnen DJI Flamewheel 550 mit angehängter Radiosonde DFM-06 von GRAW. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).

Anhand der erhobenen Datensätze soll im Rahmen einer Stadt-Umland-Studie die Wirkung des Maschsees auf die angrenzenden Siedlungsbereiche, während einer sommerlichen, autochthonen Wetterlage mit Hitzebelastung untersucht werden. Gleichzeitig eignen sich die Messdaten zur Validierung von PALM-4U, weshalb ein zu den Messungen passendes Modell-Setup erarbeitet wurde (siehe Tabelle 2.3.4).

Tab. 2.3.4: Messungen während der Sondermesskampagne im Sommer 2020 in Hannover.

Station	Entfernung zum Maschsee	Messzeitraum	Gemessene Parameter*	Messhöhe
Theodor-Friedrichs-Station 000	ca. 0 m	23.06.2020 10:40 UTC – 15.09.2020 6:20 UTC	ta, hur, plev, rad_net, wspeed, wspeed_max, wdir	2 m, 4 m
Thies-Station 060	ca. 60 m	03.07.2020 21:46 UTC – 15.09.2020 7:31 UTC	ta, hur, u, v, w, wspeed, wdir, t_va	4 m
Thies-Station 150	ca. 150 m	11.06.2020 0:50 UTC – 15.09.2020 8:02 UTC	ta, hur, u, v, w, wspeed, wdir, t_va	4 m
Thies-Station 250	ca. 250 m	03.06.2020 11:13 UTC – 15.09.2020 11:07 UTC	ta, hur, u, v, w, wspeed, wdir, t_va	4 m
Thies-Station 400	ca. 400 m	02.07.2020 8:19 UTC – 15.09.2020 10:18 UTC	ta, hur, u, v, w, wspeed, wdir, t_va	4 m
Drohne Maschsee	ca. 0 m	Std. Aufstiege zur vollen Stunde für ca. 15 min vom 06.08.2020 4:00 UTC – 07.08.2020 4:00 UTC	ta, hur, plev, wspeed, wdir	ca. 0 bis 300 m
Drohne Altenbekener Damm	ca. 250 m	Std. Aufstiege zur vollen Stunde für ca. 15 min vom 06.08.2020 4:00 UTC – 07.08.2020 4:00 UTC	ta, hur, plev, wspeed, wdir	ca. 0 bis 300 m

\* Abkürzungen siehe Annex 1



## PALM-4U-Simulation am Maschsee in Hannover

Wichtige Eingangsdaten von PALM-4U sind der statische Treiber, der die bodennahe Beschaffenheit (Untergründe, Gebäude, Bäume, Gelände etc.) der Modelldomäne beschreibt sowie der dynamische Treiber, der den Modelllauf mit einer hinterlegten Wettersituation antreibt. Der statische Treiber wurde mithilfe von Geodaten des Landesamts für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) erzeugt (siehe Tabelle 2.3.5).

Tab. 2.3.5 Geodatensätze des LGLN.

<b>Datensatz</b>	<b>Aktualität</b>	<b>Dateiformat</b>	<b>Räumliche Auflösung</b>
Digitales Orthofoto (DOP, rgbi)	2019	GeoTIFF (Raster)	0,2 m
Digitales Oberflächenmodell (DOM)	2019	GeoTIFF (Raster)	1 m
Digitales Geländemodell (DGM)	2016	GeoTIFF (Raster)	1 m
Digitales Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM)	2018	Shape-File	Keine (Flächenumgriffe)
Gebäudeflächen	2018	Shape-File	Keine (Flächenumgriffe)
Baulandflächen	2020	Shape-File	Keine (Flächenumgriffe)
Lärmschutzwälle	2018	Shape-File	Keine (Linien)
Baumkataster	2020	Shape-File	Keine (Flächenumgriffe)

Die Bearbeitung der flächenhaften Daten erfolgte mittels zentraler Statistiken in ArcGIS 10, wodurch für das 2595 x 3035 m große Modellgebiet ein horizontales 5 m Gitter nach PALM-4U Eingangsdatenstandard (IMuK 2022) erzeugt werden konnte (siehe Abbildung 2.3.11).

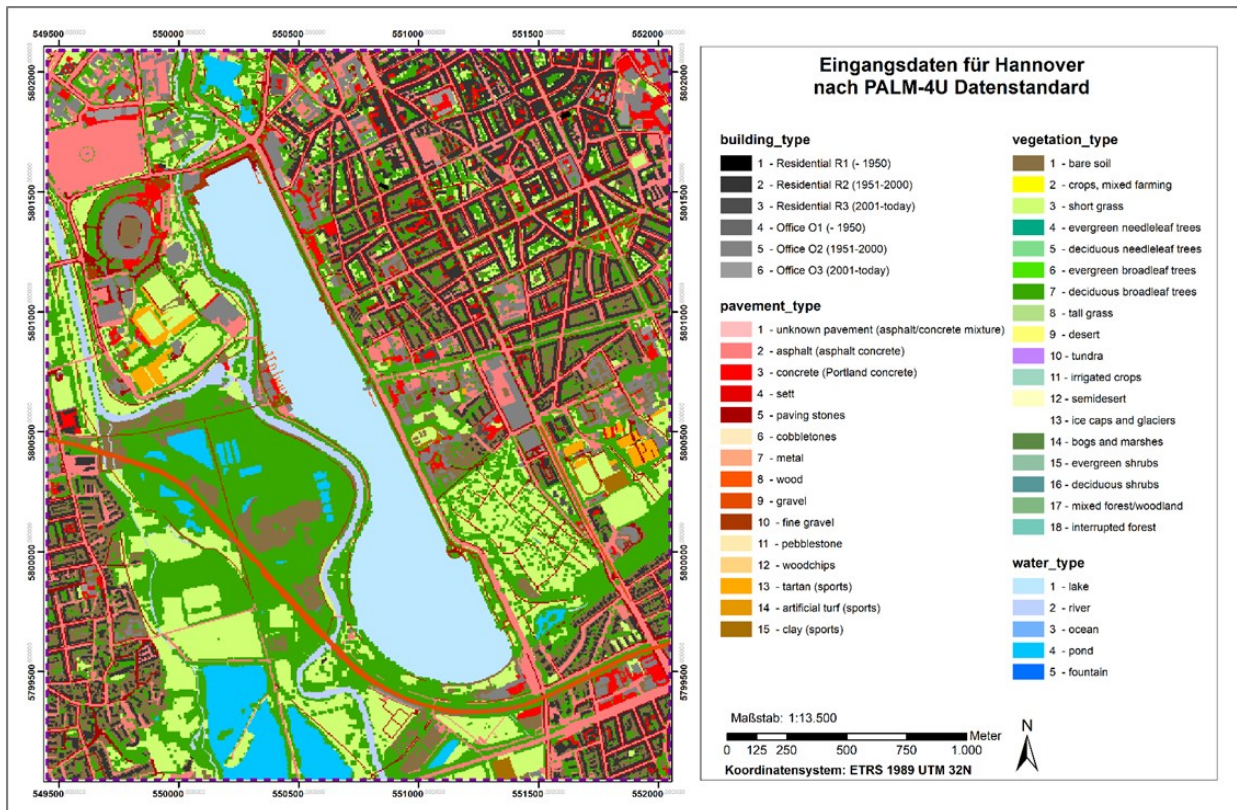


Abb. 2.3.11: Horizontales 5 m Raster der Eingangsdaten des Statischen Treibers für die Südstadt Hannovers, erstellt nach dem PALM-4U-Eingangsdatenstandard. Quelle: LUHimuk 2022.

Der Bodentyp („soil\_type“) wurde im Untersuchungsraum konstant als „medium“ angenommen. Die Geländehöhe (zt) wurde für jeden Gitterpunkt aus dem Digitalen Geländemodell (DGM) gemittelt. Das Gelände zeigt sich im Untersuchungsgebiet vergleichsweise eben. Dieses Nutzungsraster besteht insbesondere aus dem Basis-DLM des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) für „pavement\_type“, „vegetation\_type“ (ohne nennenswerte Rauigkeit wie „bare soil“ oder „short grass) und „water\_type“. Das Raster wurde durch Gebäudeflächen („building\_type“) und ein Baumkataster öffentlicher Bäume („vegetation\_type“ mit Strukturhöhe wie „deciduous broadleaf trees“) ergänzt. Die Strukturhöhe von Bäumen und Gebäuden aus der Differenz von Digitalem Oberflächen Modell (DOM) und Digitalem Geländemodell (DGM) berechnet und den jeweiligen Klassen auf dem Modellgitter hinterlegt (siehe Abbildung 2.3.12). Um auch privates Grün in die Eingangsdaten einzuarbeiten, wurde mithilfe des Nah-Infrarotkanals und des Rot-Kanals des hochaufgelösten RGBI-Orthofotos der NDVI abgeleitet (Lillesand et al. 2004):

$$NDVI = \frac{NIR - Rot}{NIR + Rot}$$

Bei NDVI-Werten > 0.1 und einer Strukturhöhe von mehr als 2.5 m fand eine Zuweisung der jeweiligen Gitterzelle als Baumklasse statt. Für Bäume muss im statischen Treiber zusätzlich

der LAI hinterlegt sein, der nach Wang et al. (2005) folgendermaßen approximiert werden kann:

$$\text{LAI}=52.292 \cdot \text{NDVI}+0.9142$$

Der niedrigste Punkt ist mit 45.6 m ü. NHN im Bereich der Leine und Ihme im Westen des Untersuchungsgebietes zu finden. Die Dämme der Güterumgehungsbahn Hannover und des Südschnellweges liegen mit bis zu 62.5 m ü. NHN etwas oberhalb des mittleren Wertebereichs, wobei die höchsten Werte der Geländehöhe mit bis zu 75.0 m ü. NHN an der Westseite der HDI-Arena erreicht werden.

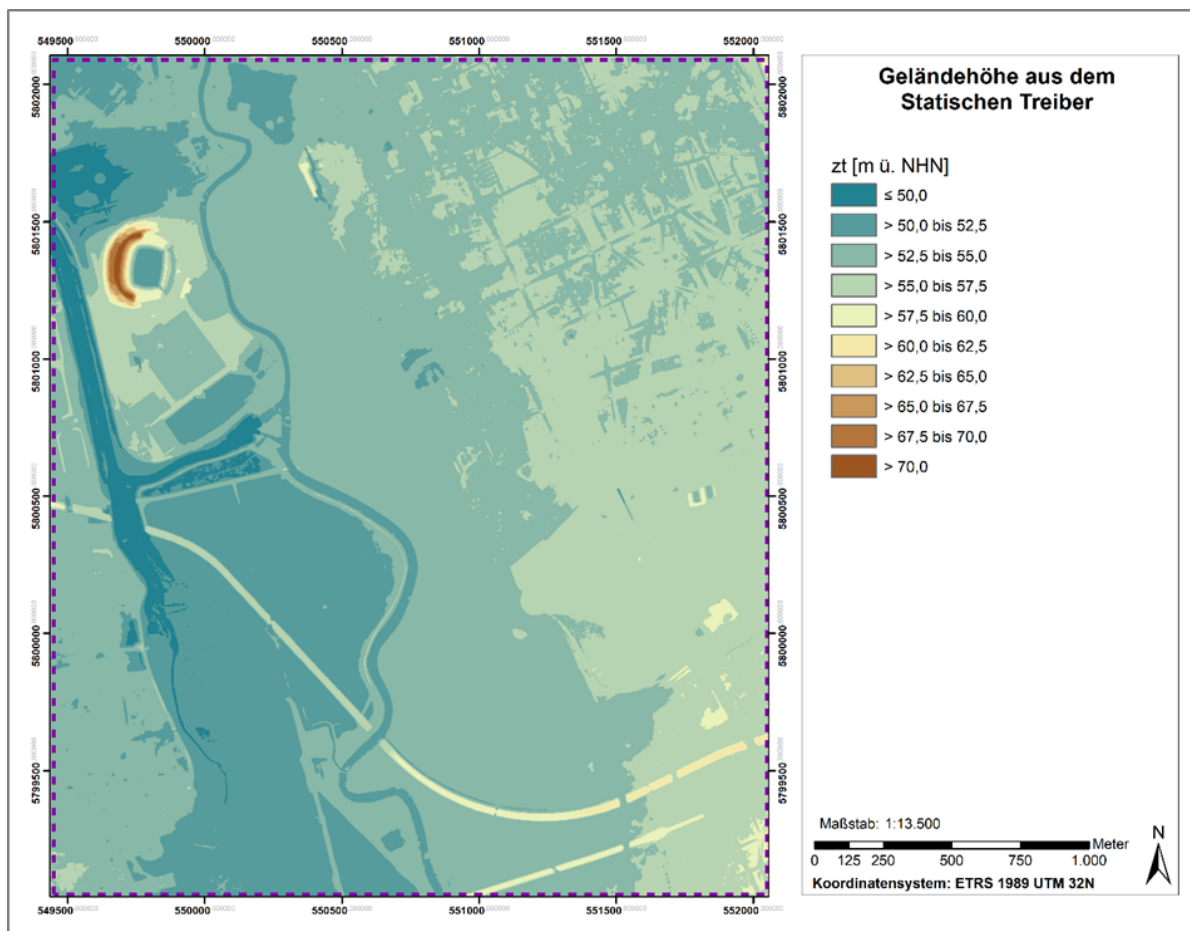


Abb. 2.3.12: Horizontales 5 m-Raster der Geländehöhe des Statischen Treibers für die Südstadt Hannovers. Quelle: LUHimuk 2022.

Nach der automatisierten Eingangsdatenaufbereitung erfolgte eine visuelle Überprüfung des Nutzungsrasters mithilfe des Orthofotos von 2019. Zweifelhafte Objekte wie Baustellen wurden durch Ortsbegehungen evaluiert. Um die realen Witterungsverhältnisse der Sondermesskampagne von 2020 in das Modell einfließen zu lassen, wurden über das pamore-Portal des Deutschen Wetterdienstes (DWD) COSMO-DE-Daten vom 06.08.2020 um 0:00 UTC bis 07.08.2020 um 4:00 UTC heruntergeladen. Diese konnten mithilfe der in

Modul A entwickelten INIFOR-Schnittstelle in einen von PALM-4U verwendbaren Dynamischen Treiber konvertiert werden (Kadasch et al. 2021). Der Modellauf wurde mit der PALM-4U-Version 6.0 (Rev: 4901) gerechnet. Die wichtigsten Einstellungen des zugehörigen Modellsetups sind in Tabelle 2.3.6 aufgetragen. Zusätzlich befindet sich das p3d-File zur Modellinitialisierung im Anhang.

Tab. 2.3.6: Initialisierungseinstellungen in PALM-4U für den Modelllauf in der Südstadt in Hannover.

	Parameter	Einstellung im Modelllauf
<b>Modellgebiet</b>	x0,y0 (lat, lon)	9.72586 °N, 52.3393 °E
	Äquidistantes Gitter	bis 400 m Höhe und ab 700 m Höhe
	Nicht-Äquidistantes Gitter (x, y, z)	Zwischen 400 m und 700 m Höhe
	Zahl der Gitterboxen (nx, ny, nz)	519 x 607 x 256
	Gitterboxgröße des vertikal äquidistanten Gitters (dx, dy, dz)	5 m x 5 m x 5 m (zwischen 0 m und 400 m) 5 m x 5 m x 15 m (zwischen 700 m und Modelloberrand)
	Nicht-äquidistantes Gitter zwischen 400 m bis 700 m	Streckung von dz von 5 m auf 15 m
<b>Modellzeit</b>	Start-Zeit	06.08.2020, 0:00 UTC
	End-Zeit	07.08.2020, 4:00 UTC
	Initialisierungszeit (Spinup)	24 h
	Simulationsdauer	28 h
<b>Meteorologie</b>	Nestingansatz für realistische Witterungsbedingungen	INIFOR
	Drucklöser	„multigrid“
	Prognostische Gleichungen für Wasserdampf-Mischungsverhältnis	ja
	Untere Randbedingung der Potentiellen Temperatur	„dirichlet“
	Strahlungsmodell	„rrtmg“
<b>Ausgabe-Parameter</b>	Maske 1: auf Höhengniveaus 2.5 m und 7.5 m	'u_av','v_av','w_av','ta_av','rh_av','theta_av','e_av', 'q_av', 'wspeed_av', 'wdir_av'
	Maske 2: Drohnenstandort am Altenbekener Damm	'u_av','v_av','w_av','ta_av','rh_av','theta_av','e_av', 'q_av', 'wspeed_av', 'wdir_av'
	Maske 3: Drohnenstandort am Maschsee (Geibelbastion)	'u_av','v_av','w_av','ta_av','rh_av','theta_av','e_av', 'q_av', 'wspeed_av', 'wdir_av'

### PALM-4U Simulation in Augsburg (TP11)

Für Augsburg wurden mit dem Ziel, die thermischen Bedingungen zu evaluieren, zwei realistische Sommersituationen simuliert. Beide Simulationen wurden mit der PALM-4U Version 21.10-rc.1 durchgeführt und unterscheiden sich nur in der synoptischen Situation der

simulierten Zeiträume. Bei diesen handelt es sich zum einen um den 25.06.2019 12:00 UTC bis zum 27.06.2019 00:00 UTC. Dieser Zeitraum ist durch eine antizyklonale Wetterlage gekennzeichnet und ist Teil einer Hitzewelle mit maximalen Lufttemperaturen von bis zu 34.3 °C am 26.06.2019, gemessen an der DWD Station Augsburg Mühlhausen außerhalb des Stadtgebiets. Zum anderen wurde der Zeitraum vom 04.06.2019 12:00 UTC bis 06.06.2019 06:00 UTC simuliert, der durch moderatere Temperaturen und besser durchmischte Bedingungen charakterisiert ist. In diesem Zeitraum liegen außerdem zusätzliche, während einer Messkampagne erhobene Vertikalprofile der Lufttemperatur, Feuchte und des Windes an drei Standorten in der Innenstadt vor. Beide Läufe wurden dynamisch mit dem COSMO-D2 Modell angetrieben und es wurde jeweils ein „wall and soil spin-up“ von 30 Stunden vorgeschaltet.

Der statische Antrieb wurde aus verschiedenen Quellen zusammengestellt und ist für beide Simulationen identisch. Die Geländehöhe wurde aus dem DGM1 des Bayerischen Landesvermessungsamts (LDBV) entnommen. Informationen zur Lage von Gebäuden sowie deren Höhe und Typ stammen aus dem LoD2-Gebäudemodell des LDBV. Wassertyp, Vegetationstyp, Straßentyp und Art der Versiegelung wurden aus OpenStreetMap abgeleitet. Ein Baumkataster der Stadtverwaltung Augsburg wurde durch eigene Kartierungen ergänzt und zur Erstellung von dreidimensionalen Bäumen herangezogen. Vegetationshöhen für größere zusammenhängende Baumbestände wurden aus LiDAR-Daten des LDBV abgeleitet. Der Bodentyp wurde aufgrund fehlender Daten einheitlich im gesamten Simulationsgebiet auf „medium-fine“ gesetzt. Die Parentdomain umfasst 880 x 640 x 256 Gitterpunkte und hat eine räumliche Auflösung von 10 m (vgl. Abbildung 2.3.13). Ab einer Höhe von 2000 m wurde in der Parentdomain das Gitter vertikal gestreckt, sodass die vertikale Auflösung dort bis zu 40 m beträgt und die Domain insgesamt 4000 m hoch ist. Somit ist die Grenzschicht für die simulierten Tage vollständig enthalten. Darin genestet sind zwei Childdomains. Die erste Childdomain liegt in der durch hohen Versiegelungsgrad und dichte Bebauung gekennzeichneten Innenstadt, ist 280 x 280 x 80 Gitterpunkte groß, mit 2 m räumlich aufgelöst und enthält mehrere Messstationen. Die zweite Childdomain befindet sich im Osten der Stadt und beinhaltet eine alte Industrieanlage, die in Zukunft durch Neubauten ersetzt werden soll, sowie Grünflächen um den Fluss Lech. Sie umfasst 320 x 520 x 80 Gitterpunkte und besitzt ebenfalls eine räumliche Auflösung von 2 m.

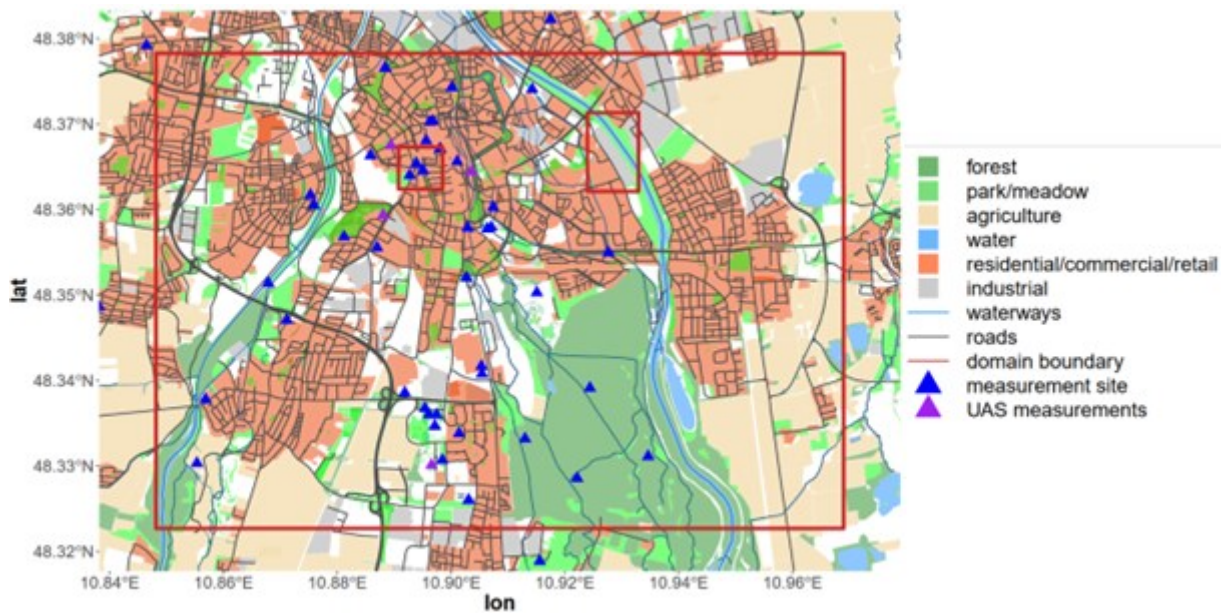


Abb. 2.3.13: Lage der Parentdomain und der zwei Childdomains für die PALM-4U Simulationen in Augsburg, stationäres Messnetz und Messorte der Flüge mit unbemannten Luftfahrtsystemen (UAS) zur Erhebung von Vertikalprofilen. Quelle: UAgeo.

## 2.4 Performance des PALM-4U Codes / technische Validierung

Alle neuen Komponenten von PALM-4U wurden strengen technischen Tests unterzogen. Dies beinhaltet Code-Überprüfung durch mindestens einen weiteren Entwickler, Benchmarking und interne Validierung (Maronga et al., 2020).

Die Codeüberprüfung umfasst die Überprüfung der Konformität mit dem PALM-4U Fortran-Codierungsstandard, die Lesbarkeit und Dokumentation des Codes, das Testen auf Laufzeitfehler, sowie und die compiler-abhängige Code-Funktionalität. Wenn die einzelnen Komponenten diese ersten Tests bestanden hatten, wurden Benchmark-Läufe durchgeführt, um die Skalierbarkeit dieser Komponenten sowohl für wenige (z. B. vier) als auch für viele (z. B. 4.000) Prozessorkerne zu bewerten. Dies ist unabdingbar, um die Anwendbarkeit des Modells für großräumige Simulationen, wie zum Beispiel Großstädte, zu gewährleisten.

## 2.5 Vorwärtsoperatoren

Unter Vorwärtsoperatoren werden hier Verfahren verstanden, die den Modellraum auf den Beobachtungsraum abbilden bzw. zur Extraktion von Beobachtungsgeometrien, -trajektorien und -zeiten aus dem PALM-4U-Modellraum eingesetzt werden. Alle qualitätsgesicherten Beobachtungsdaten (z. B. Referenzdatensätze), die zur Evaluierung von PALM-4U verwendet wurden, sind von den 3DO-Partnern (Modul B) nach [UC]<sup>2</sup>-Datenstandard (Scherer et al., 2019c) in ein Datenmanagementsystem (DMS, siehe Kapitel 3.1) integriert worden. Aus den

Zeitpunkten und Orten der Beobachtungsdaten, die aus Messungen an Stationen, vertikalen Profilen, Flugbahnen oder als gerasterte Fernerkundungsdaten von Boden-, Luft- oder Satellitenplattformen vorliegen, ist PALM-4U dann in der Lage, Ausgabedaten für diese Orte mit voller zeitlicher Auflösung zu erzeugen.

## 2.6 Zusätzliche Simulationen mit anderen Modellen

Im Folgenden werden alle zusätzlichen Simulationsläufe, die in Phase 1 mit anderen Modellen als PALM-4U durchgeführt wurden, kurz beschrieben. Die Läufe dienen der zeitnahen Untersuchung spezifischer Aspekte oder deren Untersuchung über einen längeren Zeitraum hinweg sowie dem besseren Verständnis der zur Evaluierung von PALM-4U eingesetzten Messdaten.

Tab. 2.6.1: Übersicht der zusätzlich zu den vereinbarten Simulationsläufen mit PALM-4U (VALM\*) durchgeführte Läufe mit anderen Modellen.

Modell	Modell -typ, Konfig.	Gebiet	Start	Ende	Variable / V.-Kategorie	Institution/ TP
Polyphemus/ DLR	CTM	Berlin	01.01.2018	31.12.2018	NO <sub>2</sub> / Luftchemie	DLRdfd / 14
MUKLIMO_3	RANS	Berlin	31.07.2017 9:00 UTC	01.08.2017 8:00 UTC	Lufttemperatur	FUBmeteo / 2
MUKLIMO_3	RANS	Stuttgart (gesamstädtisch)	17.07.2017 8:00 UTC	18.07.2017 8:00 UTC	Lufttemperatur, Wind	DWD / 11
ENVI-met	RANS	Berlin, Ernst-Reuter-Platz	17.01.2017 6:00 UTC	18.01.2017 6:00 UTC	Lufttemperatur, Relative Feuchte	FUBmeteo / 2
ENVI-met	RANS	Berlin OSZ Körperpflege, Schillerstraße 120	17.07.2018 06:00 UTC	18.07.2018 07:00 UTC	thermischer Wirkungskomplex	TUDDmeteo / 9
ENVI-met	RANS	Berlin OSZ Körperpflege	30.07.2017 06:00 UTC	30.07.2017 17:00 UTC	thermischer Wirkungskomplex	TUDDmeteo / 9
ENVI-met	RANS	Hamburg HafenCity Universität	29.01.2017 05:00 UTC	30.01.2017 05:00 UTC	thermischer Wirkungskomplex	TUDDmeteo / 9
ENVI-met	RANS	Hamburg Marco Polo Tower	24.01.2017 05:00 UTC	25.01.2017 05:00 UTC	thermischer Wirkungskomplex	TUDDmeteo / 9



Exemplarisch werden im Folgenden einige Ergebnisse dieser zusätzlichen Simulationen mit Polyphemus/DLR, MUKLIMO\_3 und ENVI-met für Berlin und Stuttgart vorgestellt.

Das mesoskalige Chemie-Transportmodell Polyphemus/DLR wurde eingesetzt, um gesamtstädtische 3D-Simulationen für Berlin und das Jahr 2018 durchzuführen. Die Simulationsergebnisse wurden eingesetzt, um satelliten- und flugzeuggestützte Messungen in ihrer flächenhaften und vertikalen Struktur besser interpretieren und verstehen zu können, bis die PALM-4U Simulationen verfügbar sind. Ebenso dienen die Daten einem späteren Vergleich mit den PALM-4U Ergebnissen, um Aspekte der räumlichen Auflösung zu untersuchen. Um die Qualität des Polyphemus/DLR Modelllaufs während der IOP-4 besser beurteilen zu können, wurden die bodennahen NO<sub>2</sub>-Konzentrationen mit in-situ Daten verglichen. Die Vergleiche von NO<sub>2</sub>-Stundenmittelwerten (siehe Abb. 2.6.1) zeigen für Stationen des städtischen Hintergrunds (5), vorstädtischen Hintergrunds (2) und des stadtnahen Hintergrunds (3) Korrelationskoeffizienten von R = 0.66, R=0.6 und R=0.6 sowie systematische Fehler von -0.1 µg/m<sup>3</sup>, -4.4 µg/m<sup>3</sup> und -0.4 µg/m<sup>3</sup>. Größere Abweichungen ergeben sich aber wie erwartet beim Vergleich mit Verkehrsstationen (6). Dort beträgt der Korrelationskoeffizient nur noch 0.36 und die systematische Abweichung von -18.9 µg/m<sup>3</sup> verdeutlicht, dass die starken Gradienten des NO<sub>2</sub> entlang von Straßen nicht mehr ausreichend aufgelöst werden können, was wiederum die Notwendigkeit von PALM-4U verdeutlicht.

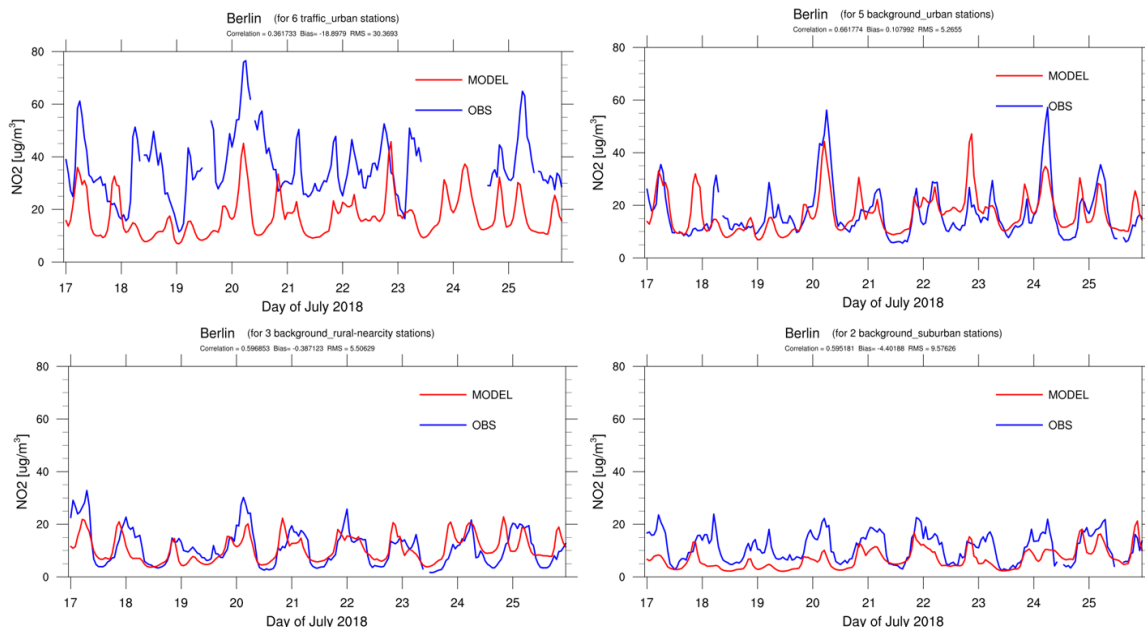


Abb. 2.6.1: Ergebnisse einer gesamtstädtischen Simulation für Berlin für die IOP-4 mit dem mesoskaligen Chemie-Transportmodell Polyphemus/DLR. Dargestellt sind Vergleiche mit in-situ Messungen der bodennahen NO<sub>2</sub>-Konzentration (Stundenmittel) für Verkehrsstationen (links oben), Stationen des städtischen Hintergrunds (rechts oben), vorstädtischen Hintergrunds (rechts unten) und des stadtnahen Hintergrunds (links unten). Quelle: Thilo Erbertseder (DLRdfd).

Abbildung 2.6.2 zeigt einen Vergleich des Modells MUKLIMO\_3 mit zwei ausgewählten Stationen, wobei die innerstädtische Station sehr gut dem Modellverlauf folgt. An der Waldstation wird vom Modell tagsüber die Lufttemperatur in 2 m ü.G. um bis zu 3 K unterschätzt und dagegen zum Abend hin überschätzt. Für den 31.07. bis zum 01.08.2017 ergab sich eine Korrelation von 0.9 zwischen der MUKLIMO\_3 Simulation zu den Beobachtungsdaten.

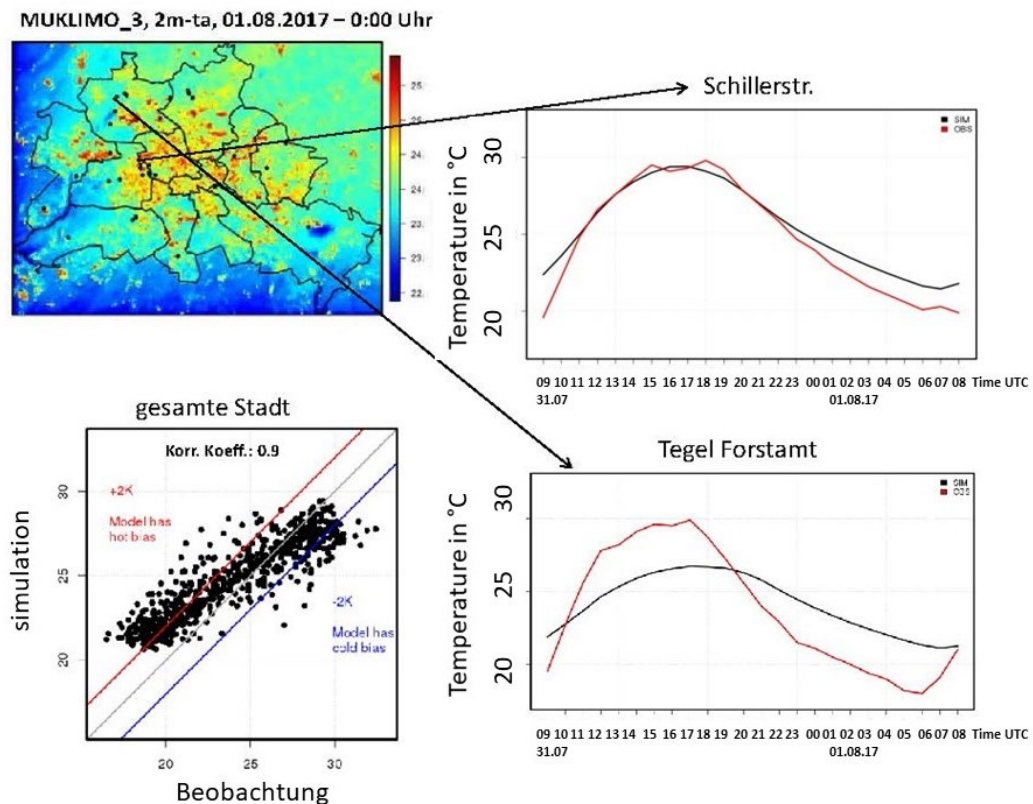


Abb. 2.6.2: Simulationsergebnisse der Lufttemperatur in 2 m ü.G. mit dem Modell MUKLIMO\_3 (Mikroskaliges Urbanes KLimaMModel) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) der IOP-2 vom 31.07.2017 9:00 UTC bis zum 01.08.2017 8:00 UTC, Berlin, gesamtstädtisch. Links oben ist die gesamte Stadt dargestellt (0:00 UTC). Rechts wird der Tagesgang von zwei ausgewählten Stationen, eine innerstädtische Station (Schillerstr.) und eine am nördlichen Stadtrand von Berlin (Tegel Forstamt), gezeigt. Links unten ist die Korrelation der simulierten 2 m Temperatur zu den Beobachtungsdaten über 24 h dargestellt. Bereiche mit einer systematischen Über- bzw. Unterschätzung der Temperatur von +/-2 K sind eingezeichnet. Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).

Abbildung 2.6.3 zeigt einen Tagesgang der Lufttemperatur und der Relativen Feuchte im Vergleich mit Beobachtungsdaten und dem mikroskaligen Simulationsmodell ENVI-met (Bruse 1999) für IOP-1 vom 17.01. bis zum 18.01.2017 um den Ernst-Reuter-Platz. Der Tagesgang der Lufttemperatur wird vom Modell tagsüber um 2.3 K unterschätzt. Die simulierte Relative Feuchte folgt dem Tagesgang der Beobachtung bis zum Minimum mit einer Abweichung von 20%, der anschließende Anstieg der Relativen Feuchte wird zur zweiten Tageshälfte kaum simuliert und das Modell unterschätzt die Relative Feuchte um bis zu 35%.

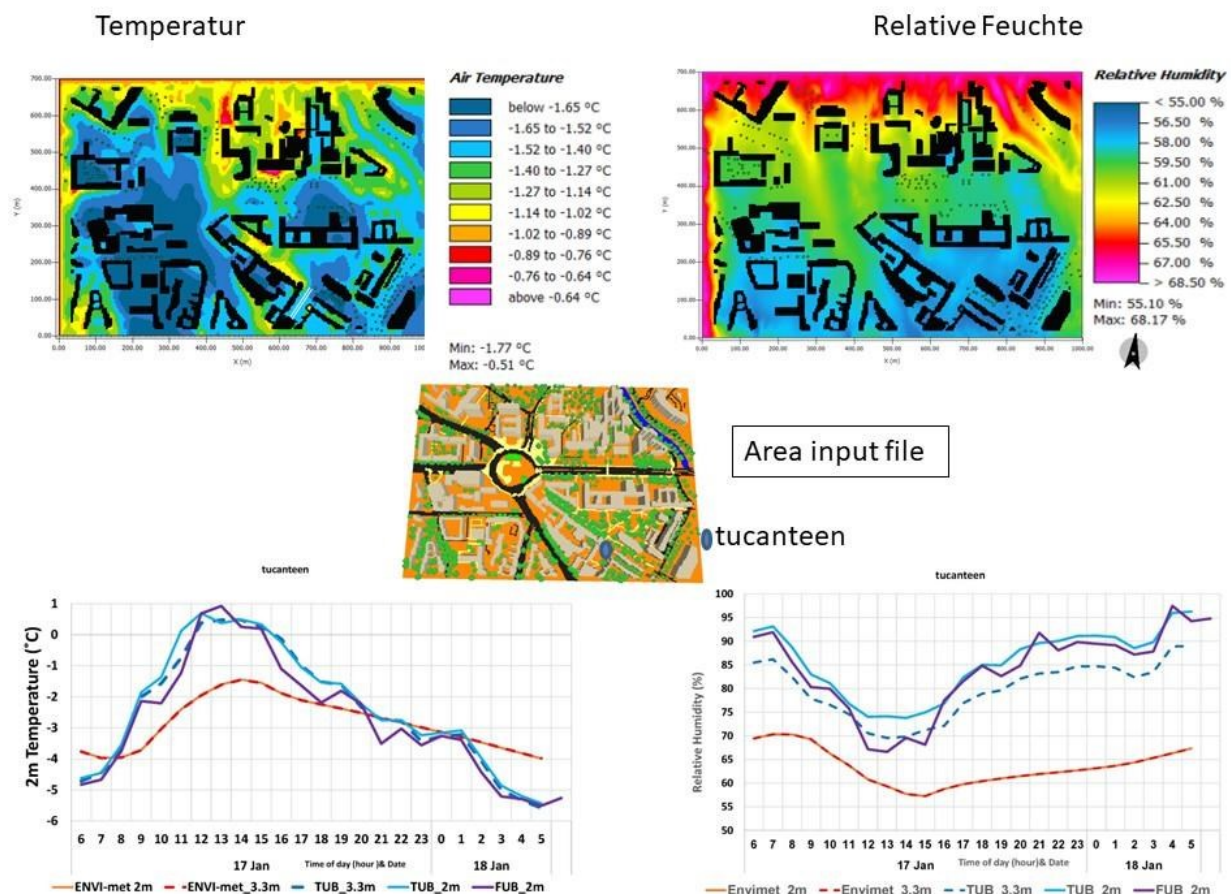


Abb. 2.6.3: Simulationsergebnisse für die Lufttemperatur und die Relative Feuchte in 2 bzw. 3 m ü.G. mit dem mikroskaligen Modell ENVI-met für IOP-1 vom 17.01. bis zum 18.01.2017 von 6:00 UTC bis 6:00 UTC für den Ernst-Reuter-Platz. Links oben ist die Temperatur und rechts oben die Relative Feuchte für 14:00 UTC dargestellt. Parallel dazu ist in den unteren Abbildungen der entsprechende Tagesgang für den Standort der Mensa der TU Berlin ('tucanteen') dargestellt. Quelle: Ronald Queck (TUDDmeteo).

Um den Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und mobilen Messsystemen zu testen, wurden Simulationen mit ENVI-met in Berlin und Hamburg durchgeführt. Abb. 2.6.4 und 2.6.5 zeigen den Vergleich exemplarisch für ein Gebiet beim Hauptgebäude der TU Berlin, das in der IOL 'TUB Campus Charlottenburg' liegt. Der dargestellte UTCI wurde aus den Simulationsdaten und aus Daten der mobilen Plattform 'Rucksack' (siehe Beschreibung unter 3.3 VALR02 TP9) berechnet. Beide Berechnungen weisen eine hohe räumliche Variabilität auf. Die größten Unterschiede treten in Bereichen mit Vegetation auf. Zum einen ist es nicht möglich, Vegetation (z. B. Bäume) im Modell räumlich detailliert abzubilden, zum anderen wird scheinbar der Einfluss der Vegetation auf das Stadtklima nicht ausreichend simuliert.

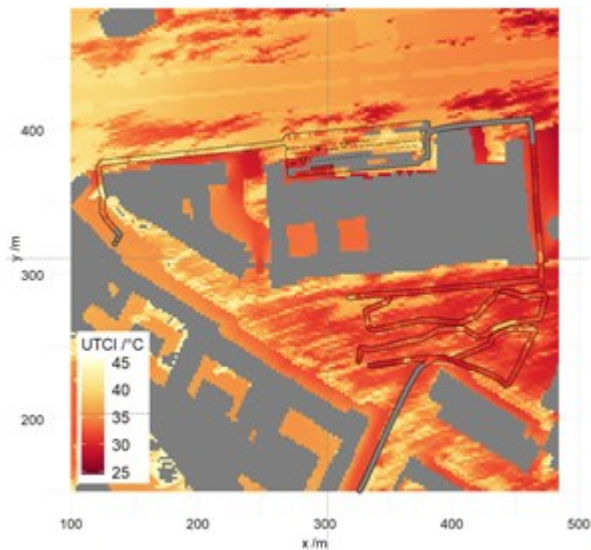


Abb. 2.6.4: UTCI am 31.07.2017 16:00, berechnet aus einer ENVI-met Simulation (Fläche) und aus Messdaten (Band), graue Flächen entsprechen Gebäuden oder aufgrund von Bewölkung ausgeschlossenen Abschnitten der Messstrecke. Quelle: Ronald Queck (TUDDmeteo).

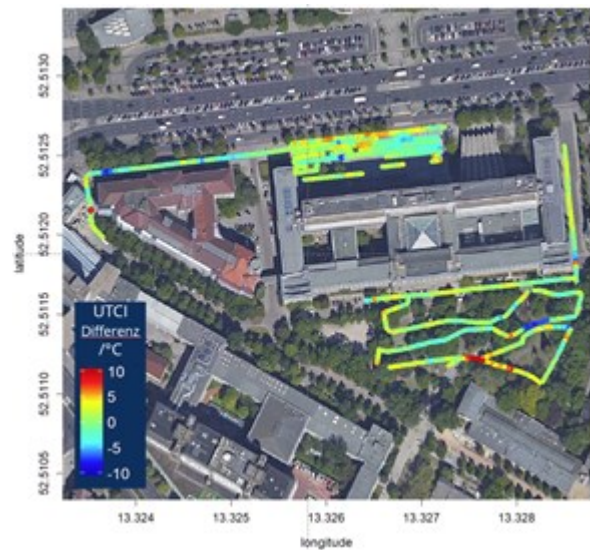


Abb. 2.6.5: UTCI Differenz zwischen ENVI-met Simulation und mobiler Plattform 'Rucksack' mit Bezug zur Vegetation (Luftbild im Hintergrund Google Earth 6/2016). Die größten Abweichungen (positiv u. negativ) ergeben sich in Bereichen mit Baumbestand. Quelle: Ronald Queck (TUDDmeteo).

Für die Intensivmessperiode vom 17. bis 18.07.2017 in Stuttgart (IOP-2.3) wurde mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 eine gesamtstädtische Simulation mit einer horizontalen Gitterweite von 50 m durchgeführt. Die Simulation diente primär als Interpretationshilfe für die Auswertung der Beobachtungsdaten im Stadtgebiet. Die MUKLIMO\_3 Ergebnisse zeigen deutlich wie abends und nachts die Zufuhr kühlerer Luft durch die Hangabwinde an der Stuttgarter Kesselberandung und durch die vom Nesenbachtal und seinen Zuflüssen in den Stadtkessel gerichteten Talabwinde eine deutliche Abkühlung im überwärmten Stadtkessel bewirkt (Abb. 2.6.6).

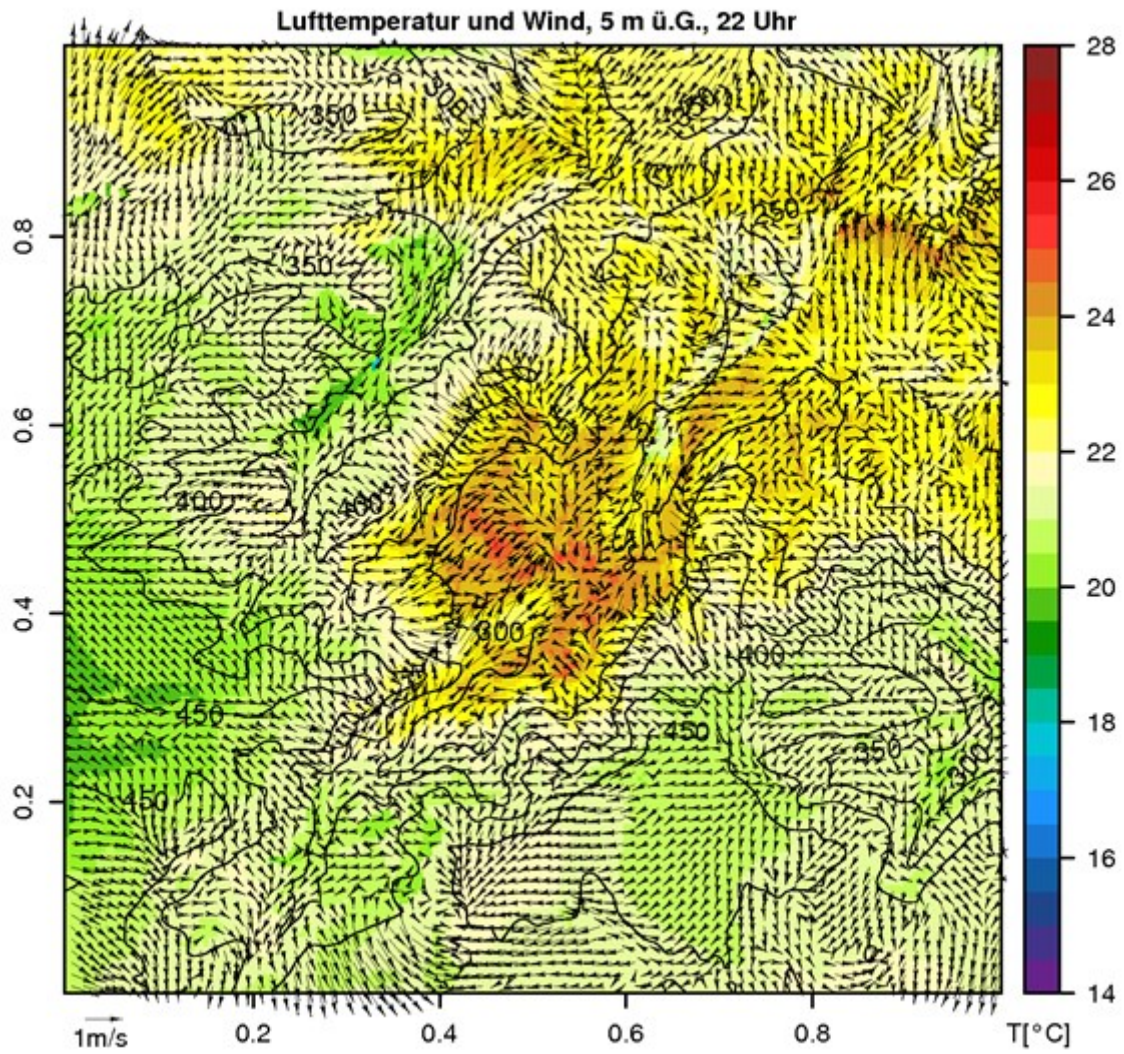


Abb. 2.6.6: Mit MUKLIMO\_3 simulierte Lufttemperatur und Windvektoren in 5 m über Grund am 17.07.2017, 20 UTC (22 MESZ) in einem 10 km x 10 km großen Gebietsausschnitt mit dem Stuttgarter Stadtkessel, dem Nesenbachtal und angrenzenden Stadtgebieten. Schwarze Konturlinien zeigen die Geländehöhe in 50 m Höhenintervallen. Quelle: Meinolf Koßmann (DWD).

### 3. Qualitätsgeprüfte Referenzdatensätze aus LTO- und IOP-Messungen

Im Folgenden werden alle Datensätze aus LTO- und IOP-Messungen, die für die Evaluierung von PALM-4U verwendet wurden, dargelegt und diskutiert. Ebenso wird das [UC]<sup>2</sup>-Datenmanagementsystem beschrieben. Einen Überblick über das Konzept zur Gewinnung und Aufbereitung dieser Messdaten zur Erfassung dreidimensionaler Prozesse in den Städten Berlin, Stuttgart und Hamburg bietet Scherer et al., (2019b). Alle Daten, die zur Evaluierung herangezogen wurden, sind unter Beachtung der Anforderungen der COST 732 qualitätsgesichert und liegen im [UC]<sup>2</sup>-Datenstandard vor (Scherer et al., 2019c). Die Datensätze entsprechen mindestens einem Datenverarbeitungsniveau 1 (processing Level 1, siehe auch [UC]<sup>2</sup>-Datenstandard) und beziehen sich auf die in Kapitel 2.2 vereinbarten und durchgeführten Modellsimulationen (VALM) bzw. Referenzmessungen (VALR). Diese Daten wurden dann verwendet, um systematische und statistische Fehler, Skill Scores und Hit Rates, als Grundlage der weiteren Bewertung der Modellgüte, zu berechnen. Ein tabellarischer Überblick zu den Referenzmessungen mit Angaben zu u.a. Variablen, Messgeräten, Messorten und Datentypen ist im Annex 2 aufgeführt.

#### 3.1 [UC]<sup>2</sup>-Datenmanagementsystem

Das [UC]<sup>2</sup>-Modellevaluierungskonzept verlangt den modulübergreifenden Austausch vieler Datensätze (derzeit mehrere Tausend Datensätze) sowie großer Datenmengen (teilweise mehrere Gigabyte pro Datensatz), die aus einer Vielzahl an Messungen, Windkanalexperimenten und mittels PALM-4U-Simulationen gewonnen wurden und daher eine hohe Komplexität in Bezug auf Datenstruktur und Metadaten aufweisen. Die Verwendung eines einheitlichen Datenformats sowie verbindlicher Konventionen für die Nutzung der Daten und Metadaten ist eine wesentliche Voraussetzung für ihre effektive und effiziente Verwendung in der Fördermaßnahme.

Zur Bearbeitung dieser Aufgaben wurde die Arbeitsgruppe (AG) ‚Datenmanagement‘ gegründet, der Partner aus den drei Modulen der Fördermaßnahme angehören, um die unterschiedlichen Bedürfnisse der Module berücksichtigen zu können. Die AG ‚Datenmanagement‘ hat die [UC]<sup>2</sup>-Datenrichtlinie ([http://www.uc2-program.org/uc2\\_data\\_policy.pdf](http://www.uc2-program.org/uc2_data_policy.pdf)) herausgegeben, welche unterschiedliche Lizenztypen einführt, um die Rechte zur Nutzung der Daten zu regeln. Des Weiteren wurde der [UC]<sup>2</sup>-Datenstandard sowohl in deutscher ([http://www.uc2-program.org/uc2\\_datenstandard.pdf](http://www.uc2-program.org/uc2_datenstandard.pdf)) als auch in englischer Sprache ([http://www.uc2-program.org/uc2\\_data\\_standard.pdf](http://www.uc2-program.org/uc2_data_standard.pdf)) entwickelt. Der [UC]<sup>2</sup>-Datenstandard wird in einem fortlaufenden Prozess den wachsenden

Bedarfen der Fördermaßnahme angepasst. In der aktuellen Version (Version 1.4.1) werden die Daten im offenen Standarddatenformat NetCDF (Network Common Data Form, <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>) gespeichert. Die Datensätze enthalten auch umfassende Metadaten, die allgemeinen wissenschaftlichen Konventionen folgen, wie sie in der CF-Version 1.7 festgelegt sind (<http://cfconventions.org/>). Die Daten werden von den TPs von Modul B strengen Qualitätskontrollen unterzogen, bevor sie innerhalb der [UC]<sup>2</sup>-Fördermaßnahme zugänglich gemacht und veröffentlicht werden. Hierzu wurden von den TPs aus Modul B unterschiedliche Werkzeuge zur Qualitätskontrolle sowie Werkzeuge zum Lesen und Schreiben von Daten entwickelt, die dem [UC]<sup>2</sup>-Datenstandard entsprechen.

Der [UC]<sup>2</sup>-Datenstandard verweist auf vier Tabellen A1 bis A4 (siehe aktuelle Versionen unter <http://uc2-program.org/datenmanagement>), die als separate Dateien vorliegen, da sie in kürzeren Abständen aktualisiert werden müssen, um neue Variablen (Tabelle A1), Variablengruppen (Tabelle A2), Institutionen (Tabelle A3) oder Standorte (Tabelle A4) hinzuzufügen. Veröffentlichte Tabelleneinträge dürfen weder geändert noch gelöscht werden, damit auch bereits erzeugte NetCDF-Dateien gültig bleiben. Die Versionsnummerierung der Tabellen erfolgt daher unabhängig von der Versionsnummerierung des [UC]<sup>2</sup>-Datenstandards.

Parallel zum [UC]<sup>2</sup>-Datenstandard wurde ein Konzept für ein Datenmanagementsystem (DMS) entwickelt. Der mit dem DMS eng verzahnte [UC]<sup>2</sup>-Datenstandard stellt sicher, dass alle über das DMS bereitgestellten Daten automatisiert zu verarbeiten sind. Nach Ende der Laufzeit der Fördermaßnahme sollen alle frei zugänglichen Datensätze des DMS in ein offenes Daten-Repository überführt werden. Seit Beginn der zweiten Phase der Fördermaßnahme wurde daher von TP1 des Moduls B das programmweite frei verfügbare [UC]<sup>2</sup>-DMS für den modulübergreifenden Datenaustausch entwickelt und eingerichtet. Das DMS ist nicht nur für die Modellevaluierung essentiell, sondern ermöglicht darüber hinaus die Nutzung der Daten für wissenschaftliche und angewandte Studien.

Das Konzept des [UC]<sup>2</sup>-DMS ist in Abbildung 3.1.1 dargestellt. Es ermöglicht einerseits das Hochladen von Daten (Upload) sowie die manuelle Suche nach Daten und Metadaten zum anschließenden Herunterladen (Download), andererseits werden auch vollständig automatisierte Arbeitsabläufe unterstützt. Ein zentraler Datenserver stellt alle Daten- und Metadaten gemäß dem [UC]<sup>2</sup>-Datenstandard für den modulübergreifenden Zugriff bereit. Alle Metadaten werden zudem in einer PostgreSQL-Datenbank (siehe auch <https://www.postgresql.org/about/>; SQL - Structured Query Language) für schnelle Suchanfragen vorgehalten. Alle Dateien und die PostgreSQL-Datenbank werden kontinuierlich gesichert (Backup) und gemäß den Regeln guter wissenschaftlicher Praxis auf

externen Speichermedien für mindestens zehn Jahre archiviert (Archive).

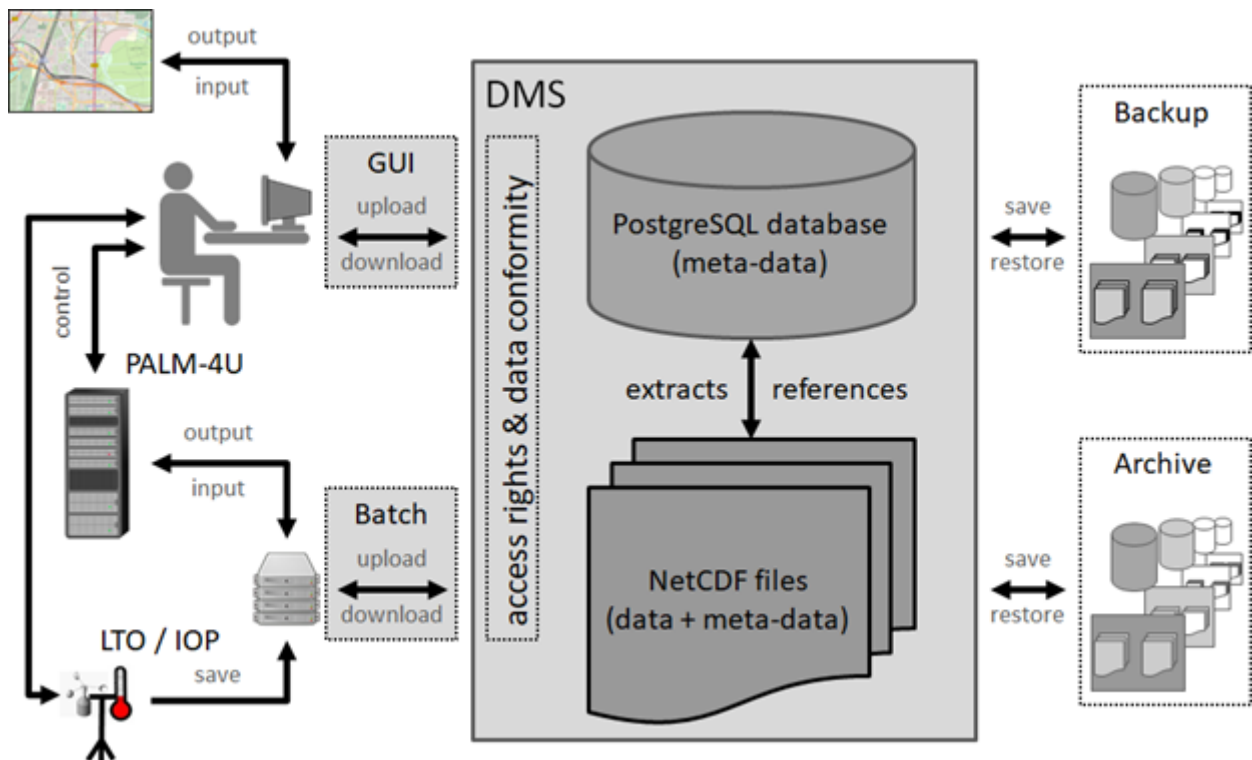


Abb. 3.1.1: Struktur des [UC]<sup>2</sup>-Datenmanagementsystems (DMS). Links zu einzelnen Komponenten: GUI (<https://dms.klima.tu-berlin.de/>); DMS (<https://dmsapi.klima.tu-berlin.de/>); Batch (<https://gitlab.klima.tu-berlin.de/klima/uc2data>). Quelle: TUBklima.

Daten können entweder manuell über eine web-basierte grafische Benutzeroberfläche (GUI) oder automatisiert (Batch) auf das DMS hochgeladen oder heruntergeladen (Download) werden. Beim Upload in das DMS wird zusätzlich zur Prüfung der Zugriffsrechte auch die Konformität der Daten mit dem [UC]<sup>2</sup>-Datenstandard überprüft.

Nach einer Registrierung können Nutzer sich über die GUI (Abb. 3.1.2) in das DMS einloggen. Ohne Login können alle Daten heruntergeladen werden, deren Lizenz eine öffentliche Nutzung erlaubt. Eingeloggte Nutzer können ihren jeweiligen Zugriffsrechten entsprechend Daten auf das DMS hochladen bzw. vom DMS herunterladen.

Nachfolgend ist der Workflow für die Nutzung des DMS für die Modellevaluierung dargestellt. Zunächst wurden Vereinbarungen zum jeweiligen Validierungslauf gemäß dem Modellevaluierungskonzept getroffen. Anschließend erfolgte die Aufbereitung und der Upload der Referenzdaten durch die TPs von Modul B. Die Referenzdaten wurden dann von Modul A heruntergeladen und für die Steuerung der PALM-4U-Ausgabedaten verwendet. Nach Abschluss der Modellsimulation wurden die Modellergebnisse von Modul A auf das DMS hochgeladen und von den TPs aus Modul B heruntergeladen, um Modellergebnisse und Referenzdaten zu vergleichen. Abschließend fand eine wissenschaftliche Bewertung der



Vergleichsergebnisse durch die Module A und B statt.

Dieser Workflow kann sowohl manuell über die GUI als auch automatisiert realisiert werden, wobei die ersten Modellvalidierungsläufe über manuelle Workflows erfolgen.

Nach einem Probebetrieb ist das frei verfügbare DMS seit September 2020 im prä-operationellen Betrieb und unterliegt einer steten Weiterentwicklung, um die Funktionalität sowie die Nutzerfreundlichkeit entsprechend der Rückmeldungen der Nutzer zu erhöhen.

**Home**

Within the framework of the BMBF programme [UC]<sup>2</sup>, we process available data and collect new or missing data utilizing long-term measurements, intensive measurement campaigns and physical modelling. To support the exchange of observation and model data between the project partners beyond the module boundaries, e.g. for the validation of the newly developed urban climate model PALM-4U or urban climatological and scientific studies, this data management system (DMS) was developed within the research programme. If you have an account, you can upload data that meets the requirements via the upload page. If not logged in, you can see and download data that is published under open licences. Please refer to the data standard and data policy, linked above, for more information.

The diagram illustrates the data management system outline, showing the flow of data between different levels and partners:

- Public data providers** feed into **Open data**, which is accessible to **Public data users**.
- Open data** is managed through **access restrictions** and **access rights**.
- Open data** leads to **Programme-wide data**, which involves **data selection** and is managed by **Programme partners**.
- Programme-wide data** leads to **Module-specific data**, which involves **access rights** and **data selection**, managed by **Module partners**.
- Module-specific data** leads to **Internal data**, which involves **access rights** and **quality control**, managed by **Sub-projects**.

Data management system outline of the BMBF programme Urban climate under Change [UC]<sup>2</sup>. Data flow depends on the assigned data policy. Reprinted from Scherer et al., 2019

ABOUT US    DISCLAIMER

Abb. 3.1.2: Startseite der web-basierten grafischen Benutzeroberfläche (GUI) des [UC]<sup>2</sup>-Datenmanagementsystems (DMS). Quelle: <https://dms.klima.tu-berlin.de/> (Zugriff: Mai 2022).

### 3.2 Lufttemperatur und -feuchte (M. Koßmann)

Die gemessenen Referenzdaten von Lufttemperatur und -feuchte sind in den Tabellen in Annex 2 für die realen Evaluierungsfälle in Berlin (VALR01 und VALR02) und Stuttgart (VALR03 und VALR04) sowie für den Idealfall in Hamburg (VALR05) aufgelistet (siehe auch Kapitel 2.2). Folgende Kartendarstellungen geben einen Überblick zu den Messstandorten und -parametern während der IOPs in Berlin, Stuttgart und Hamburg (Abb. 3.2.1 bis 3.2.5).

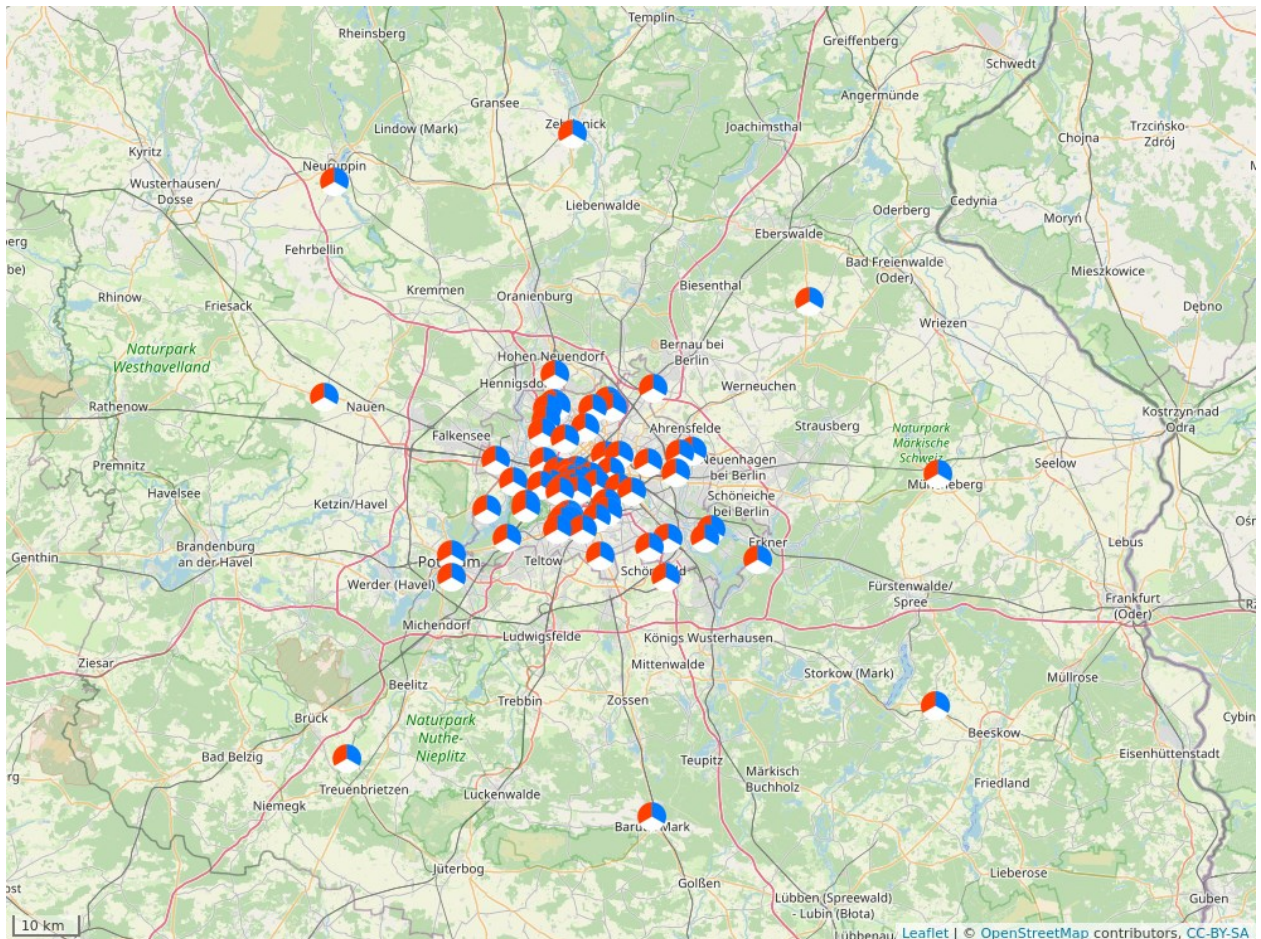


Abb. 3.2.1: Standorte von stationären Messungen der Lufttemperatur und -feuchte in Berlin während der Evaluierungszeiträume VALR01 und VALR02. Die Kreissegmente stehen für Temperatur (rot), Feuchte (blau) und Flüssigwasser/Wasserdampf in Luftsäule (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten, dass keine Messung dieser atmosphärischen Variable stattgefunden hat. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

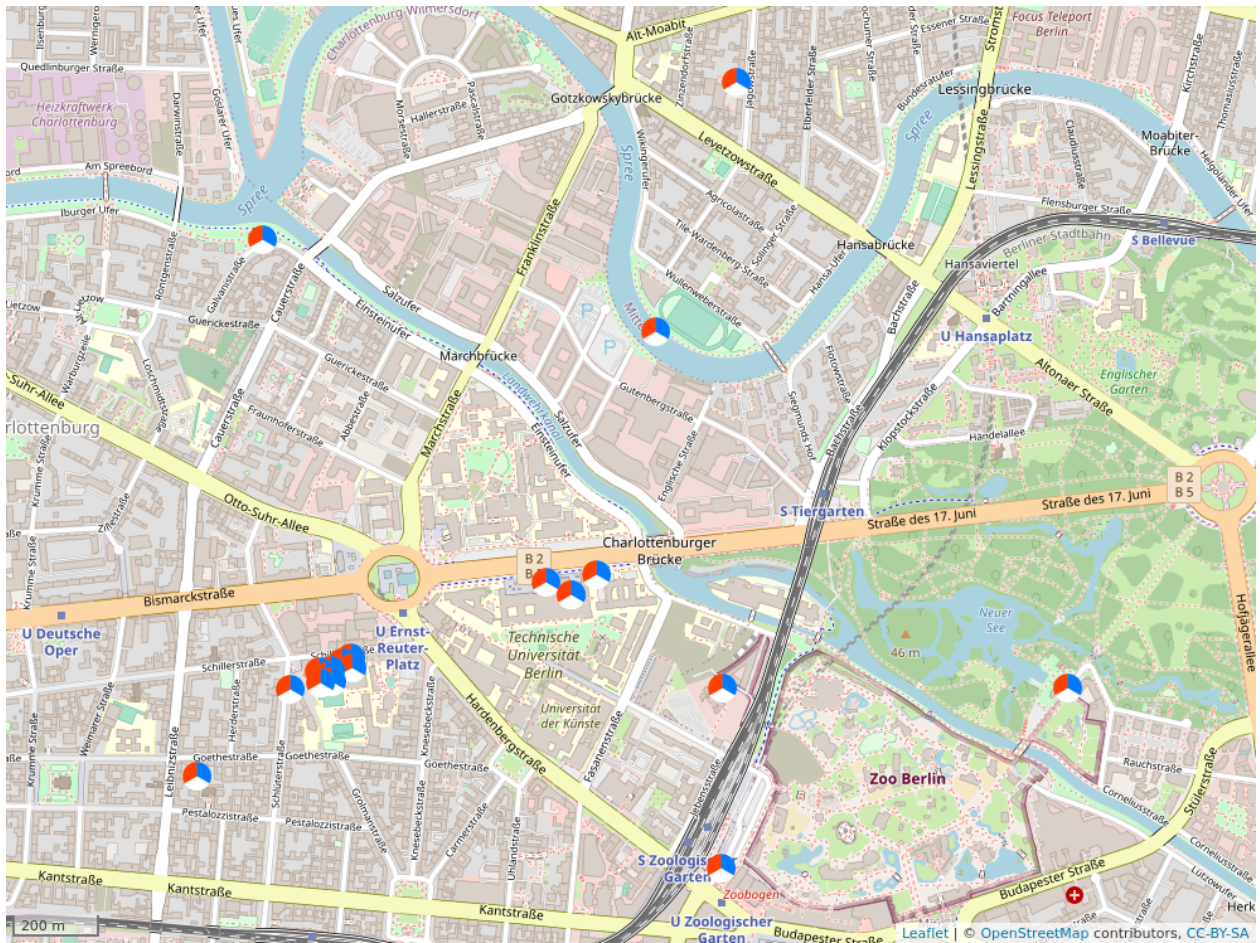


Abb. 3.2.2: Standorte von stationären Messungen der Lufttemperatur und -feuchte in Berlin in der IOL 'TUB Campus Charlottenburg' während der Evaluierungszeiträume VALR01 und VALR02. Die Kreissegmente stehen für Temperatur (rot), Feuchte (blau) und Flüssigwasser/Wasserdampf in Luftsäule (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten, dass keine Messung dieser atmosphärischen Variable stattgefunden hat. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

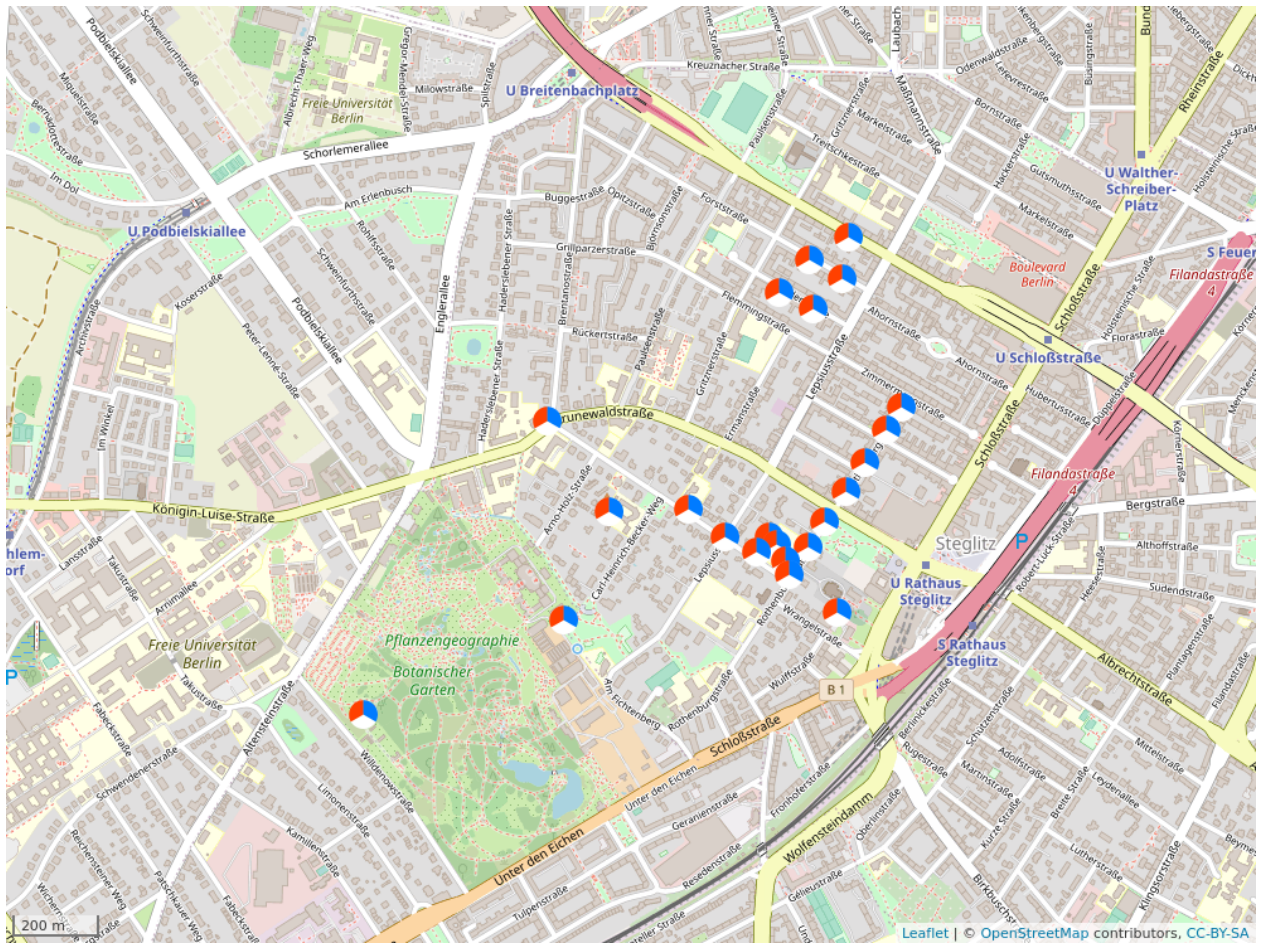


Abb. 3.2.3: Standorte von stationären Messungen der Lufttemperatur und -feuchte in Berlin an der IOL 'Rothenburgstraße, Steglitz' während der Evaluierungszeiträume VALR01 und VALR02. Die Kreissegmente stehen für Temperatur (rot), Feuchte (blau) und Flüssigwasser/Wasserdampf in Luftsäule (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten, dass keine Messung der Variablen stattgefunden hat. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

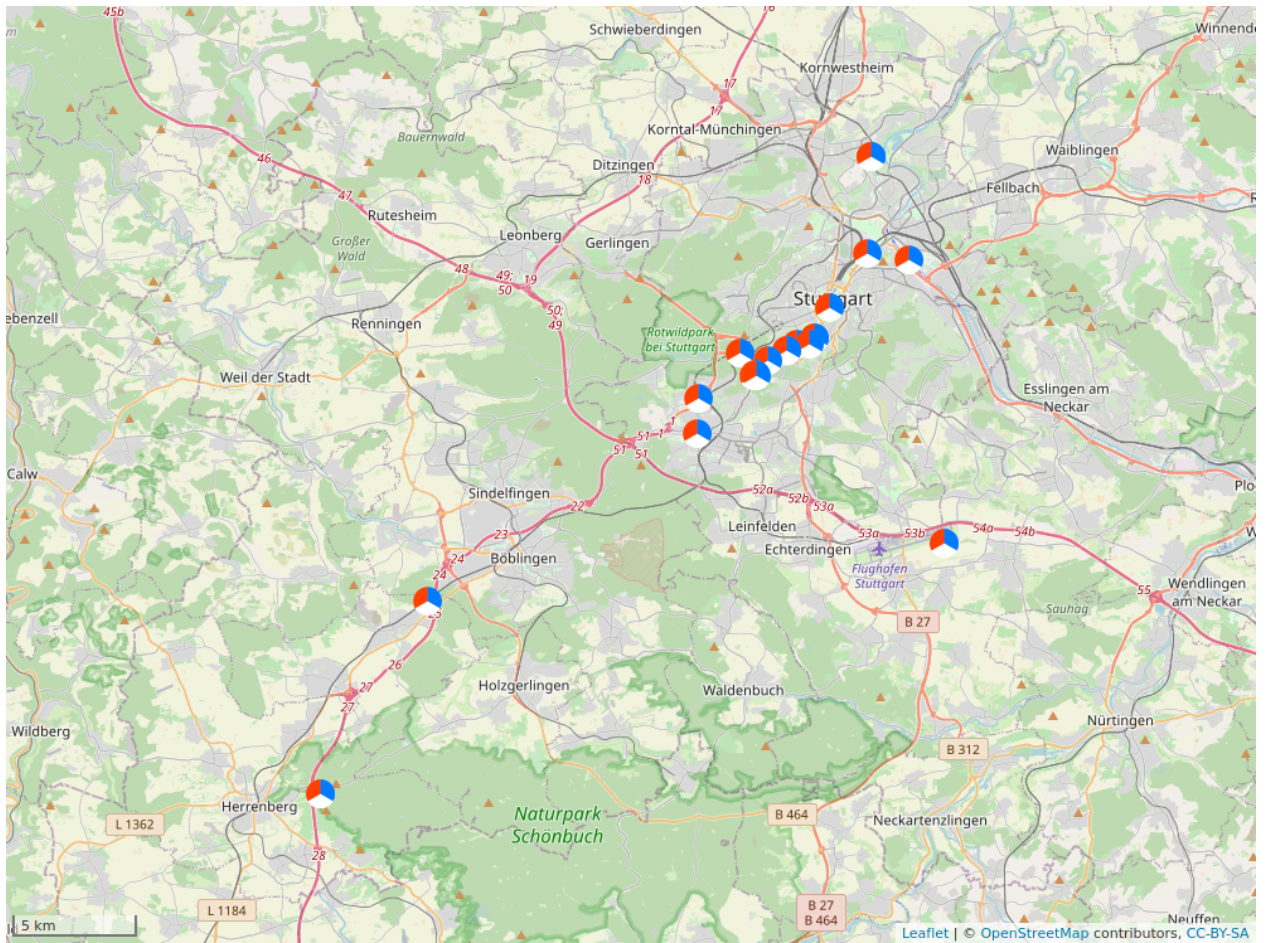


Abb. 3.2.4: Standorte von stationären Messungen der Lufttemperatur und -feuchte in Stuttgart während der Evaluierungszeiträume VALR03 und VALR04. Die Kreissegmente stehen für Temperatur (rot), Feuchte (blau) und Flüssigwasser/Wasserdampf in Luftsäule (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten, dass keine Messung der Variablen stattgefunden hat. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

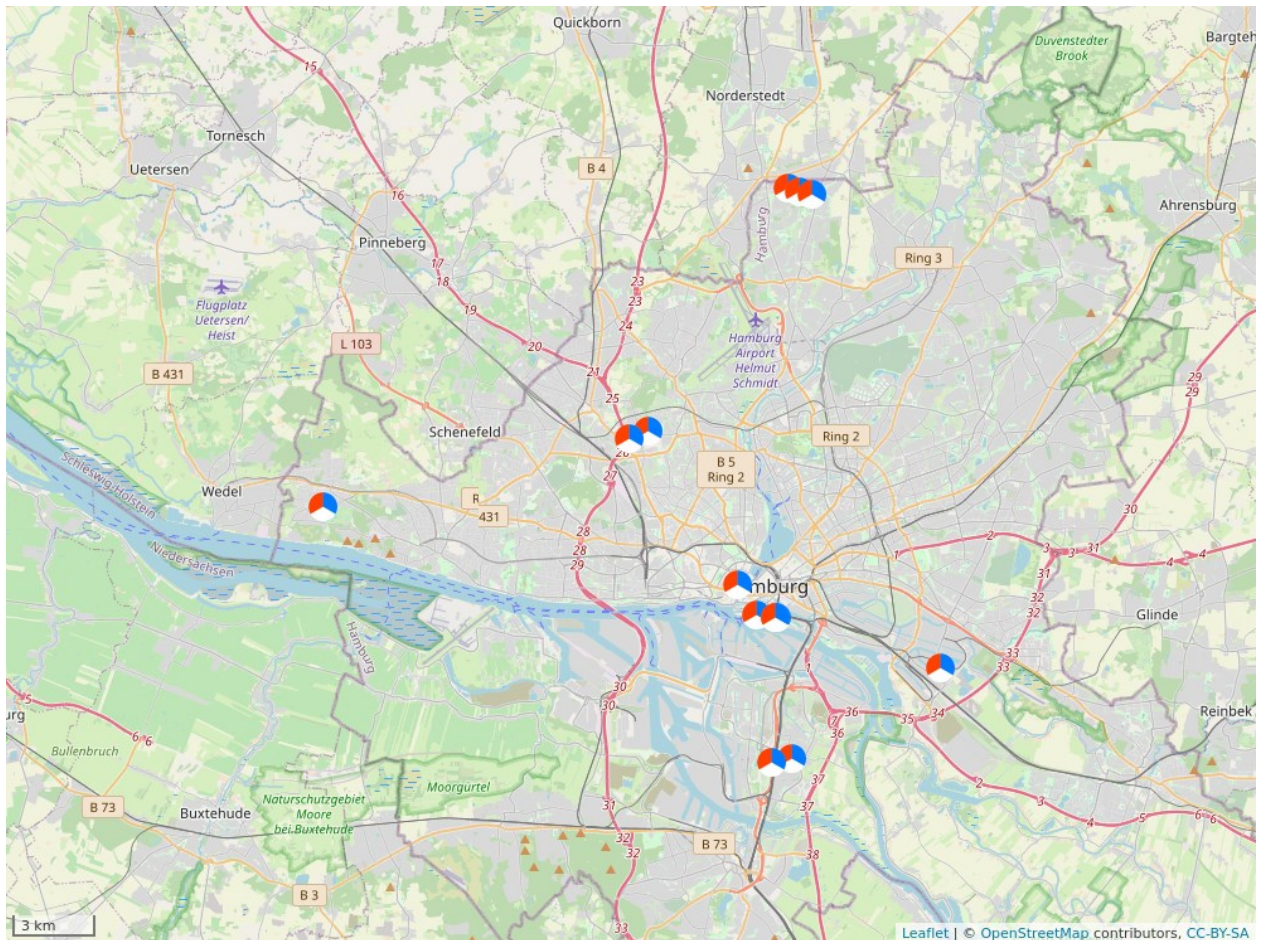


Abb. 3.2.5: Standorte von stationären Messungen der Lufttemperatur und -feuchte in Hamburg während der Evaluierungszeiträume VALR05. Die Kreissegmente stehen für Temperatur (rot), Feuchte (blau) und Flüssigwasser/Wasserdampf in Luftsäule (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten, dass keine Messung der Variablen stattgefunden hat. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

Zur Messung von Lufttemperatur und -feuchte wurden folgende Plattformen eingesetzt: Klimastationen, Freiballons, Fesselballons, Forschungsflugzeug, unbemannte Luftfahrzeuge (Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), wie z. B. Multikopter, Starrflügler), Rucksack, Fahrräder, KFZ und Mikrowellenradiometer. Messungen an Klimastationen umfassen teilweise Sensoren in mehreren Messhöhen. Die zeitliche Auflösung der Referenzdaten für die Evaluierung von Lufttemperatur- und -feuchtesimulationen ist sehr unterschiedlich und reicht von  $\leq 1$  Sekunde bei mobilen Messungen (mit KFZ, Fahrrad, Rucksack, Multikopter, Starrflügler oder Flugzeug) über sub-stündliche bis stündliche Messintervalle (z. B. Klimastationen, Fesselballon, Drohnen) bis zu Messintervallen von mehreren Stunden (Zeiten zwischen Radiosondenaufstiegen).

In Berlin wurden von sechs TPs in IOP-1 für den Evaluierungsfall VALR01 Lufttemperatur und -feuchte gemessen und von acht TPs für VALR02 in IOP-4. In Stuttgart wurden von fünf TPs Referenzdaten durch Feldmessungen für den Evaluierungsfall VALR03 in IOP-1 und von sechs TPs für VALR04 in IOP-4 erhoben. In Hamburg wurden für die Evaluierung des

Idealfalls Feldmessdaten von einem TP in IOP-2 und IOP-4 sowie in IOP-1 und IOP-3 von zwei TPs erhoben, als auch Windkanalmessungen durchgeführt. Für die Evaluierungsfälle in Berlin liegen Referenzdaten der bodennahen Lufttemperatur und -feuchte aus einem besonders dichten Messnetz von mehr als 80 (VALR01) bzw. mehr als 90 (VALR02) Klimastationen vor. In Berlin und Stuttgart ist die Verfügbarkeit von Vertikalsondierungen der Lufttemperatur und -feuchte insgesamt bei den Sommer-Evaluierungsfällen (VALR02, VALR04) etwas höher als bei den Winter-Evaluierungsfällen (VALR01, VALR03).

#### Mobil gemessene Lufttemperaturen in Berlin

Während der IOP-2, -3 und -4 wurden in Berlin von TP 4 entlang einer mobilen Messroute mit einem Fahrrad die Lufttemperatur mithilfe eines Thermoelements (Campbell Thermoelement FW3) gemessen. Dieses hat gegenüber vieler klassischer Temperaturmessfühler den Vorteil, dass es sehr schnell auf Temperaturänderungen reagiert und somit die kleinräumigen Temperaturunterschiede in den verschiedenen Stadtstrukturen auflösen kann. Die Messfahrt wurde zwei Mal täglich entlang einer 22 km langen Strecke durchgeführt und die Messdaten mit einer zeitlichen Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet. Beispielhaft ist in Abbildung 3.2.6 der Temperaturverlauf entlang der Messroute am 16.07.2018 im Zeitraum von 11:30 bis 13:30 UTC dargestellt.

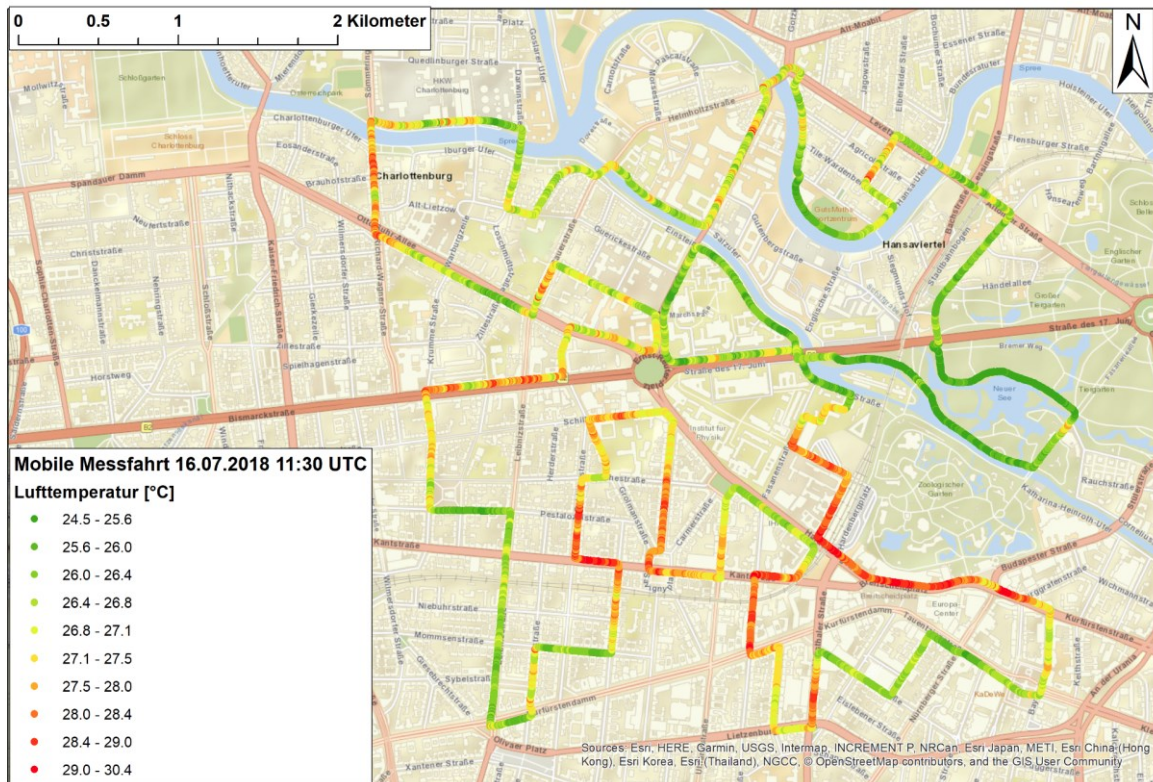


Abb. 3.2.6: Temperaturmessung entlang der mobilen Messroute am 16. Juli 2018 in der Zeit von 11:30 bis 13:30 UTC. Quelle: Agnes Straaten (TUBSgeo); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

## Vergleichsmessungen

Die institutionsinternen Maßnahmen der TPs zur Sicherung der Qualität der gemessenen Lufttemperatur- und Luftfeuchtigkeitsdaten sind in den Tabellen durch den Qualitätsindex (Q-I) gekennzeichnet. Da auch zwischen den Kalibrierungssystemen der TPs Unterschiede bestehen, wurden Labor- und Feldvergleichsmessungen durchgeführt, um die Bias-Werte zu bestimmen.

- Laborvergleich und Feldvergleich am Fachgebiet Klimatologie der TU Berlin
- Feldvergleich in Stuttgart (Marienplatz)
- Feldvergleich in Berlin (Flughafen)

## Laborvergleich und Feldvergleich am Fachgebiet Klimatologie der TU Berlin

In der Klimakammer des Fachgebiets Klimatologie am Institut für Ökologie der TU Berlin wurden vom 08. bis 15.11.2018 Vergleichsmessungen der Lufttemperatur und der relativen Feuchte durchgeführt (Abb. 3.2.7). Als Referenzgerät diente ein Vaisala HMP155



(Seriennummer H0250004). In der Klimakammer wurde hierbei die Lufttemperatur in sieben Stufen und die relative Feuchte in vier Stufen variiert.



Abb. 3.2.7: Klimakammer im Fachgebiet Klimatologie der TU Berlin. Foto: Fred Meier (TUBklima).

Der Ergebnisbericht (Meier, 2019) enthält für alle beteiligten Sensoren Tabellen der gemessenen Werte der Lufttemperatur und der relativen Feuchte sowie aus linearer Regression abgeleitete Werte von Offset und Gain zur Kalibrierung mit den Gleichungen:

$$T_{cal} = T_{raw} * gain + offset$$

$$RH_{cal} = RH_{raw} * gain + offset$$

Neben dem Laborvergleich wurde während IOP-4 vor dem Hauptgebäude der TU Berlin auch ein Feldvergleich durchgeführt, bei dem die Lufttemperatur- und Luftfeuchtesensoren folgender Messplattformen verglichen wurde (für Abkürzungen der beteiligten Institutionen siehe Annex 1): MobiLab des FZJiek8, Messfahrrad der TUBSgeo, Rucksack und Messfahrrad der TUDDmeteo. Details hierzu sind im Unterkapitel 3.7 beschrieben.

## Feldvergleich in Stuttgart

Vom 09.07.2018 20:00 UTC bis zum 10.07.2018 9:00 UTC fanden im Rahmen der IOP-4 am Marienplatz in Stuttgart Vergleichsmessungen Lufttemperatur und der relativen Feuchte statt (Intercals; Abb. 3.2.8). Am Vergleich nahmen folgende Messsysteme teil: MobiLab Messfahrzeug des FZJiek8, instrumentiertes E-Bike und Messwagen des USifk, Profilmesswagen sowie LTO Klimastation Marienplatz des DWDku1 (Abb. 3.2.9). Auf Basis der Vergleichsdaten wurden lineare Regressionsgleichungen ermittelt, die zur Kalibrierung der Messungen verfügbar sind.

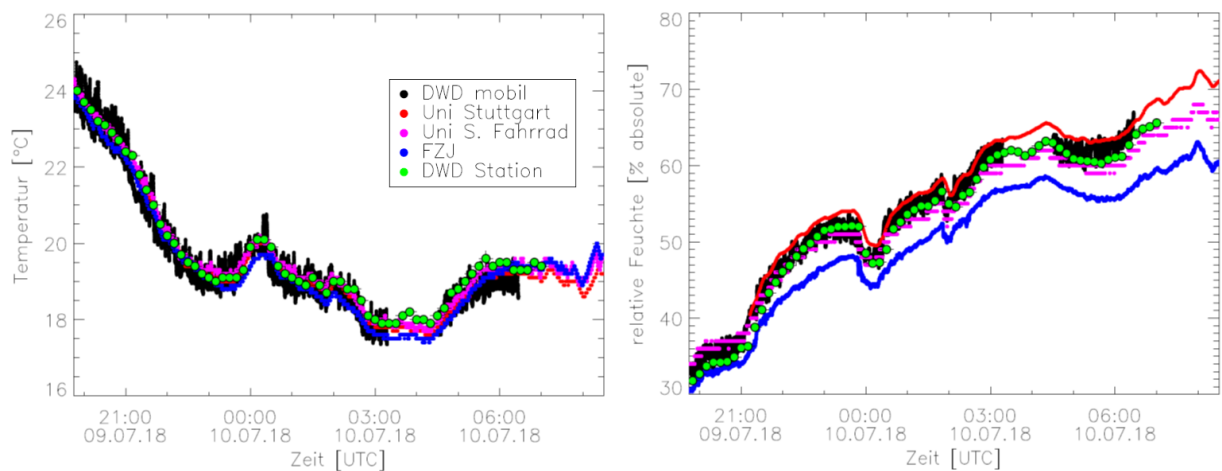


Abb. 3.2.8: Während der Vergleichsmessung im Juli 2018 auf dem Marienplatz in Stuttgart gemessene Werte der Lufttemperatur (links) und der relativen Feuchte (rechts). Quelle: Robert Wegener (FZJiek8).



Abb. 3.2.9: MobiLab (FZJiek8), Profilmesswagen (DWDku1), stationärer Messwagen (USifk) während der Vergleichsmessungen am Marienplatz in Stuttgart (v.l.n.r.). Foto: Robert Wegener (FZJiek8).

## Feldvergleich in Berlin

In der Nähe von Berlin wurden am Flughafen Schönhagen (EDAZ) in Trebbin im Rahmen der IOP-4 Vergleichsmessungen der Lufttemperatur und der Luftfeuchte durchgeführt. Der Vergleich fand am 19.07.2018 von 14:20 bis 18:30 UTC unter Beteiligung des MobiLab Messfahrzeugs des FZJiek8 und der instrumentierten Cessna Caravan des DLRpa statt (Abb. 3.2.10).



Abb. 3.2.10: MobiLab (FZJiek8) und instrumentierte Cessna Caravan (DLRpa) während der Vergleichsmessungen am Flughafen in Berlin. Foto: Robert Wegener (FZJiek8).

### 3.3 Wind (O. Kiseleva)

Dieses Kapitel präsentiert die Windmessungen, die für die Evaluierung von PALM-4U erhoben wurden. Folgende Kartendarstellungen geben einen Überblick zu den Messtandorten und -parametern während der IOPs in Berlin, Stuttgart und Hamburg (Abb. 3.3.1 bis 3.3.5).

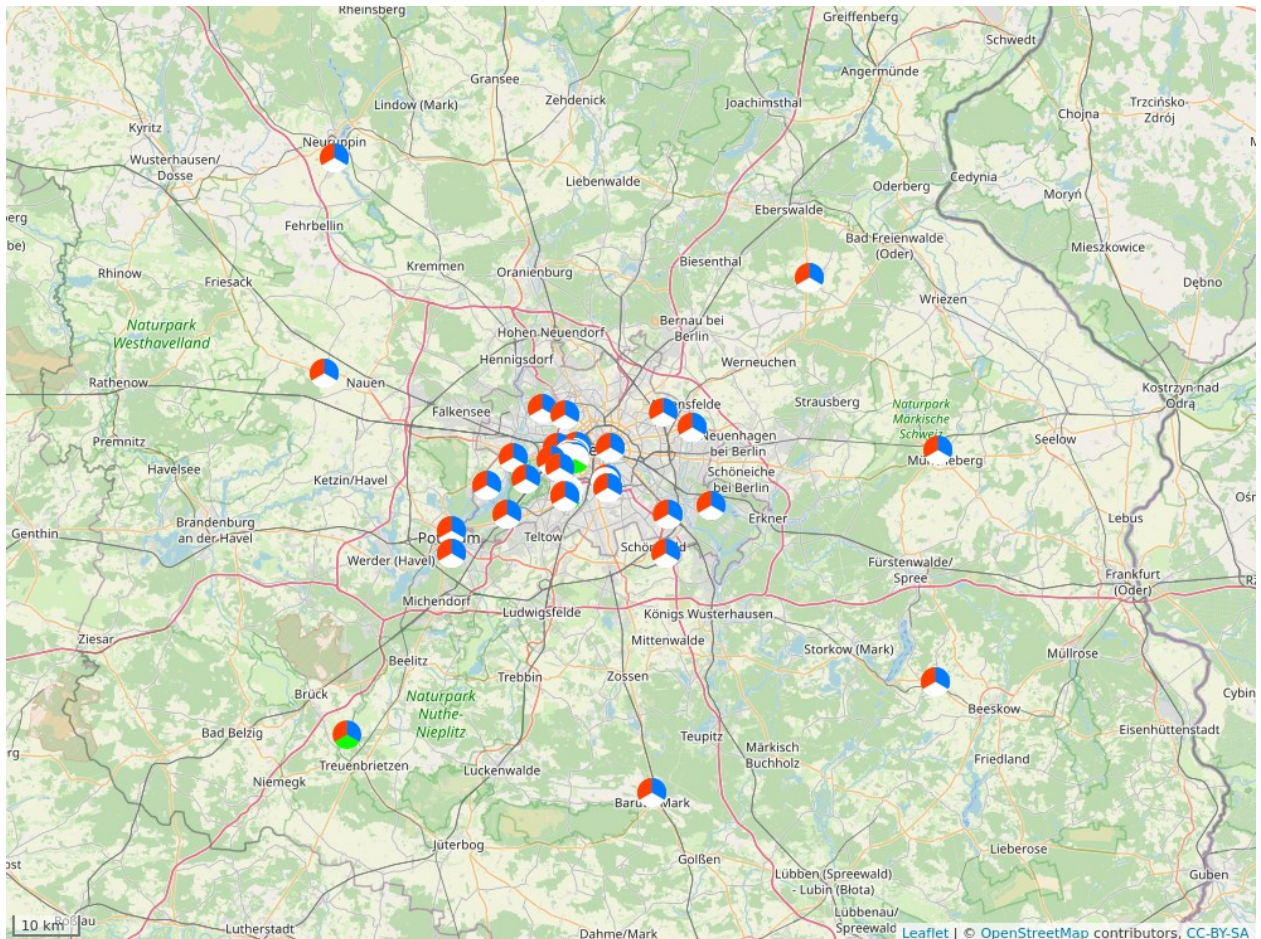


Abb. 3.3.1: Standorte der stationären Messungen von Windkomponenten in Berlin während der Evaluierungszeiträume VALR01 und VALR02. Die Kreissegmente stehen für Windgeschwindigkeit (rot), Windrichtung (blau) sowie die Windkomponenten  $u$ ,  $v$ ,  $w$  (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten keine Messung der jeweiligen Variable(n). Quelle: Achim Holtmann (TUBKlima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

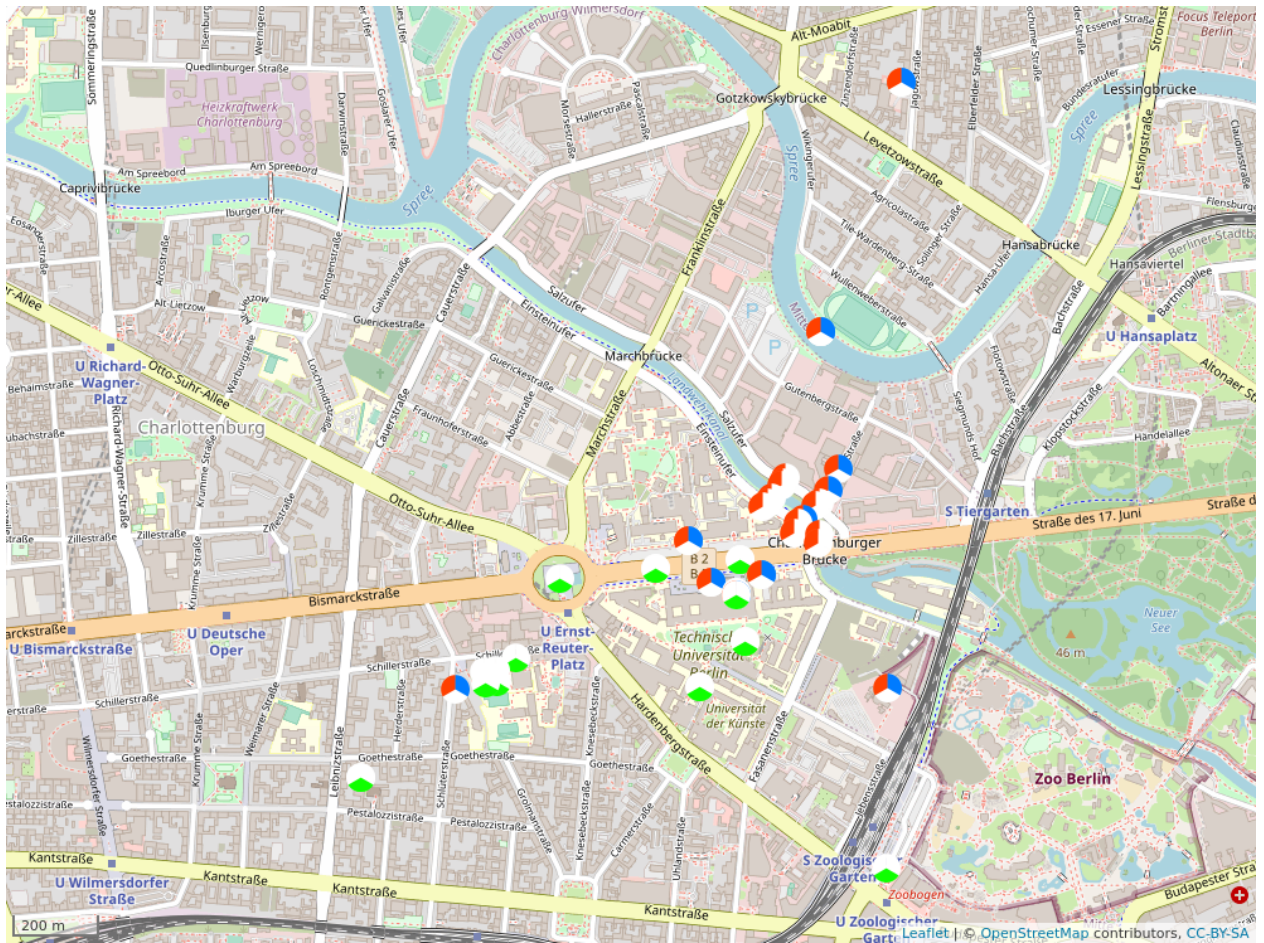


Abb. 3.3.2: Standorte der stationären Messungen von Windkomponenten in Berlin in der IOL 'TUB Campus Charlottenburg' während der Evaluierungszeiträume VALR01 und VALR02. Die Kreissegmente stehen für Windgeschwindigkeit (rot), Windrichtung (blau) sowie die Windkomponenten  $u$ ,  $v$ ,  $w$  (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten keine Messung der jeweiligen Variable(n). Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

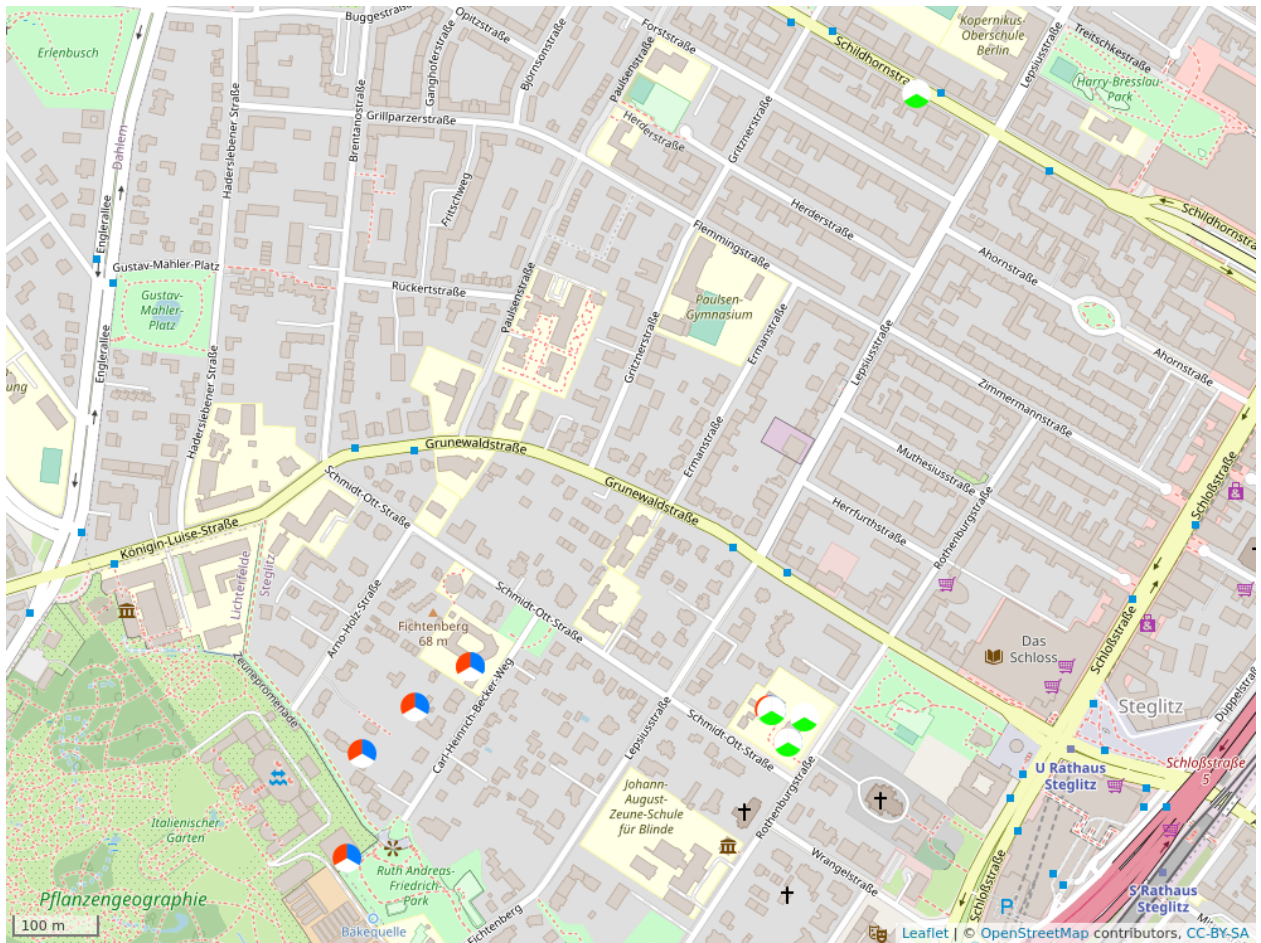


Abb. 3.3.3: Standorte der stationären Messungen von Windkomponenten in Berlin in der IOL 'Rothenburgstraße, Steglitz' während der Evaluierungszeiträume VALR01 und VALR02. Die Kreissegmente stehen für Windgeschwindigkeit (rot), Windrichtung (blau) sowie die Windkomponenten  $u$ ,  $v$ ,  $w$  (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten keine Messung der jeweiligen Variable(n). Quelle: Achim Holtmann (TUBKlima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

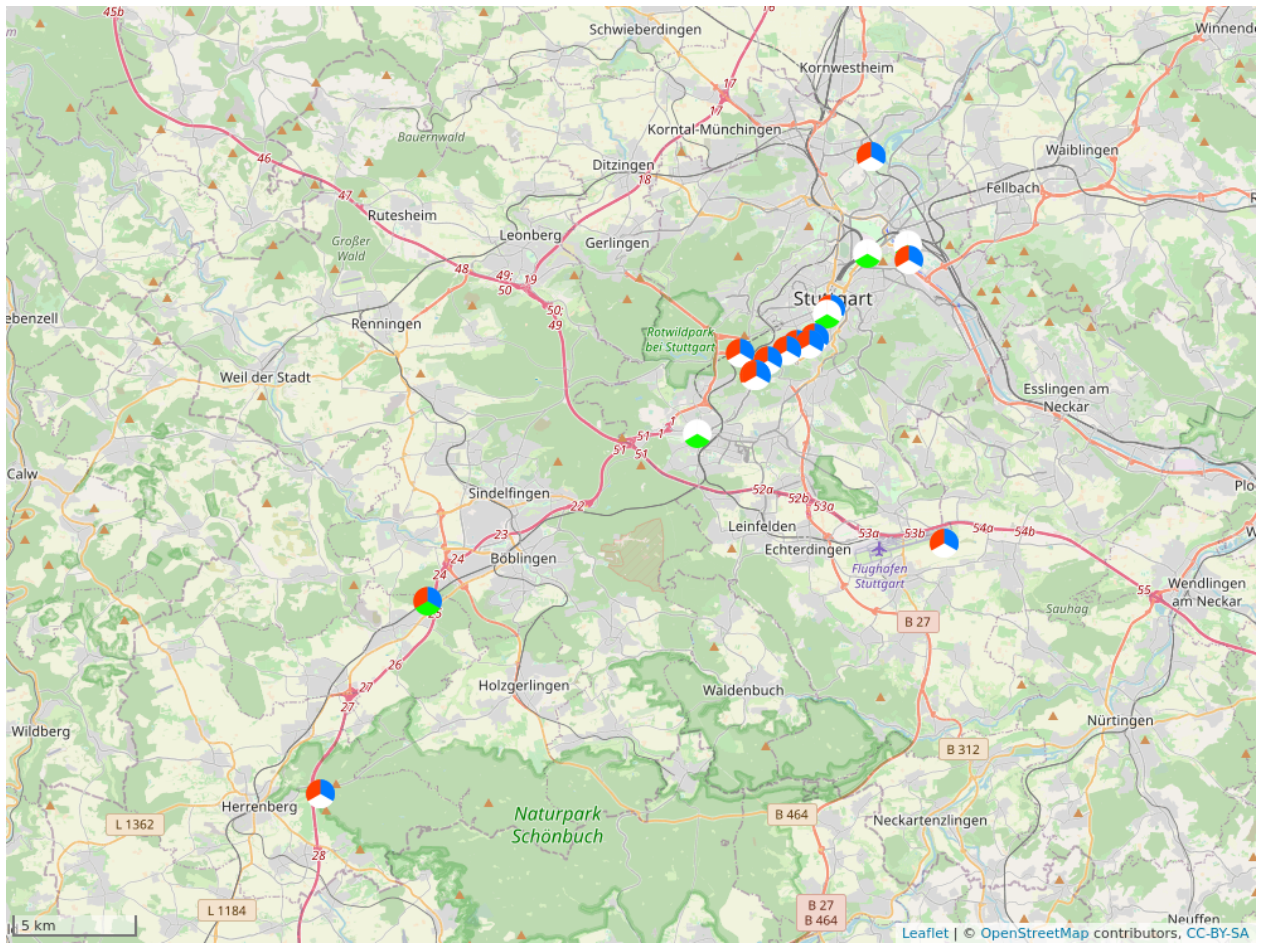


Abb. 3.3.4: Standorte der stationären Messungen von Windkomponenten in Stuttgart während der Evaluierungszeiträume VALR03 und VALR04. Die Kreissegmente stehen für Windgeschwindigkeit (rot), Windrichtung (blau) sowie die Windkomponenten  $u$ ,  $v$ ,  $w$  (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten keine Messung der jeweiligen Variable(n). Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

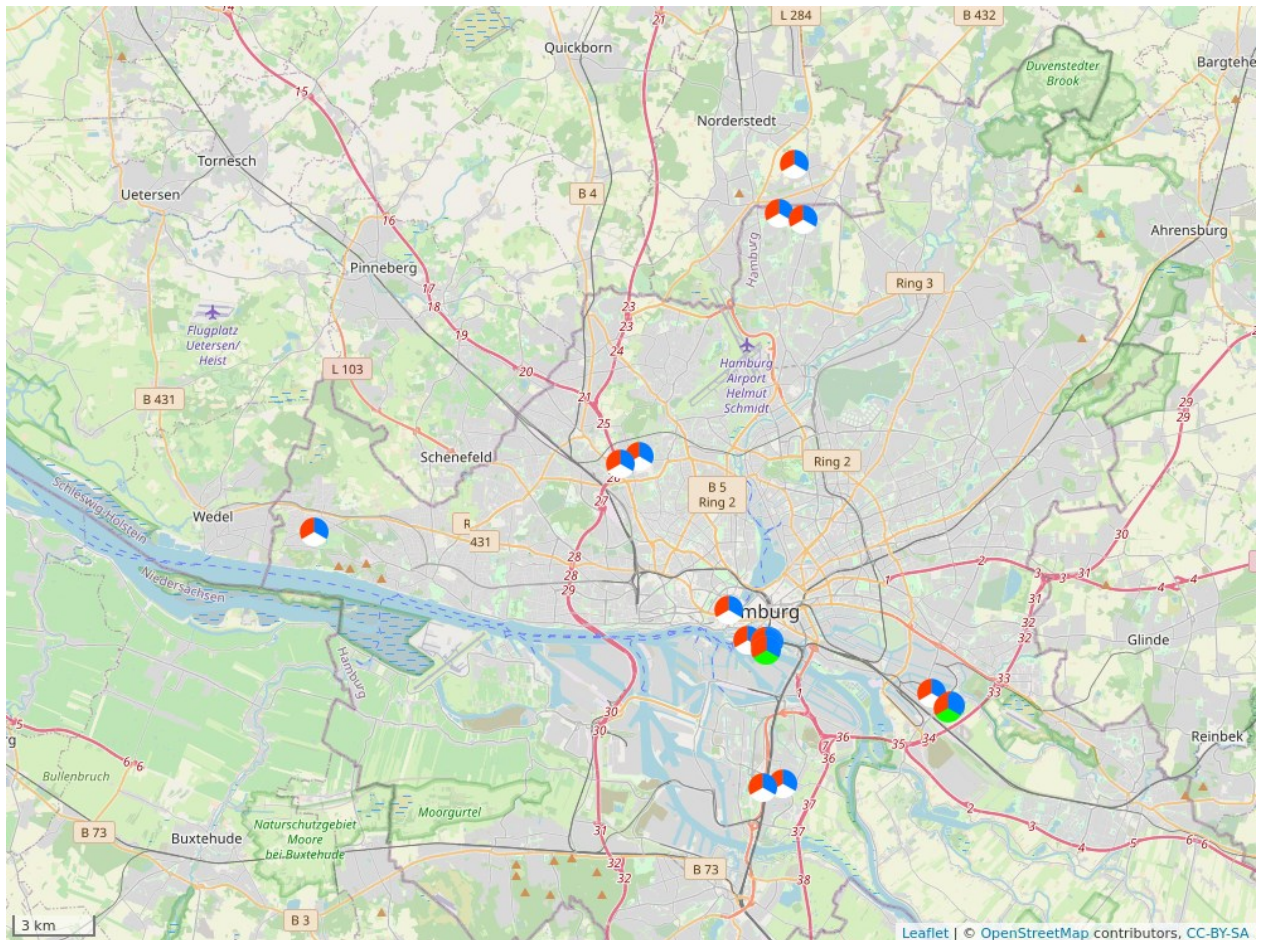


Abb. 3.3.5: Standorte der stationären Messungen von Windkomponenten in Hamburg während der Evaluierungszeiträume VALR05. Die Kreissegmente stehen für Windgeschwindigkeit (rot), Windrichtung (blau) sowie die Windkomponenten  $u$ ,  $v$ ,  $w$  (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten keine Messung der jeweiligen Variable(n). Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

Insgesamt stellen zwölf TPs ihre Datensätze, die während der LTOs und der IOPs erhoben wurden, für die Modellvalidierung zur Verfügung. Die Windmessungen erfolgten sowohl mit In-situ Windmessgeräten, die an verschiedenen Messplattformen (Messmasten, -container, -busse, Fahrräder, Kopter, Starrflügler, Flugzeug, Fesselballons, Radiosonden) installiert wurden, als auch mit Fernerkundungssystemen wie dem Windlidar (Light Detection And Ranging) oder dem Sodar (Sound Detecting And Ranging). Die erhobenen Datensätze liefern die dreidimensionale Struktur der Windfelder in den drei Städten Berlin, Stuttgart und Hamburg. Die Evaluierungszeiträume für Berlin werden mit VALR01 und VALR02 bezeichnet. In Berlin erfolgten die Windmessungen vorwiegend an zwei Messorten in der Stadt (IOL TUB Campus Charlottenburg und IOL Rothenburgstraße, Steglitz) und an zwei Messorten im Umland, d. h. am Tempelhofer Feld und in Grunewald. Während des ersten Evaluierungszeitraums (VALR01) im Winter 2017 führten die Partner von sechs TPs die Windmessungen in Berlin durch. Im Sommer 2018 waren neun TPs mit Windmessungen zu



den Zeiten des zweiten Evaluierungszeitraums (VALR02) aktiv.

Für die Modellevaluierung in Stuttgart wurden zwei Episoden festgelegt (VALR03 und VALR04). Die Windmessungen wurden im Stadtzentrum, im Nesenbachtal, am Schnarrenberg und im Neckartal durchgeführt (Kiseleva et al., 2019). Im Winter 2017 (VALR03) führten fünf TPs Windmessungen durch. An den Messungen im Sommer 2017 (VALR04) beteiligten sich sechs TPs.

In Hamburg wird die Evaluierung des Idealfalles VALM05 durch entsprechend normierte Feldmessungen und Windkanalmessungen durchgeführt (VALR05). Die Windmessungen aus den vier IOPs wurden zu einem Datensatz (VALR05) zusammengefasst, um eine ausreichend große Anzahl an Messungen für die statistische Evaluierung des Idealfalles (VALM05) zu erhalten.

## VALR01

### TP1 - TUBklima

Die Winddaten wurden in der IOL TUB Campus Charlottenburg in verschiedenen Höhen ü.G. an folgenden Messorten erfasst: tucanteen 4 m ü.G., tuerpl 4.7 und 10 m ü.G., tumainlawn 4 m ü.G., tumainroof (10 m über Dach, 56 m ü.G.), tustr17west 4 m ü.G., tustr17east 4 m ü.G.. In der IOL Rothenburgstraße, Steglitz wurden die Windmessungen am Messort rothenburg in 3.2 m und 23 m ü.G. durchgeführt. Die LTO Klimastationen ‚schlosscharl‘ und ‚potsdamneuga‘ lieferten Winddaten aus 2 m ü.G..

### TP1 - UAgeo

Die mit Starrflüglern erhobenen Winddaten wurden bei konstantem Schub mittels Differenzen der Ground-Speed bei Rücken- und Gegenwind berechnet. Die Aufstiege erfolgten bis 250 m ü.G. im Grunewald (dahlemerfeld) sowie auf dem Gelände des GutsMuths Sportzentrums (gutsmuths) in der IOL ‘TUB Campus Charlottenburg’.

### TP2 HUBgeo

Der IOP-Messstandort ‚tumathsouth‘ befand sich auf einem Dach eines Hauses in der IOL TUB Campus Charlottenburg in der Nähe des Ernst-Reuter-Platzes. Der LTO-Standort

„adlershofgeo“ lieferte die Windmessungen sowohl über dem Boden (Messgarten zwischen den Gebäuden, 2 m ü.G. als auch über dem Dach des Gebäudes des Geographischen Institutes (6 m über Dachniveau) in Berlin Adlershof. Die Geräte wurden zweiwöchentlich gewartet, die Daten gesichert und qualitätsgeprüft.

#### TP3 FUBmeteo

Datensätze der Windgeschwindigkeit und -richtung von zehn Klimastationen stehen für die Evaluierung zur Verfügung. Die Winddaten wurden an verschiedenen Orten in Berlin in unterschiedlichen Höhen ü.G. erfasst: tumainplaza 2 m ü.G., tegelersee 3 m ü.G., pichelsdorf 6 m ü.G., wannsee 8 m ü.G., gatow und marzahnwuhle 10 m ü.G., mueggelsee 13 m ü.G., funkturm 130 m ü.G..

#### TP6 - FZJiek8

Während der ersten Evaluierungsepisode wurden die mobilen Messungen mit dem Meslabor MobilLab durchgeführt. Die Windgeschwindigkeiten wurden mit einem Vaisala WXT 520 erfasst. Die Messungen erfolgten mit Sekundenauflösung in 2 m ü.G.. Für die mobilen Messungen wird der tatsächliche Wind aus dem gemessenen Wind und der Fahrzeugbewegung ermittelt.

#### TP11 - DWD/DWDku1/DWDFelg

Am Tempelhofer Feld lieferten drei Klimastationen die Zeitreihen der Windgeschwindigkeit und -richtung in 10 m ü.G. (airportsfx, airporttxl, airportthf). Am Alexanderplatz wurden die Winddaten am Funkturm in 368 m ü.G. erfasst (alexanderpl). Für die Modellevaluierung stehen außerdem die Daten von sieben Klimastationen außerhalb von Berlin zur Verfügung (lindenbergl, heckelbergl, neuruppin, potsdam, berge, baruth) mit Windmessungen in 10 m ü.G. sowie die Radiosondenaufstiege bis 3.5 km ü.G. am Meteorologischen Observatorium Lindenberg (lindenbergl).

#### TP12 - LUHimuk

Die Vertikalsondierung von Windgeschwindigkeit und -richtung erfolgte auf dem Fichtenberg (fichtenbergl) in der IOL Rothenburgstraße (Steglitz) mit Hilfe eines Hexakopter-

Messsystems, bestehend aus der Drohne DJI Flamewheel 550 und der Radiosonde DFM-06 von GRAW. Die Messungen wurden bei einer Steiggeschwindigkeit von ca. 2 m/s eingeleitet, um bei einer Sondenmessfrequenz von 2 Hz etwa einen Messwert pro Höhenmeter zu erhalten. Für die Messung wurde das Messsystem vom Wind erfasst und horizontal verdriftet, um aus Positionsunterschieden pro Zeiteinheit Windinformation abzuleiten ("Verdriftungsmethode"). Hierbei wurden stündliche Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit und -richtung bis 250 m ü.G. erfasst. Vor dem Upload auf das DMS wurden fehlerhafte Windwerte entfernt.

## VALR02

### TP1 - TUBklima

In der IOL TUB Campus Charlottenburg wurden mittels folgender Messplattformen Windmessungen durchgeführt: Mast (tumainroof 10 m über Dach, 56 m ü.G.), Biometstation (schillerosz 3 m und 1.5 m ü.G.), mc115 (Berliner Luftgüte Messnetz und Luftdaten Messstation; 5.1 m ü.G.). Ein Doppler-Wind-LIDAR (tumainroof 56 m ü.G.) lieferte Profile des Horizontalwinds mit einer vertikalen Auflösung von 30 m. In der IOL Rothenburgstraße, Steglitz wurden Winddaten an folgenden Messorten erfasst: rothenburg (10, 20, 30, 40 m ü.G.), mc117 (Berliner Luftgüte Messnetz und Luftdaten Messstation; 5.1 m ü.G.). Ein Doppler-Wind-LIDAR (rothenburg) lieferte Profile des Horizontalwinds mit einer vertikalen Auflösung von 30 m. Am Tempelhofer Feld in Berlin wurden die u,v,w-Windkomponenten in den Höhen 0.5 und 2 m ü.G. erfasst. Die LTO Klimastationen 'schlosscharl' und 'potsdamneuga' lieferten Winddaten aus 2 m ü.G..

### TP1 - UAgeo

Die mit Starrflüglern und Koptern erhobenen Winddaten wurden für die Starrflügler bei konstantem Schub mittels der Differenzen des Ground-Speed bei Rücken- und Gegenwind ermittelt, während bei den Koptern deren Neigung zur Beibehaltung der konstanten Horizontalposition ausgewertet wird. Die Aufstiege erfolgten bis 250 m ü.G. am Tempelhofer Feld (airportthf), in der IOL TUB Campus Charlottenburg auf dem Gelände des GutsMuths Sportzentrums (gutsmuths) und der Hertzallee (hertzallee).

#### TP2- HUBgeo

Während dieser Episode wurde in Berlin, Adlershof die LTO-Station ‚adlershofgeo‘ betrieben. Die Messungen erfolgten sowohl in 2 m ü.G. als auch in 6 m Höhe über dem Dachniveau.

#### TP3 – FUBmeteo

An insgesamt zehn Klimastationen an verschiedenen Orten in Berlin wurde Windgeschwindigkeit und -richtung gemessen. Damit sind es zwei Stationen mehr als während VALR01: ifmroof und jagow 10 m ü.G..

#### TP4 – TUBSgeo

Das Ultraschallanemometer USA-1 der Firma METEK befand sich während des Validierungszeitraumes auf einem 10 m hohen Messmast auf dem Dach des Hauptgebäudes der TU Berlin in der IOL TUB Campus Charlottenburg in 57 m ü.G.. Das USA-1 erfasste dabei mit einer Messfrequenz von 10 Hz die drei Windkomponenten u, v und w. Die Windgeschwindigkeiten wurden auf Plausibilität geprüft ( $-30 \text{ m/s} \leq u_a, v_a \leq 30 \text{ m/s}$ ;  $-5 \text{ m/s} \leq w \leq 5 \text{ m/s}$ ).

#### TP6 - FZJiek8

(siehe VALR01)

#### TP9 – TUDD

Für die Bestimmung der Windgeschwindigkeit im Niveau von Fußgängern wurden in Berlin Messungen mit einem Rucksack durchgeführt. Auf dieser mobilen Plattform war ein 2D Ultraschallanemometer WTX520 (Vaisala) installiert. Das Gerät selbst hat eine relative Genauigkeit von 3% ( $>0,1 \text{ m/s}$ ). Da sich die Plattform bewegt, addiert sich dazu der Fehler bei der Bestimmung der Plattformgeschwindigkeit. Letzterer sinkt mit der Plattformgeschwindigkeit und der Kontinuität der Bewegung. Bei Laufgeschwindigkeiten größer als 1 m/s wird er auf 10% geschätzt. Alle Messungen mit langsamerer Laufgeschwindigkeit (z. B. an Kreuzungen) wurden entfernt. In der Summe wird der Fehler auf 15% geschätzt. Für den Vergleich mit PALM-4U müssen die Daten gemittelt werden, da die instantane Windgeschwindigkeit in der turbulenten Strömung eine hohe zeitliche Variabilität aufweist. Unter den Annahmen einer quasi-stationären Strömung könnten die mobilen Messungen räumlich gemittelt werden. In der bodennahen Schicht ist ein räumliches Mittel jedoch als kritisch zu betrachten.

#### TP11 – DWD/DWDku1/DWDfelg

Zusätzlich zu den Messungen der ersten Episode wurde die Vertikalsondierung meteorologischer Parameter am Tempelhofer Feld mithilfe eines Radiosondensystems von Vaisala und eines Fesselsondensystems vom Observatorium Lindenberg bis 3.5 km durchgeführt (airportthf). Außerdem lieferte eine Klimastation am TUB Campus Charlottenburg (tuchembuid) die Zeitreihen der Windgeschwindigkeit und -richtung.

#### TP12 – LUHimuk

Im Vergleich zur Validierungsepisode VALR01 wurden zusätzlich zum Standort auf dem Fichtenberg (fichtenberg) auch Messungen auf dem Ernst-Reuter-Platz am TUB Campus in Charlottenburg (tuerpl) durchgeführt. Während Versuchsaufbau und -durchführung mit dem Hexakopter-Messsystem unverändert blieben, betrug die maximale Aufstiegshöhe 300 m ü.G..

#### TP14 – DLRpa

Die DLR Cessna war am Flugfeld Schönhagen stationiert und führte einen Messflug am 17.07. 2018 von ca. 8:20 bis 10:10 UTC durch. Eine an Bord betriebene Rosemount model 858 AJ air velocity probe liefert in-situ Messungen der horizontalen und vertikalen Windvektoren  $u$ ,  $v$  und  $w$  mit einer zeitlichen Auflösung von 1 s. Vertikalprofile von Windrichtung und -geschwindigkeit wurden südöstlich von Berlin gegen 8:40 UTC und am Tempelhofer Feld gegen 9:30 UTC gemessen.

### VALR03

#### TP6 - FZJiek8

Räumliche Verteilungen des Windes wurden mit einem auf dem MobiLab installierten Sensor Vaisala WXT 520 im Umland von Stuttgart und in der Stuttgarter Innenstadt erfasst. Die Messungen erfolgten mit Sekundenauflösung in 2 m ü.G.. Für die mobilen Messungen wurde der tatsächliche Wind aus dem gemessenen Wind und der Fahrzeugbewegung ermittelt.

#### TP7 – KITimktro

Das KIT beteiligte sich an den IOPs in Stuttgart mit Lidar-Geräten. Das Windlidar Windcube

(WLS 8, Leosphere) stand im Stadtzentrum auf dem Dach des Rathauses (cityhall, 275 m ü.G.). Es führte Plan-Position-Indicator (PPI) Scans bei einem Elevationswinkel von 75° durch, aus denen die vertikalen Profile des Horizontalwindes mithilfe des VAD-Algorithmus bis in eine Höhe von 600 m über dem Gerät ermittelt wurden. Die vertikale Auflösung der Windprofile beträgt 20 m und die zeitliche Auflösung 10 min.

#### TP7 – KITimkifu

Drei Windlidar-Geräte standen auf drei Dächern im Stuttgarter Zentrum. Die vertikalen Profile des Horizontalwinds wurden von 290 m bis 1250 m ü.G. mit einer vertikalen Auflösung von 20 m erfasst. Die zeitliche Auflösung von Datensätzen beträgt 30 min.

#### TP8 – Usifk

Die mobilen Messungen von Windgeschwindigkeit und -richtung wurden anhand des auf einem Fahrrad installierten Sensors GMX-501 in 2 m ü.G. in der Stadt und Umland durchgeführt (cityusgfw).

#### TP11 – DWD/DWDku1

Fünf LTO-Bodenstationen waren während der dritten Evaluierungsepisode in Betrieb (nesenbachtal, boehmoechr, mschnarren, airportstr, marienpl). Sie lieferten Mittelwerte der Windgeschwindigkeit und -richtung über 10 Minuten in 2 m ü.G.. Die Aufstiege der operationellen Radiosonden des DWD erfolgten am Schnarrenberg um 0:00, 6:00, 12:00 und 18:00 UTC (mschnarren). Windmessungen mit Sodar erfolgten bis 300 m ü.G. an der Station 'nesenbachtal'.

#### TP12 – LUHimuk

Die vertikalen Profile der Windgeschwindigkeit und -richtung wurden mithilfe des Hexkoptersystems aus DJI Flamewheel 550 und der Radiosonde DFM-06 von GRAW im Nesenbachtal (nesenbachtal) erfasst. Die Aufstiege erfolgten mit einer Steiggeschwindigkeit von ca. 2 m/s, um bei einer Sondenmessfrequenz von 2 Hz ungefähr einen Messwert pro Höhenmeter zu erhalten. Zur Erhebung der Winddaten wurde wie bereits zur Validierungsepisode VAL01 die "Verdriftungsmethode" während stündlich stattfindender Aufstiege angewandt. Die maximale Messhöhe betrug 300 m ü.G.. Vor dem Upload der Daten auf das DMS wurden fehlerhafte Messwerte aller Parameter entfernt.

## VALR04

TP6 - FZJiek8

(siehe VALR03)

TP7 – KITimktro

Während dieser Episode waren vier Windlidare in Betrieb. Das Windlidar Windcube (WLS 8, Leosphere) stand im Stadtzentrum (siehe VALR03). Die drei Lidargeräte WSL200 waren an den Hängen des Neckartals positioniert und bildeten ein Dreieck. Sie führten koordinierte, synchronisierte Range Height Indicator (RHI) Scans in Richtung der Feuerwache durch (bcfw, 222 m ü.G.). Mit Hilfe der ‚virtual-tower‘-Technik (Calhoun et al., 2006) wurden über der Feuerwache die Vertikalprofile des Horizontalwindes bis 1500 m ü.G. erfasst. Die vertikale Auflösung der Windprofile beträgt 45 m, die zeitliche Auflösung 1 s.

TP7 – KITimkifu

Drei Windlidargeräte des Typs Streamline vom Hersteller Halo Photonics standen an drei Standorten: Zentrum von Stuttgart (Amt für Umweltschutz), Zusammenfluss von Neckar- und Nesenbachtal (Feuerwache Bad Cannstatt, bcfw) und dem Ausfluss des Neckartals (Klärwerk Mühlhausen). Die Instrumente haben im vertical-stare (Scan in nur eine Vertikalrichtung) Modus zeitlich hochaufgelöste Vertikalgeschwindigkeiten erfasst (ca. 1.5 s zeitliche Auflösung, 18 m Rangegate-Längen/30 m am Talzusammenfluss/Feuerwache). Alle 30 min wurden zwei horizontale Scans mit 60 ° Elevation durchgeführt, um Änderungen der Windrichtung als Funktion der Höhe zu messen.

TP8 – Usifk

Während dieser Episode waren die Ballonmessungen in Stuttgart am Schlossgarten positioniert. Die Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit und -richtung wurden mit dem Vaisala DigiCORA Tethersonden-System TT12 gemessenen (cityusgfw). Die maximale Messhöhe betrug 238 m ü.G.

TP11 – DWD/DWDku1

Sieben LTO-Bodenstationen lieferten Zeitreihen von Windgeschwindigkeit und -richtung in 2 m ü.G. mit einer zeitlichen Auflösung von 10 min (nesenbachtal, boehmoechr, mschnarren,

airportstr, marienpl, erwschoettpl, leonberg). Die Aufstiege der Radiosonden erfolgten am Schnarrenberg um 0:00, 6:00, 12:00 und 18:00 UTC sowie am Südheimer Platz um 8:00, 12:00, 16:00, 20:00 und 24:00 UTC (suedheimerpl). Fesselsondenaufstiege wurden ungefähr zu jeder Stunde am Reitstation durchgeführt (bcreitstad). Windmessungen mit Sodar erfolgten bis 300 m ü.G. im Nesenbachtal (nesenbachtal).

TP12 – LUHimuk

(sieheVALR03, Unterschied: Zusätzlicher Standort am Marienplatz (marienpl))

TP14 – DLRpa

Die DLR Cessna führte an zwei Tagen jeweils zwei Flüge ausgehend von Oberpfaffenhofen mit einer Zwischenlandung in Stuttgart durch. Eine an Bord betriebene Rosemount model 858 AJ air velocity probe lieferte in-situ Messungen der horizontalen und vertikalen Windvektoren u, v und w in einer zeitlichen Auflösung von 1 s.

## VALR05

Der Fokus der Messungen für Hamburg liegt auf dem Windfeld innerhalb der Stadt, wozu verschiedene LTOs und IOPs durchgeführt wurden. Im Sommer und Winter 2017/18 wurden insgesamt vier IOPs (-1 bis -4) in der HafenCity Hamburg realisiert, die innerhalb des idealisierten Modellgebiets von VALM05 liegen.

Vor dem Gebäude der HafenCity Universität wurden entlang der Überseeallee sechs Windmessmasten (ueberseeallee) mit jeweils einer Höhe von 6 m installiert. An jedem Messmast wurde die Windgeschwindigkeit und -richtung mit einer zeitlichen Auflösung von 20 Hz mittels METEK 3D-Ultraschallanemometer in 3.25 m sowie 6.75 m ü.G. erfasst.

Zusätzlich wurden während IOP-1 und IOP-3 vom Dach der HafenCity Universität Fesselballonaufstiege durchgeführt. Der Wind vor dem Gebäude wurde an einem 30 m hohen Profilmast (baakenhoeft) mithilfe von Ultraschallanemometern in fünf Höhen zwischen 2.5 m und 31 m ü.G. gemessen.

Als großräumige Windrichtung werden die Windmessungen aus 50 m ü.G. des Wettermasts Hamburg, der etwa 7 km östlich der HafenCity liegt, genutzt.



Die Langzeitbeobachtungen zur Evaluierung des Modells werden am 300 m hohen Wettermast (weathermast) Hamburg sowie an den zehn Wetterstationen, die über die Stadt verteilt sind, erfasst.

### 3.4 Strahlung und Wolken (A. Holtmann)

#### 3.4.1 Strahlung

Zu den zu validierenden Strahlungsgrößen zählen die vier Komponenten der Strahlungsbilanz ( $r_{sd}$ ,  $r_{su}$ ,  $r_{ld}$ ,  $r_{lu}$ ). Die Globalstrahlung  $r_{sd}$  setzt sich zusammen aus der direkten kurzwelligigen Strahlung  $r_{sddir}$  und der diffusen kurzwelligigen Strahlung ( $r_{sddif}$ ). Innerhalb des Gebäudebestandes können durch den zeitlichen Verlauf von  $r_{sd}$  die Schattenwürfe von Objekten validiert werden. Die reflektierte Strahlung hängt in erster Linie von der parametrisierten Oberflächenalbedo ab. Die langwellige Ausstrahlung von Oberflächen wird durch ihre Oberflächentemperatur bestimmt. Daher können Messungen der langwelligen Ausstrahlung auch für die Validierung der Oberflächentemperaturen (bei vorgegebener Emissivität) verwendet werden.

#### Berlin

In Berlin wurden umfangreiche Strahlungsmessungen während der vier IOPs und an den LTO-Standorten durchgeführt. Die gesamtstädtische Verteilung von Strahlungsmessungen ist in Abbildung 3.4.1 zu sehen.

Es kamen unterschiedliche Messprinzipien und Messplattformen zum Einsatz. Neben den stationären Messungen wurden auch mobile Messungen durchgeführt. Zudem wurde die langwellige Ausstrahlung von städtischen Oberflächen mit Hilfe von Thermalbildkameras erfasst.

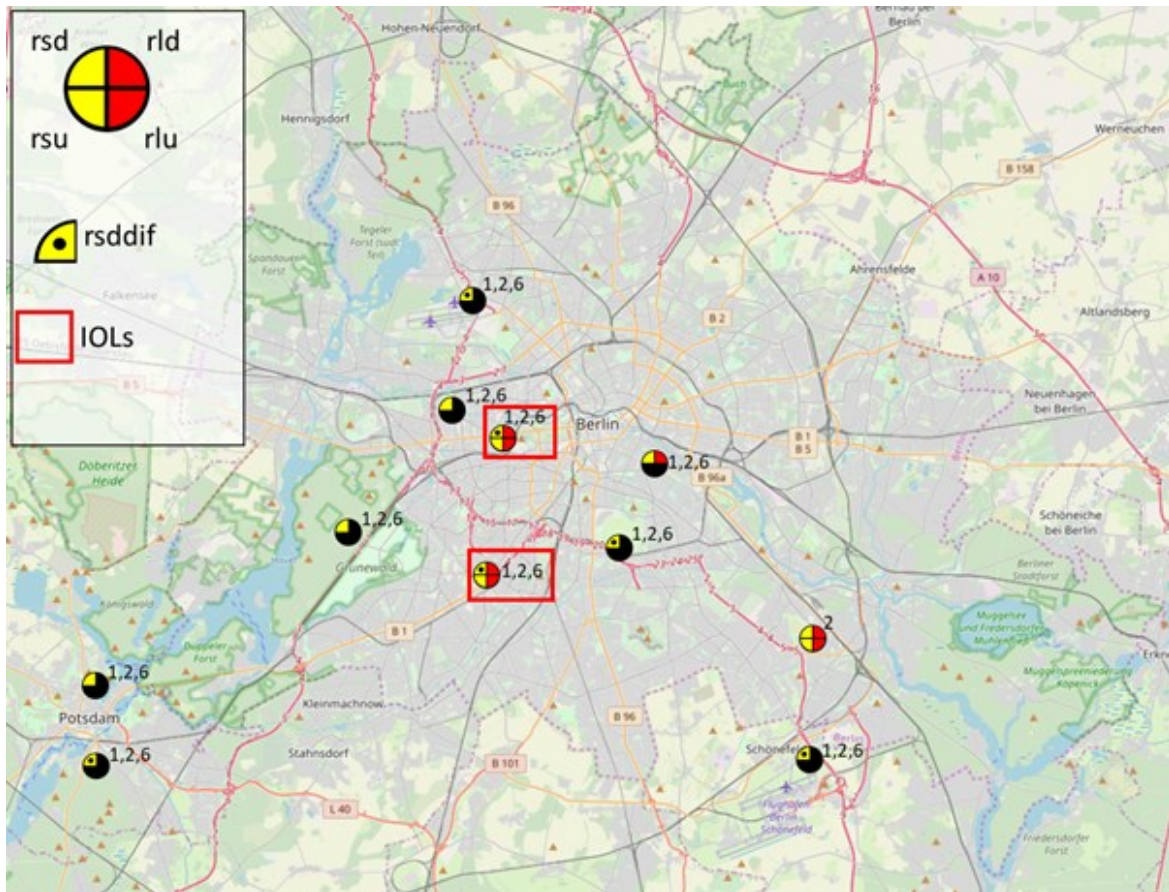


Abb. 3.4.1: Standorte von stationären Strahlungsmessungen in Berlin während der Evaluierungszeiträume VALM01 und VALM02. Die Kreissegmente stehen für: Globalstrahlung (rsd), diffuse kurzwellige Strahlung (rsddif), kurzwellige Strahlung von unten (rsu), langwellige Strahlung von oben (rld) und langwellige Strahlung von unten (rlu). Die Zahlen an den Symbolen geben an, in welchen der Validierungszeiträume die Daten verfügbar sind. Schwarz markierte Kreissegmente bedeuten keine Messung / Bestimmung der jeweiligen Strahlungskomponente. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

Die Standorte der Strahlungsmessungen und Thermalbildkameras innerhalb der IOL TUB Campus Charlottenburg während der Berliner Validierungszeiträume sind in Abbildung 3.4.2 zu sehen. Zur Erfassung der räumlichen und zeitlichen Variabilität wurden hochaufgelöste Messungen kurz- und langwelliger Strahlungsflüsse durchgeführt.

Über dem Gebäude- und Vegetationsbestand wurden Messdaten erhoben, die als ungestörte Referenz dienen können, mit der Normierungen bzw. relative Angaben weiterer Strahlungsmessungen möglich sind. Der entsprechende Standort befindet sich 10 m über dem Dach des TUB Hauptgebäudes. Die Beeinflussung der Strahlungsflüsse durch Gebäude und Vegetation wird durch eine Vielzahl von Messungen innerhalb des Bestandes erfasst. Diese Daten können genutzt werden, um das Strahlungstransfermodul von PALM-4U einerseits und andererseits die modellierten Oberflächentemperaturen sowie die damit verbundene langwellige Ausstrahlung zu validieren.

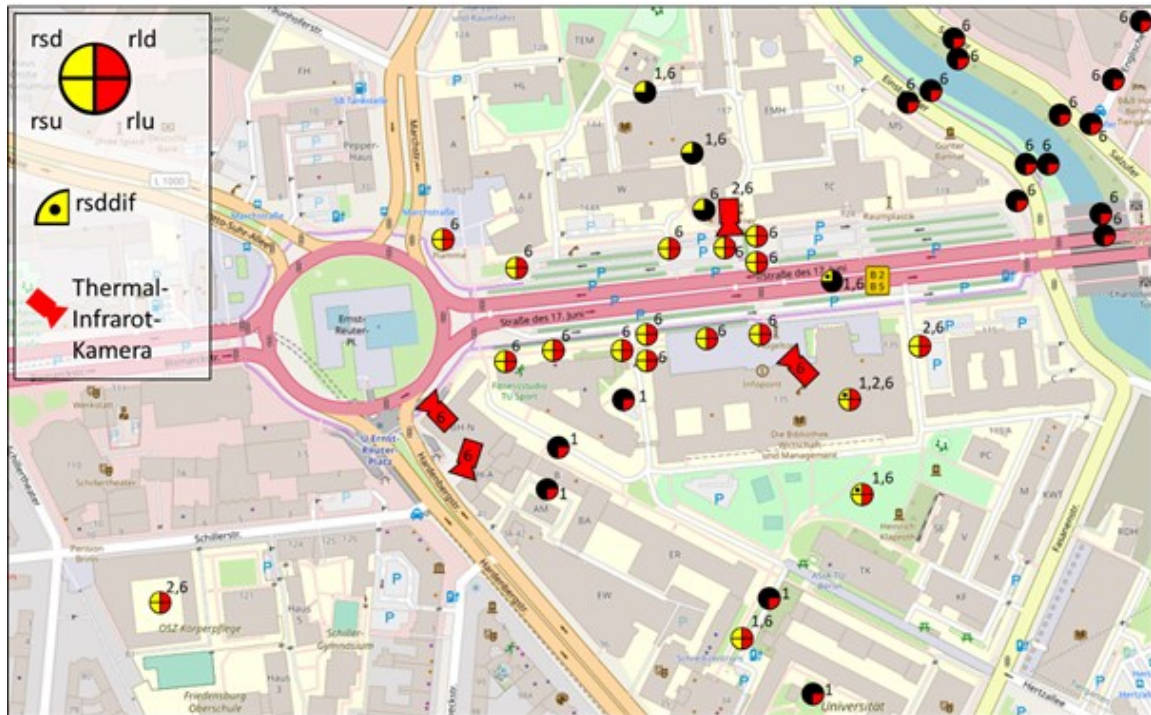


Abb. 3.4.2: Standorte von stationären Strahlungsmessungen in der IOL TUB Campus Charlottenburg während der Validierungszeiträume VALM01 und VALM02. Die Kreissegmente stehen für: Globalstrahlung (rsd), diffuse kurzwellige Strahlung (rsddif), kurzwellige Strahlung von unten (rsu), langwellige Strahlung von oben (rld) und langwellige Strahlung von unten (rlu). Die Zahlen an den Symbolen geben an, in welchen der Validierungszeiträume die Daten verfügbar sind. Schwarz markierte Kreissegmente bedeuten keine Messung / Bestimmung der jeweiligen Strahlungskomponente. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

Die Orte der mobilen Messungen der TUDD sind in Abbildung 3.6.1. zu sehen und umfassen kurz- und langwellige Strahlungsflüsse aus unterschiedlichen Raumrichtungen und die daraus abgeleitete mittlere Strahlungstemperatur ( $t_{mrt}$ ).

## Stuttgart

Die Standorte der Strahlungsmessungen in Stuttgart sind in Abbildung 3.4.3 dargestellt.

Im Nesenbachtal sowie am Schnarrenberg wurden Strahlungsmessungen an Klimastationen des DWD durchgeführt. Am Neckar östlich der Stuttgarter Innenstadt wurden außerdem die vier Komponenten der Strahlungsbilanz bei Fesselballonaufstiegen gemessen.

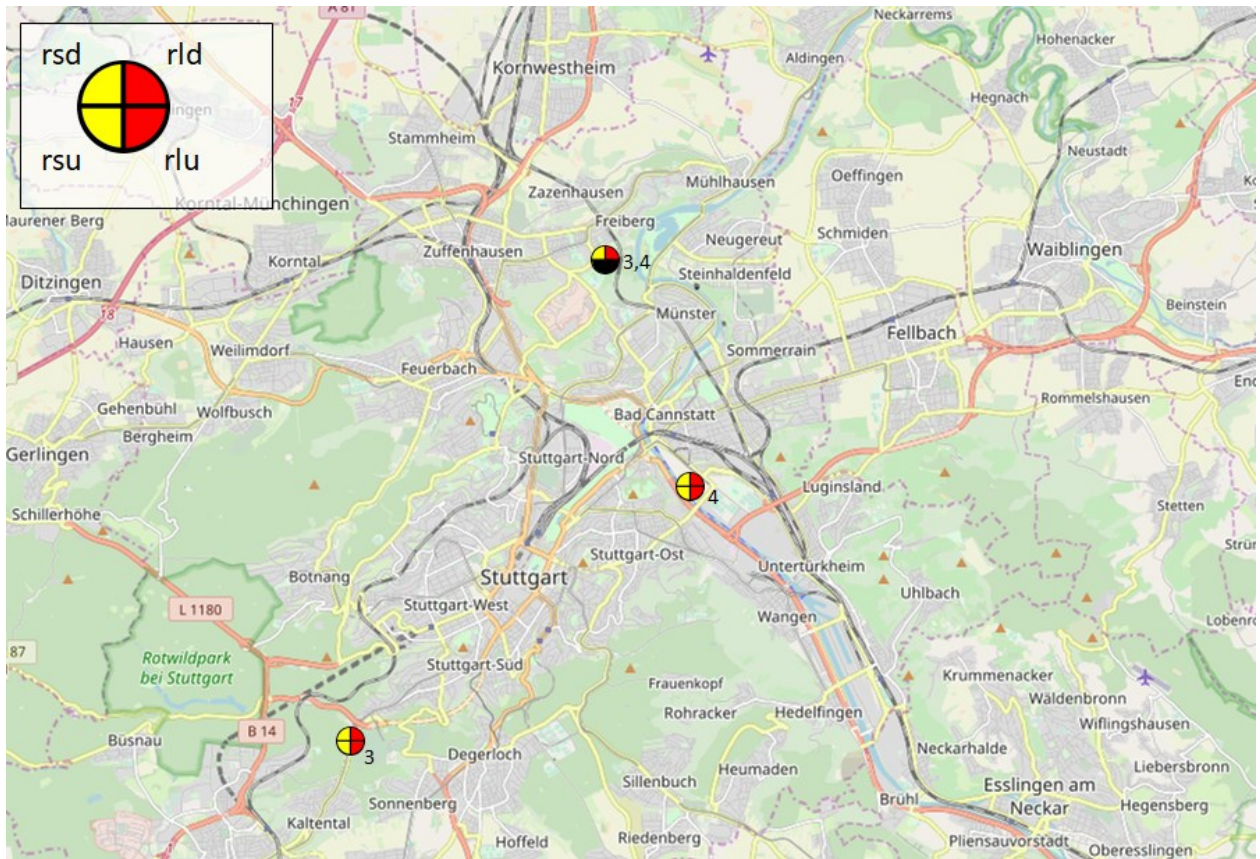


Abb. 3.4.3: Standorte von stationären Strahlungsmessungen in Stuttgart während der Validierungszeiträume VALM03 und VALM04. Die Kreissegmente stehen für: Globalstrahlung (rsd), kurzwellige Strahlung von unten (rsu), langwellige Strahlung von oben (rld) und langwellige Strahlung von unten (rlu). Die Zahlen an den Symbolen geben an, in welchen der Validierungszeiträume die Daten verfügbar sind. Schwarz markierte Kreissegmente bedeuten keine Messung der jeweiligen Strahlungskomponente. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

Die Zahlen an den Symbolen geben an, in welchen der Validierungszeiträume die Daten verfügbar sind.

### 3.4.2 Wolken

Da für die Validierung PALM-4U-Simulationen bei wolkenfreien Bedingungen durchgeführt wurden, haben Messungen zur Bewölkung (Bedeckungsgrad, Wolkenhöhe o.ä.) keine Relevanz für die Validierung selbst, wohl aber zur Charakterisierung des Validierungszeitraums. Zeiträume mit nennenswerter Bewölkung wurden daher vom Vergleich von Modell- mit Observierungsdaten ausgeschlossen, sofern die entsprechende Variable von der Bewölkung beeinflusst ist wie z. B. die Globalstrahlung.

An mehreren Klimastationen in Berlin und Stuttgart wird vom DWD der Bewölkungsgrad sowie die Sonnenscheindauer gemessen. In Berlin kommen zusätzlich drei Ceilometer (betrieben von FUBmeteo und TUBklima) zum Einsatz, die eine zeitlich und vertikal hochaufgelöste Beschreibung der Bewölkung zulassen. In Stuttgart betreibt KITimktro ein

HATPRO Mikrowellenradiometer, mit dem sich Wolkenhöhe und -temperatur bestimmen lassen. Außerdem wurden von KITimkifu während VALR03 Ceilometermessungen zur Wolkenbedeckung und -höhe gemacht.

Abbildung 3.4.4 zeigt beispielhaft anhand von Ceilometermessungen in Berlin das Einsetzen von Nebel / tiefen Wolken in den Nachtstunden von VALR01.

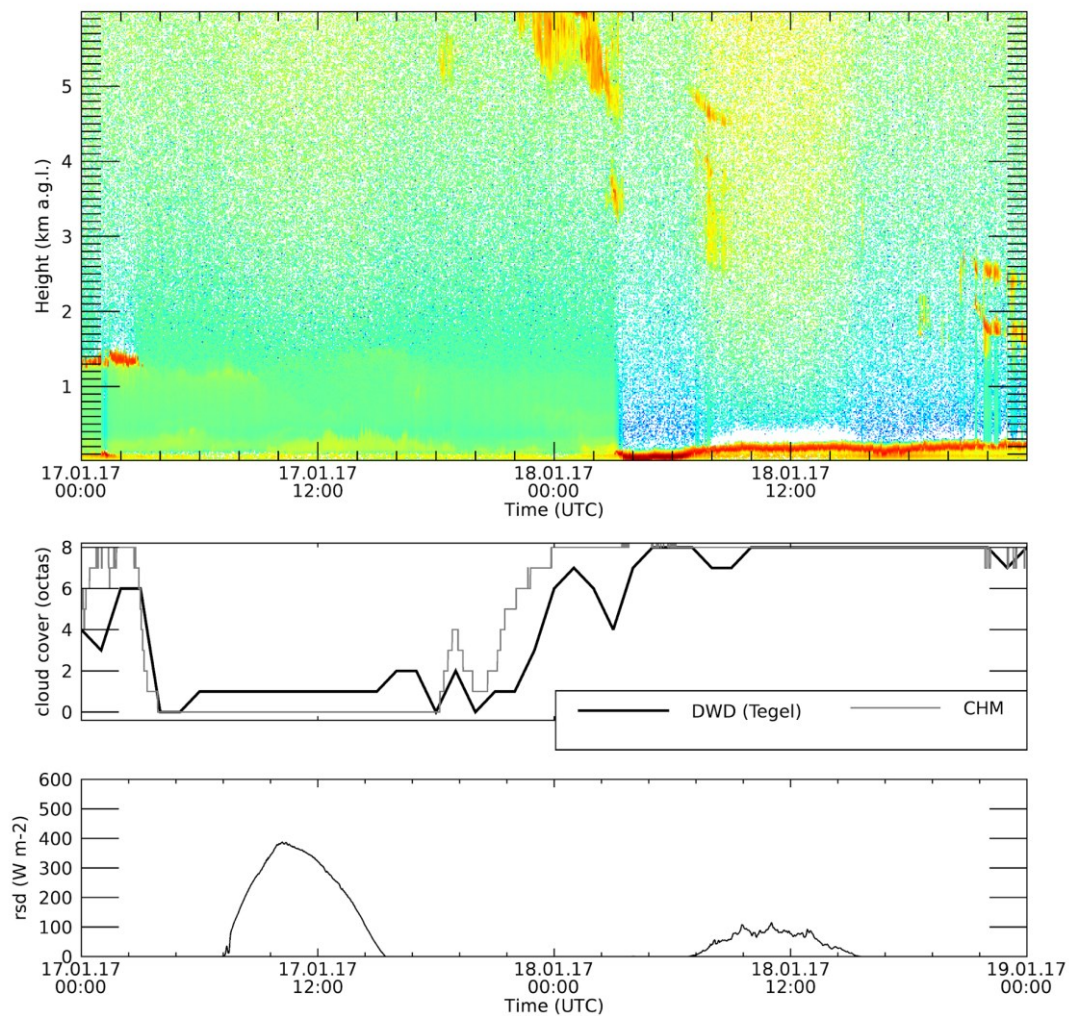


Abb. 3.4.4: Zeitlicher Verlauf von Aerosolbackscatterprofilen (oben), Wolkenbedeckungsgrad (Mitte) und Globalstrahlung (unten) am Standort tumainroof. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima).

### 3.5 Turbulenz und Eddy-Kovarianz (F. Ament, A. Hansen)

Die explizite Auflösung von großen Wirbeln und Gebäuden durch das neue PALM-4U Modell ermöglicht die Untersuchung von kleinräumigen, turbulenten Prozessen im städtischen Umfeld. Somit können unter anderem Windböen, die oftmals um bis zu Faktor zwei stärker als der mittlere Wind sein können, an Gebäuden sowie in Straßenschluchten analysiert werden. Dies ermöglicht detaillierte Auswertungen z. B. in Bezug auf den Windkomfort in

Städten bis hin zu sicherheitsrelevanten Aspekten durch bspw. zu starke Windböen an Häuserecken.

Zahlreiche LTOs sowie Messdaten im Rahmen von IOPs wurden für die Evaluierung der Turbulenz sowie der Flüsse in den Simulationen (VALM01-06) des PALM-4U Modells erhoben. Der Fokus der Messungen und Simulationen für Hamburg liegt auf dem Windfeld sowie der Turbulenz innerhalb des städtischen Umfelds. Im Sommer und Winter 2017/18 wurden hierfür insgesamt vier IOPs -1 bis -4 in der IOL Hamburg HafenCity realisiert, die innerhalb des idealisierten Modellgebiets von VALM05 liegen. Die IOPs wurden genutzt, um einen detaillierten Einblick in die kleinräumige Variabilität des Windes im städtischen Umfeld zu erhalten und die Turbulenz des PALM-4U Modells zu evaluieren. Zur statistischen Auswertung der Turbulenz der idealisierten VALM05 Simulation wird eine ausreichend große Datengrundlage benötigt, wofür die vier IOPs (VALR05) aus den zwei unterschiedlichen Jahreszeiten und Jahren zusammengefasst betrachtet werden.

Vor dem Gebäude der HafenCity Universität wurden entlang der Überseeallee sechs Windmessmasten mit jeweils einer Höhe von 6 m installiert. An jedem Messmast wurde die Windgeschwindigkeit und -richtung mit einer zeitlichen Auflösung von 20 Hz mittels METEK 3D-Ultraschallanemometer in 3.25 sowie 6.75 m ü.G. erfasst (Abb. 3.5.1). Zusätzlich wurden, während der ersten und dritten IOP Profile der Temperatur, Luftfeuchtigkeit und des Windes vom Dach der HafenCity Universität mittels Fesselballons aufgezeichnet, um so Eingangsdaten für die PALM-4U Simulationen zu erhalten. Der Wind vor dem Gebäude wurde an einem 30 m hohen Profilmast mit Hilfe von Ultraschallanemometern mit bis zu 10 Hz Messfrequenz in fünf Höhen zwischen 2.5 und 31 m ü.G. gemessen. Während der vier IOPs gab es zahlreiche weitere stationäre und mobile Messungen wie bspw. PM2.5 Feinstaubmessungen, die in erweiterten PALM-4U Simulationen zur Bewertung neuer Module genutzt werden können.



Abb. 3.5.1: Messaufbau während der IOPs entlang der Überseeallee vor dem Gebäude der HafenCity Universität, Hamburg. Quelle: UHHmeteo, Kartengrundlage: Google Earth.

Als großräumige Windrichtung werden die Windmessungen in 50 m ü.G. des Wettermast Hamburgs, der etwa 7 km östlich der Hamburg HafenCity liegt, genutzt. Diese Windrichtung wird für die PALM-4U Simulationen vorgegeben. Die Verteilungen der Windgeschwindigkeit und -richtung für die vier IOPs sind in Abbildung 3.5.2 dargestellt. Die Information zur großräumigen Windrichtung ist insbesondere zur Untersuchung der Veränderungen des Windfeldes durch das HafenCity Gebäude von großem Wert.

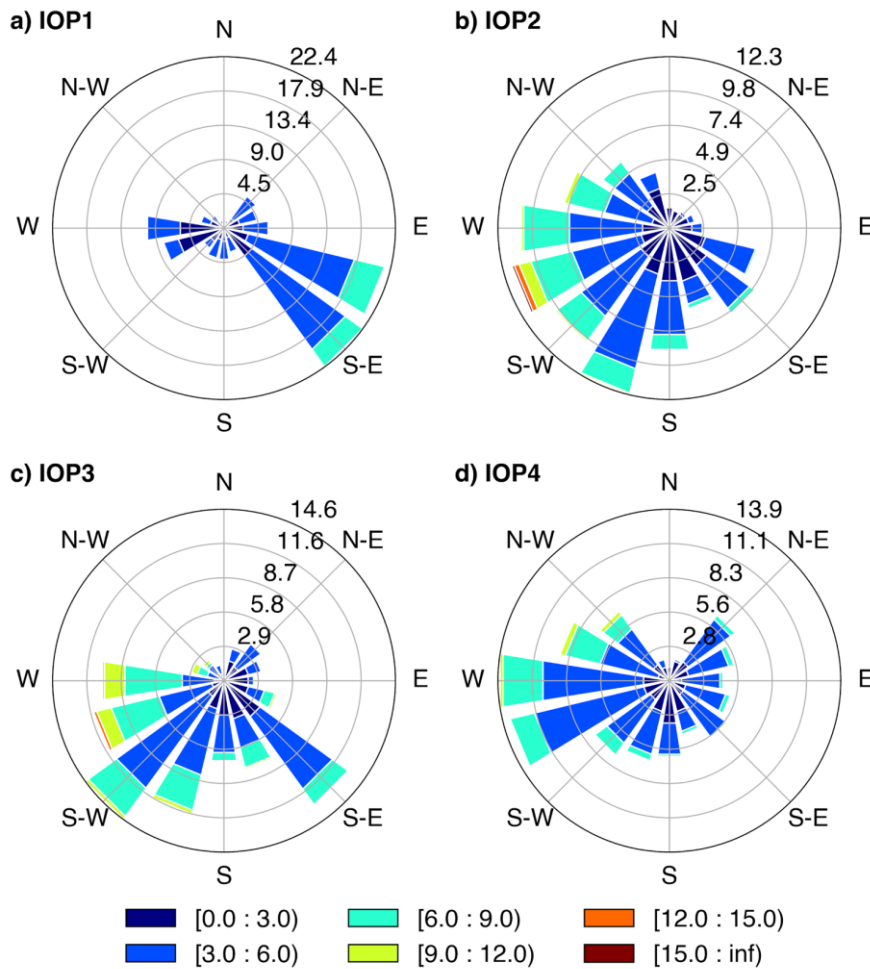


Abb. 3.5.2: Histogramme der Windgeschwindigkeit und -richtung der 50 m ü.G. Windmessung am Wettermast Hamburg für IOP-1 (a), IOP-2 (b), IOP-3 (c) und IOP-4 (d). Alle Histogramme sind jeweils normiert. Quelle: Felix Ament (UHHmeteo).

Die Flüsse des PALM-4U Modells können unter Einbeziehung der Eddy-Kovarianz Langzeitmessungen in Hamburg Stellingen und weiterer Simulationen evaluiert werden. Zusätzliche Langzeitbeobachtungen für die Untersuchung des PALM-4U Modells werden am 300 m hohen Wettermast Hamburg sowie an zehn Wetterstationen im Hamburger Stadtgebiet erfasst (Abb. 3.5.3). Die räumlich verteilten Messungen sowie die Daten des Hamburger Wettermastes können zur Erstellung von Anfangsdaten für PALM-4U als auch zur Einordnung der Daten in den größeren Kontext herangezogen werden.



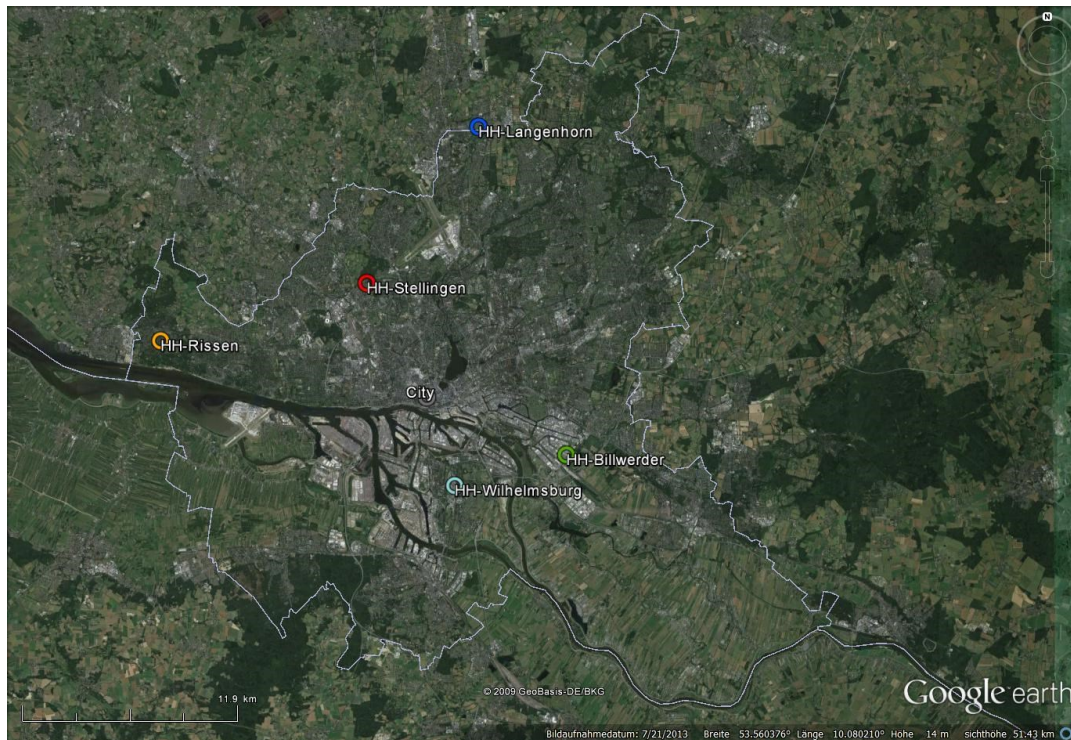


Abb. 3.5.3: Standorte der Wetterstationen im Hamburger Stadtgebiet. Quelle: UHHmeteo, Kartengrundlage: Google Earth.

### Gründach Eddy-Kovarianzmessungen am Flughafen BER (S. Weber)

Für die Evaluierung des Gründachmoduls von PALM-4U stand ein Langzeitdatensatz zur Verfügung, der mittels Eddy-Kovarianz seit Juli 2014 auf einem extensiven Gründach am Flughafen BER erhoben wird (Abb. 3.5.4). Die untersuchte, extensive Begrünung befindet sich auf dem Dach des Parkhauses P7 ( $52.3670^\circ\text{N}$ ,  $13.5132^\circ\text{E}$ ). Die Eddy-Kovarianzmethodik wurde hier eingesetzt, um Erkenntnisse zum Oberfläche-Atmosphäre-Austausch des Gründaches, d. h. sensible sowie latente Wärmeflüsse und  $\text{CO}_2$ -Flüsse zu gewinnen. Sensible und latente Wärmeflüsse sind bedeutende Größen für das Stadtklima, da sie darüber bestimmen, inwiefern Oberflächen zur Erwärmung oder Abkühlung der oberflächennahen Luftschichten beitragen. Durch die Größe des Gründaches von  $8600\text{ m}^2$ , eine niedrige Messhöhe von  $1,15\text{ m}$  über Dachniveau und der Ausrichtung des Daches entlang der Hauptwindrichtungen ist für die meisten Situationen und insbesondere tagsüber sichergestellt, dass die gemessenen Flüsse das Gründach repräsentieren. Der Messaufbau, die Messungen und die hieraus gewonnenen Erkenntnisse wurden in mehreren Artikeln in internationalen Fachzeitschriften detailliert beschrieben (Heusinger und Weber, 2017a; Heusinger und Weber, 2017b; Konopka et al., 2021 ). Der mehrjährige Datensatz erlaubt sowohl die Untersuchung von saisonalen, als auch interannuellen Unterschieden der Austauschflüsse. Dies ist u.a. wichtig, um den Einfluss von Trockenperioden, die im Sommer 2018 besonders deutlich auftraten, charakterisieren zu können. Weiterhin können hierdurch

zeitliche Ausschnitte bestimmt und gewählt werden, die den mittleren Zustand des Gründaches für eine Saison repräsentieren. Dies ist für die Evaluierung von PALM-4U von Bedeutung (s. Kap. 2.3), da hier auf Grund der Rechenanforderungen im Allgemeinen lediglich 24 bis 48 Stunden simuliert werden können.

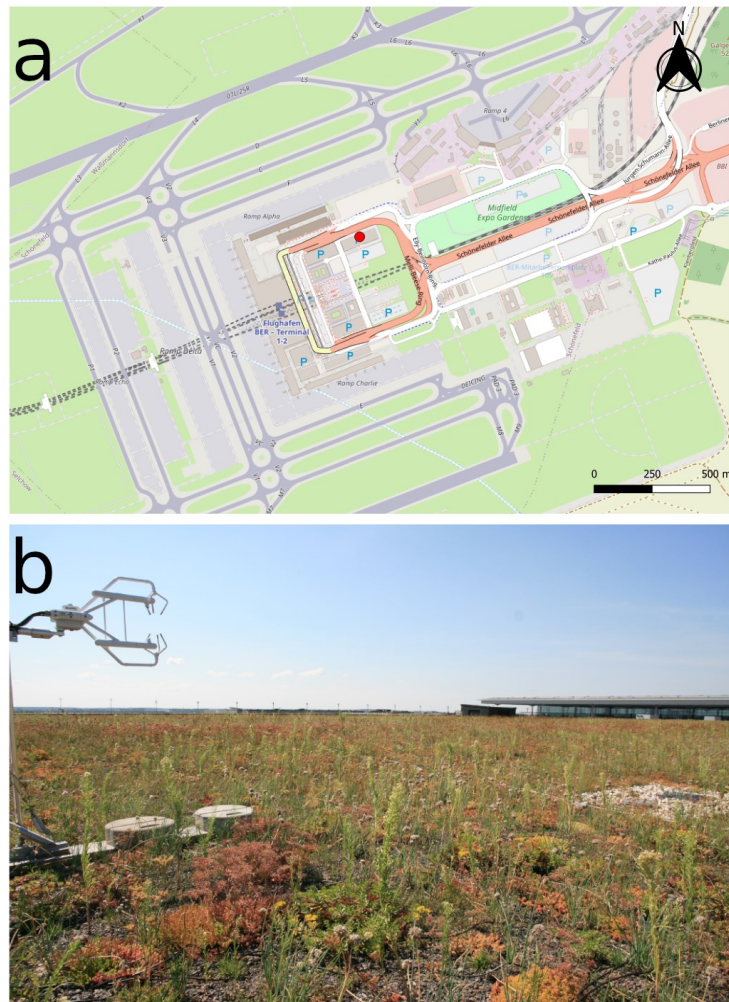


Abb. 3.5.4: (a) Geographische Lage des Messtandortes am Flughafen BER, der Messtandort ist mit einem roten Punkt markiert. Quelle: Jannik Heusinger, Kartengrundlage: OpenStreetMap. (b) Gründach Aufnahme am Flughafen BER vom 22.07.2014 mit Eddy-Kovarianz Messgeräten, die in 1,15 m Höhe installiert waren. Quelle: Jannik Heusinger (TUBSgeo).

### 3.6 Thermischer Wirkungskomplex (R. Queck)

#### Datenauswahl für die Bestimmung thermischer Belastungsindizes

Die thermischen Umgebungsbedingungen für Stadtbewohner werden durch die folgenden meteorologischen Größen gekennzeichnet: kurz- und langwellige Einstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchte und Wind. Aus diesen Größen können mit Annahmen für

metabolische Wärmeerzeugung und Bekleidung verschiedene thermische Belastungsmaße berechnet werden. In PALM-4U werden vom Biomet-Modul u.a. die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET), die Gefühlte Temperatur (PT) und der Universelle Thermische Klimaindex (UTCI) aus den simulierten meteorologischen Bedingungen berechnet.

In allen LTOs und IOPs wurde eine große Zahl an Datensätzen gewonnen, die die einzelnen genannten meteorologischen Größen enthalten. Sie sind bereits in den Abschnitten 3.2 bis 3.4 aufgeführt. Mit diesen Daten kann die Simulation der einzelnen Eingangsgrößen für die thermischen Belastungsindizes an vielen Punkten in allen Validierungsläufen überprüft werden. Dieser Abschnitt hier konzentriert sich daher auf Referenzdatensätze für die Evaluierung des PALM-4U Biomet-Moduls. Es wurden nur Datensätze ausgewählt, die eine unabhängige Bestimmung der thermischen Indizes aus der 'Energiebilanz'-Klasse erlauben, d. h., es sollten an einem Ort zeitgleich die folgenden Größen erfasst worden sein: Strahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchte und Wind.

Die Berechnung der thermischen Indizes erfolgt für alle Datensätze mit den gleichen Programmen, um Unterschiede durch abweichende Berechnung auszuschließen. Die Überprüfung der Berechnungsalgorithmen steht in engem Zusammenhang mit der Verifikation des PALM-4U Biomet-Moduls.

### Datensätze

Die vorliegenden Datensätze können in zwei Gruppen unterteilt werden: ortsfeste Stationsmessungen und mobile Messungen. Beide haben Vor- und Nachteile für die Bestimmung des thermischen Wirkungskomplexes und die Evaluation der Simulationsergebnisse.

Die Zeitreihen aus ortsfesten Stationsmessungen erlauben die Berechnung statistischer Parameter für quasistationäre Zeiträume. Da auch PALM-4U mit einem ortsfesten Gitter arbeitet, lassen sich die Simulationen gut mit den Stationsmessungen vergleichen. Sie bilden sozusagen Stützstellen im Raum. Für die Bestimmung der thermischen Belastung eines Stadtbewohners liefern diese ausgewählten Punkte jedoch ein unrealistisches Bild. Die thermische Belastung setzt sich vielmehr aus den Bedingungen an vielen Aufenthaltsorten zusammen, die durch mobile Messung deutlich besser erfasst werden. Um diese Charakteristik im Modell zu simulieren, wurde für PALM-4U ein Multi-Agent-System entwickelt.

Der Vergleich von Ergebnissen der Simulation und mobilen Messungen in der städtischen turbulenten Grenzschicht gestaltet sich jedoch deutlich schwieriger als der Vergleich mit

stationären Messungen. Da sich Zeitreihen instantaner Größen in der turbulenten Strömung nie gleichen, müssen die Messdaten und PALM-4U Simulationen für den Vergleich gemittelt werden. Nur unter bestimmten Annahmen (z. B. quasistationäre Strömung) können die mobilen Messungen über Bereiche mit ähnlichen Umweltbedingungen räumlich gemittelt werden.

Alle Validierungsläufe für den thermischen Wirkungskomplex können somit durch Messungen überprüft werden. Abbildung 3.6.1 und 3.6.2 geben die Lage der Stationen an. Wie oben erwähnt, stehen für alle Validierungsläufe weiterhin eine große Zahl von mobilen und stationären Messungen einzelner Eingangsgrößen für die Evaluation zur Verfügung, sodass sich eine höhere Gebietsabdeckung ergibt. Um Redundanzen zu vermeiden, werden diese hier aber nicht mit abgebildet.

Eine Übersicht der Datensätze zur Evaluierung von PALM-4U in Bezug auf den thermischen Wirkungskomplex befindet sich im Annex 2 (Abkürzungen und Bezeichnungen beziehen sich auf den [UC]<sup>2</sup>-Datenstandard (Scherer et al., 2019c).

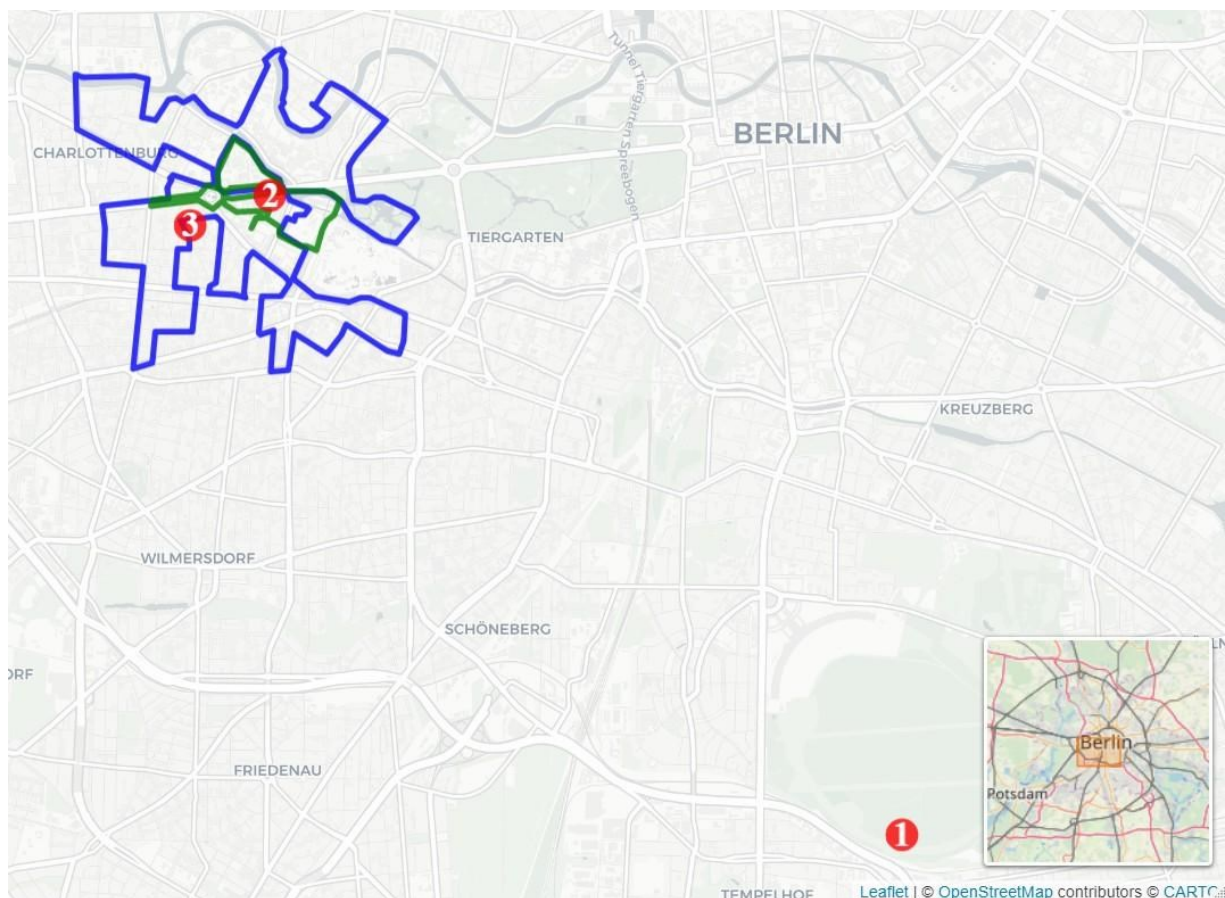


Abb. 3.6.1: Standorte der biometeorologischen Messstationen in Berlin während der VALM02 (rote Kreise, 1: airportthf; in IOL 'TUB Campus Charlottenburg': 2: tuchembuild, 3: schillerosz), Messstrecken der mobilen Plattformen (blaue Linie: Fahrrad, grüne Linie: Rucksack; charlottenb). Quelle: Ronald Queck (TUDDmeteo); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

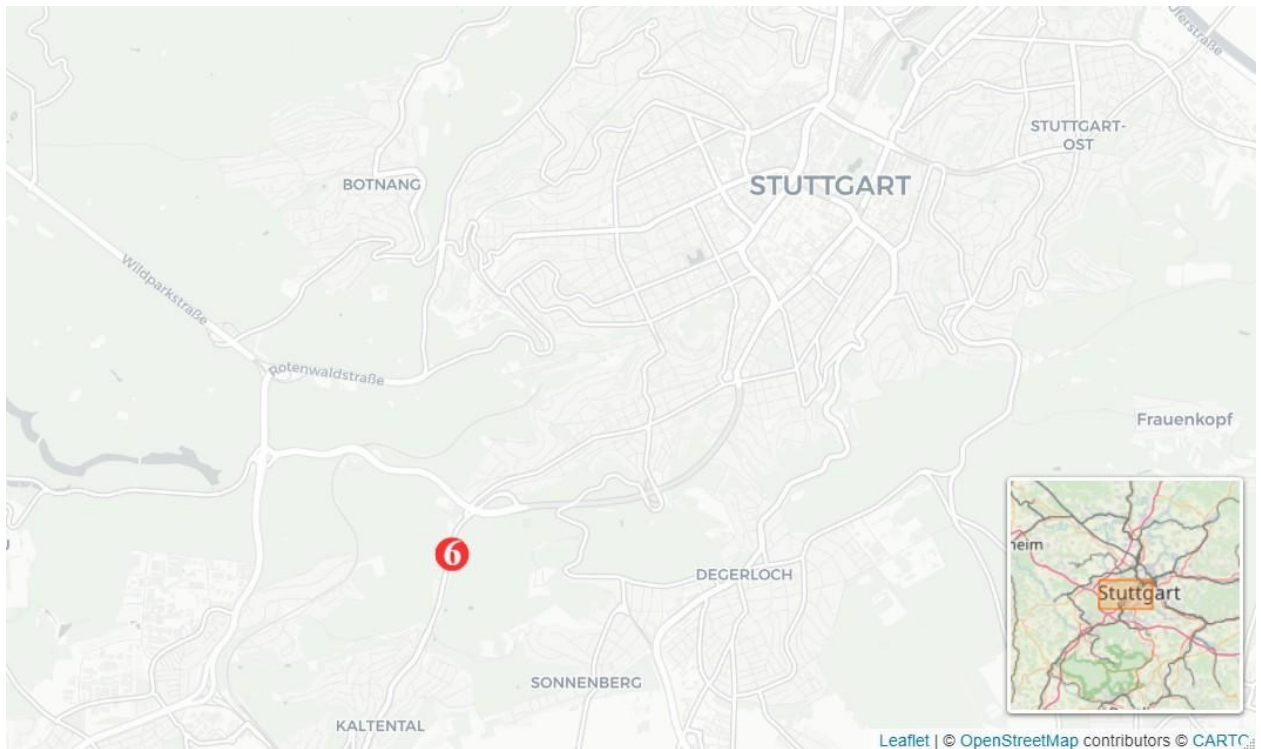


Abb. 3.6.2: Standort der biometeorologischen Messstation in Stuttgart (nesenbachtal) während der Validierungszeiträume VALM03 und VALM04. Quelle: Ronald Queck (TUDDmeteo); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

## Beschreibung der Messungen

### Stationsmessungen

Das Ziel dieser ortsfesten Messungen war es, alle meteorologischen Größen zur Berechnung der human-biometeorologischen Indizes auf Basis der Wärmehaushaltsgleichung möglichst genau zu erfassen. Der Charakter der Standorte umfasst 'geometrisch einfache' Umgebungen, wie den Schulhof des Oberstufenzentrums Körperpflege in Berlin (schillerosz, Abb. 3.6.3) oder das Tempelhofer Feld (airportthf, Abb. 3.6.4) sowie heterogene Umgebungen (tuchembuild, Abb. 3.6.5 links) geprägt durch den Einfluss der Vegetation und Stationen, die eher die Hintergrundbelastung zeigen (nesenbachtal, Abb. 3.6.5 rechts).



Abb. 3.6.3: Biometeorologische Station der TUBklima auf dem Schulhof des Oberstufenzentrums Körperpflege in Berlin (Bildmitte) mit Thermalscanner (rechts) während einer Vergleichsmessung mit der mobilen Plattform (Rucksack) der TUDD (links). Foto: Ronald Queck (TUDDmeteo).



Abb. 3.6.4: DWD Station auf dem Tempelhofer Feld in Berlin, rechts im Vordergrund temporäre Strahlungsmessungen des DWDfelg. Foto: Ralf-Becker (DWDfelg).



Abb. 3.6.5: Links: DWDku1 Station beim Chemiegebäude der TU in Berlin. Rechts: DWDku1 Station im Nesenbachtal in Stuttgart. Fotos: DWD.

### Mobile Messungen

In Berlin wurden zwei mobile Plattformen eingesetzt, mit denen die thermische Belastung eines Fußgängers und eines Radfahrers gemessen wurde (Messrouten siehe Abb. 3.6.1, Messplattformen siehe Abb. 3.6.6; Trajektorie 'charlottenb'). Ziel dieser Messungen war es, die Einflüsse möglichst realistisch auf typischen Strecken zu erfassen. Der Verlauf der Messroute geht durch unterschiedliche Stadtbereiche (offene und dichte Bebauung sowie Parks). Damit ist es möglich, die Variabilität der thermischen Belastung im Stadtgebiet zu untersuchen. Die Aufzeichnung der Daten erfolgte mit einer Frequenz von 1 bis 0.5 Hz, sodass der Abstand der Messpunkte auf den Trajektorien kleiner als 4 m ist. Auf beiden Systemen wurden Sensoren mit einer Reaktionszeit unter einer Sekunde eingesetzt. Zeitsynchron zu den Messungen weiterhin wurden Serienfotos aufgenommen (in IOP-4 mit einer 360° Kamera), sodass Umwelteinflüsse, Umgebung und Sky-View-Faktor (Grad der Horizontüberhöhung) für jeden Messpunkt vorliegen. Für die Evaluierung von PALM-4U wäre der Einfluss von Vegetation und von Gebäudeschatten auf die thermische Belastung von großem Interesse.

### Qualitätssicherung

Zur Qualitätssicherung wurden die einzelnen Sensoren routinemäßig von den TPs überprüft und kalibriert. Für alle TPs fanden zweimal Kreuzvergleiche der Temperatur- und Feuchtesensoren in der Klimakammer der TUBklima statt (siehe Abschnitt 3.1

Vergleichsmessungen), weiterhin wurden, während der IOPs Vergleichsmessungen mit anderen TPs im Freiland durchgeführt (sogenannte Intercals, Abb. 3.6.6 zeigt ein Beispiel aus IOP-4).



Abb. 3.6.6: Vergleich zwischen den in Berlin eingesetzten mobilen Messplattformen vor dem Hauptgebäude der TU Berlin, von links nach rechts: MobiLab des FZJiek8, Messfahrräder der TUBSgeo, Rucksack und Messfahrrad der TUDDmeteo. Foto: Ronald Queck (TUDDmeteo).

Neben den vom Hersteller angegebenen Fehlerbereichen der einzelnen Sensoren müssen beim Einsatz variable Fehler beachtet werden, die von den Umgebungs- und Messbedingungen abhängig sind (z. B. Strahlungsfehler bei Temperaturmessungen). Da die Indizes aus mehreren meteorologischen Größen berechnet werden, können die Ergebnisse immer nur Messsystemen (bestehend aus mehreren Sensoren) zugeordnet werden. Aus der Kombination der Größen ergeben sich größere Fehlerbereiche, sowohl in den aus den Referenzdatensätzen abgeleiteten thermischen Indizes als auch in denen der PALM-4U Simulationen.



### 3.7 Luftchemie (S. Weber, D. Klemp, T. Erbertseder, C. Schneider)

#### 3.7.1 Feinstaub (PM10, PM2.5 und UFP)

Die LTOs für Feinstaubpartikel (PM10, PM2.5 und PM1.0) wurden im Januar 2017 in Berlin-Adlershof (Grimm EDM 107) und im Juni 2017 in Berlin-Hermsdorf (Grimm 1.109) begonnen. Die LTO in Berlin-Hermsdorf wurde während der ersten Phase von [UC]<sup>2</sup> als temporäre LTO-Station eingerichtet und wurde von Juni 2017 bis Mai 2019 betrieben. Während des Projekts wurden außerdem temporäre Stationen in der Nähe des Ernst-Reuter-Platzes (in der IOL 'TUB Campus Charlottenburg') während IOP-1, -2 und -4 und am Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin (in der IOL 'Rothenburgstraße, Steglitz') während IOP-3 und -4 eingerichtet. Diese Stationen dienten als Referenzstationen für die mobilen Messungen.

Eines der Ziele des Projektes war es, ein semi-permanentes mobiles Messsystem aufzubauen, um Messungen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung durchführen zu können. Dies wurde durch die Entwicklung der Urbmobi 3.0-Sensorbox (Abb. 3.7.1) erreicht, die die Positionsbestimmung mit GNSS ermöglicht und die Sensoren OPC-N2 (PM10, PM2.5 und PM1.0), NO-A4 (Stickoxid), NO2-A43F (Stickstoffdioxid), OX-A431 (Ozon) der Fa. Alphasense sowie SHT35 (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) und EKO ML-01 (Globalstrahlung) enthält. Das gesamte System wird vom selbst entwickelten Urbmobi 3.0-Micro-Controller gesteuert. Alle in Urbmobi 3.0 verbauten Sensoren gehören in die Kategorie der genannten 'Low Cost Sensoren' (LCS).

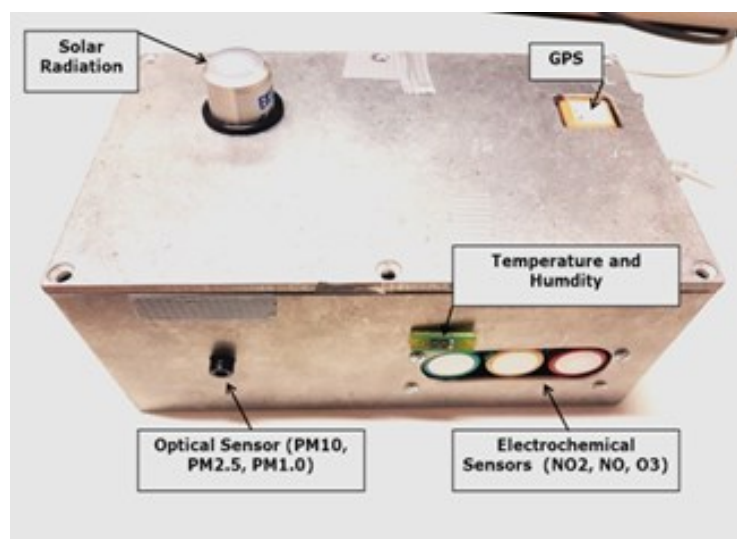


Abb. 3.7.1: Das Gerät Urbmobi 3.0 für die mobile Erfassung von Luftqualität und Meteorologie mit Sensoren für Feinstaub (OPC-N2), Gase (Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>), Stickoxid (NO) und Ozon (O<sub>3</sub>), Lufttemperatur und -feuchte (SHT35), und Globalstrahlung (EKO ML-01); Foto: Janani Venkatraman Jagatha (HUBgeo).

An allen vier Standorten wurden mobile Messungen durchgeführt, indem die Sensorbox auf einem Fahrrad befestigt und eine vorgegebene Strecke gefahren wurde. Die Routen wurden so abgestimmt, dass sie möglichst viele lokale städtische Klimazonen (Local Climate Zones, LCZ) und Landnutzungstypen (LU) umfassten (Abb. 3.7.2). Der Einsatz von LCS ist ein noch nicht etabliertes Messkonzept, wobei die verwendeten Sensoren eine ständige Kalibrierung und Qualitätskontrolle erfordern. Weder die Kalibrierungstechniken noch die Prüfungen der Datenqualität sind bisher von der Europäischen Kommission oder vom Umweltbundesamt standardisiert worden. Die HUBgeo versteht sich als Teil der forschungsorientierten Nutzer von LCS und arbeitet auch an eigenen Kalibrierverfahren für solche mobilen LCS-Plattformen, um zuverlässige Daten zu erhalten. Die Daten der elektrochemischen Sensoren für Gase wurden bisher in [UC]<sup>2</sup> nicht berücksichtigt, da bessere Kalibrierungsverfahren dafür erforderlich sind. Es bedarf weiterer Forschung, ehe eine zuverlässige Datenqualität garantiert werden kann.

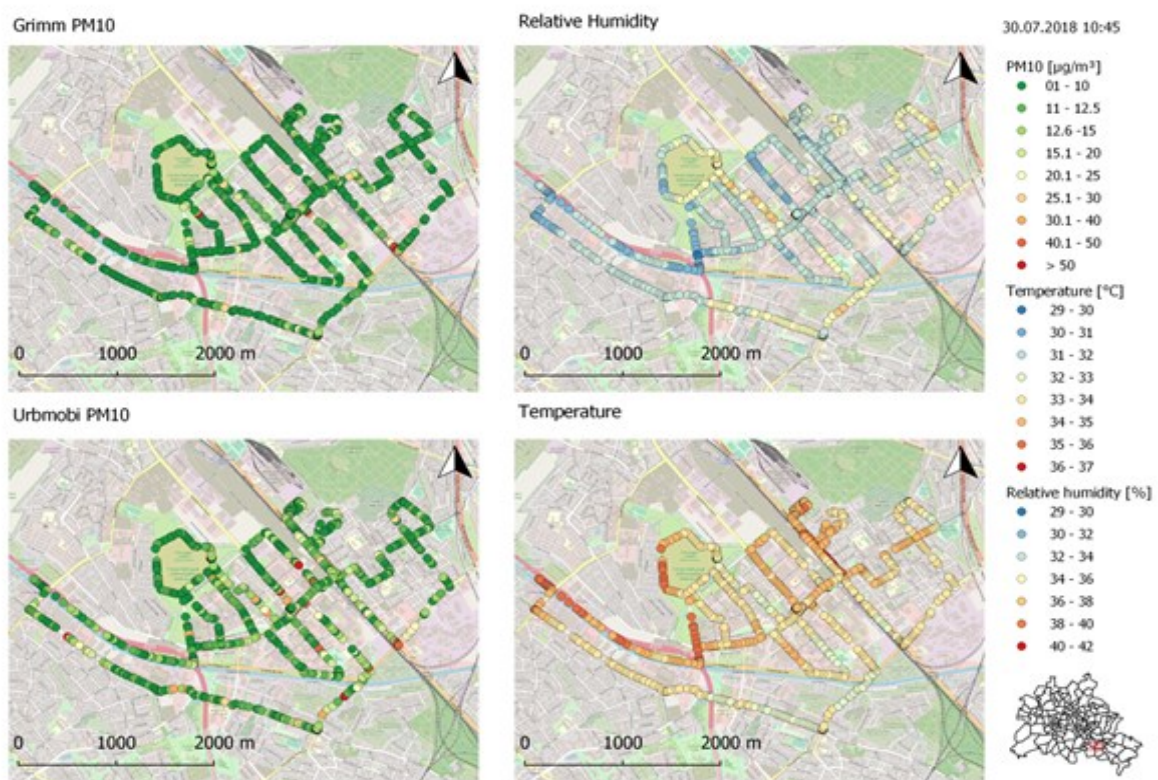


Abb. 3.7.2: Messstrecken zur Charakterisierung der Umgebung der LTO 'Berlin-Adlershof' und der räumlichen Variabilität der PM10-Partikel, gemessen mit Grimm 1.109 und Urbmobi 3.0, Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, im Rahmen der IOP-4. Datenbasis: Geoportal Stadt Berlin. Quelle: Janani Venkatraman Jagatha (HUBgeo); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

## Ultrafeinstaub (UFP)

Ab Dezember 2016 wurden Ultrafeinstaubmessungen (Partikelanzahlkonzentration, Partikeldurchmesser 7 – 2.000 nm) als Teil des LTO-Standorts 'Berlin-Adlershof' durchgeführt, begleitet von Messungen der meteorologischen Parameter Lufttemperatur, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung, Luftdruck und Niederschlagsmenge unter Verwendung eines Kondensationspartikelzählers GRIMM EDM 465 UFPC in Kombination mit einem Niederschlagssensor vom Typ LUFFT WS600.

Ergänzend dazu wurde, während der IOP-1 und -2 ein baugleiches Messgerät in der Nähe des Ernst-Reuter-Platzes positioniert, um Vergleichswerte zu liefern und so den LTO-Standort 'Berlin-Adlershof' im urbanen Luftqualitäts-Kontext zu charakterisieren (Abb. 3.7.3). Die Station wurde zudem für Referenzmessungen zu den mobilen Messprogrammen verwendet, um die zeitliche Variabilität mit abzubilden. Die Geräte wurden zweiwöchentlich gewartet und die Daten gesichert und qualitätsgeprüft.



Abb. 3.7.3: Links: Luftqualitätsmessstation für Ultrafeinstaub der LTO 'Berlin-Adlershof' mit GRIMM EDM 465 UFPC, LUFFT WS600 und Minikin RTHi/QTHi; Foto: Sabine Fritz. Rechts: IOP-Standort 'tumathsouth' während IOP-1 und -2 mit GRIMM EDM465 UFPC, LUFFT WS600, GRIMM 1.109 und Stickstoff-Passivsammler. Foto: Janani Venkatraman Jagatha (HUBgeo).

Während IOP-2 wurden mobile Messungen entlang eines Fußwegs orthogonal zur 'Straße des 17. Juni' durchgeführt, um das kleinräumige Muster der Partikelanzahlkonzentration (Partikeldurchmesser 10 – 1.000 nm) mit zunehmendem Abstand zur 'Straße des 17. Juni' im urbanen Umfeld zu charakterisieren (Abb. 3.7.4). Die Abstände der Messpunkte und die Messhöhe wurden mit Modul A abgestimmt, um einen möglichst guten Modellvergleich zu ermöglichen.

Während IOP-3 und -4 wurden großräumigere Messungen der Partikelanzahlkonzentration im Umfeld der LTO 'Berlin-Adlershof' durchgeführt, um die dortigen Quellen zu charakterisieren und um räumliche sowie zeitliche Variabilität besser voneinander abgrenzen zu können (Abb. 3.7.4).



Abb. 3.7.4: Datensätze zur Charakterisierung der räumlichen Variabilität der Partikelanzahlkonzentration. Oben: Karte und Bild der Messpunkte der IOP-2 am Messstandort 'Straße des 17. Juni'. Unten: Karte und Bilder der Messroute zur Charakterisierung des Umfelds der LTO 'Berlin-Adlershof' im Rahmen der IOPs-3 und -4. Datenbasis der Karten: Geofabrik GmbH Karlsruhe; Fotos: Sabine Fritz (HUBgeo; oben) und Hanna Maris (HUBgeo; unten).

Die Datensätze zur räumlichen Variabilität der Partikelanzahlkonzentration konnten in der ersten Phase des Projekts noch nicht zur Modellvalidierung herangezogen werden, da noch kein Modul zur Bestimmung von Partikelgrößen in PALM-4U integriert war. Sie stehen jedoch für ein erweitertes PALM-4U sowie für weitere Stadtklimamodellierungen zur Verfügung und bilden damit eine gute Datengrundlage zur Evaluierung von PALM-4U in der zweiten Phase von [UC]<sup>2</sup>.

### Größenklassifizierte Partikelflüsse

Seit März 2017 wurden von der TU Braunschweig (TP4) in Berlin-Charlottenburg auf dem Dach des Hauptgebäudes der TU Berlin am nahe gelegenen Ernst-Reuter-Platz größenklassifizierte Partikelflüsse gemessen (Abbildung 3.7.5). Die Datenerfassung erfolgte mithilfe der mikrometeorologischen Eddy-Kovarianz Methode (vgl. Aubinet et al., 2012). Zur Messung der Partikelflüsse wurden die Partikelanzahlgrößenverteilungen mit einem schnellen Mobilitätsspektrometer (Engine Exhaust Particle Sizer, EEPS, Model 3090) der Firma TSI Inc. gemessen. Die synchrone Erfassung der vertikalen Windkomponente erfolgte mit einem 3D-Ultraschallanemometer (USA-1) der Firma Metek GmbH. Die Datenanalyse wurde für einen Zeitraum von drei Jahren von Anfang April 2017 bis Ende März 2020 für einen Partikelgrößenbereich  $10 \text{ nm} < D_p < 200 \text{ nm}$  durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass das Untersuchungsgebiet in Berlin-Charlottenburg eine Netto-Quelle von (ultrafeinen) Partikeln ist (Abbildung 3.7.6; Straaten und Weber, 2021). Ein Vergleich zwischen Werktag (Mo-Fr) und Wochenende (Sa-So) für den mittleren Tagesgang des Flusses von ultrafeinen Partikeln (FUFP) verdeutlicht, dass die Flüsse am Werktag tagsüber deutlich höher liegen als am Wochenende und am Werktag besonders der Einfluss der morgendlichen Hauptverkehrszeit sichtbar wird (Abbildung 3.7.7). Die Messungen in TP4 bieten aufgrund der größenklassifizierten Auflösung der Partikelflüsse die Möglichkeit der genaueren Untersuchungen der Emissions- und Depositionsdynamik im Partikelgrößenpektrum. Die in TP4 gemessenen Partikelflüsse bieten eine gute Grundlage zur Validierung des Stadtklimamodells PALM-4U, da aus den Messungen Informationen zur Emission und Deposition von Partikeln zur Verfügung stehen und weiterhin Depositions- bzw. Transportgeschwindigkeiten zur Überprüfung des angegliederten, sektionalen Aerosolmodells SALSA abgeleitet werden können (vgl. Abbildung 3.7.8). Desweiteren wurden während der vier IOPs in Berlin entlang einer Messroute (22 km) sekundlich die Konzentration der Partikel  $> 10 \text{ nm}$  gemessen (Messgerät: Condensation Particle Counter, Model 3007, TSI Inc.), welche zur Modellevaluierung zur Verfügung stehen. Beispielhaft wird in Abb. 3.7.9 die Messfahrt am 16. Juni 2018 um 11:30 Uhr dargestellt.



Abb. 3.7.5: Messstandort der größenklassifizierten Partikelflussmessung auf dem Dach des Hauptgebäudes der TU Berlin. Foto: Agnes Straaten (TUBSgeo).

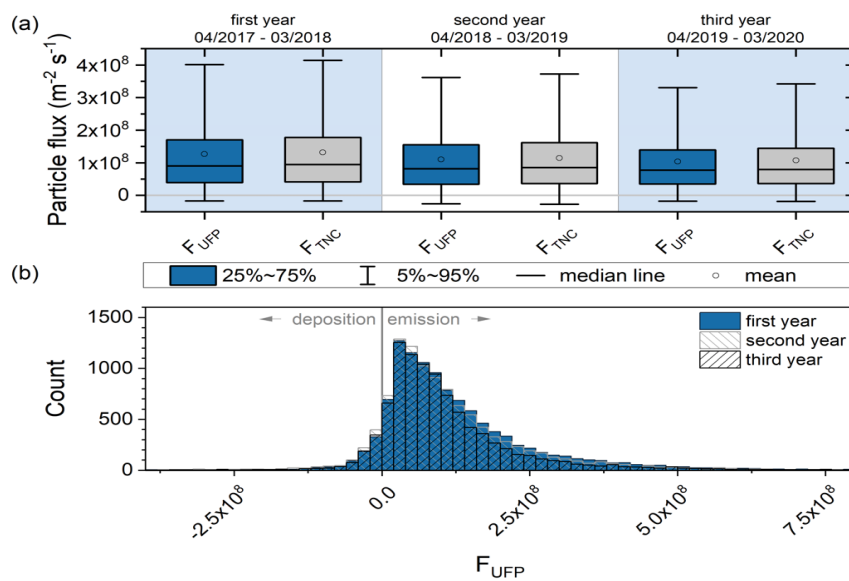


Abb. 3.7.6: (a) Boxplots der gemessenen Gesamtpartikelflüsse ( $10 \text{ nm} < D_p < 200 \text{ nm}$ ;  $F_{\text{TNC}}$ ) und der ultrafeinen Partikelflüsse ( $10 \text{ nm} < D_p < 100 \text{ nm}$ ;  $F_{\text{UFP}}$ ) bzw. (b) Häufigkeitsverteilungen des ultrafeinen Partikelflusses für die drei Messjahre am Standort Berlin-Charlottenburg. Quelle: Straaten und Weber, 2021.

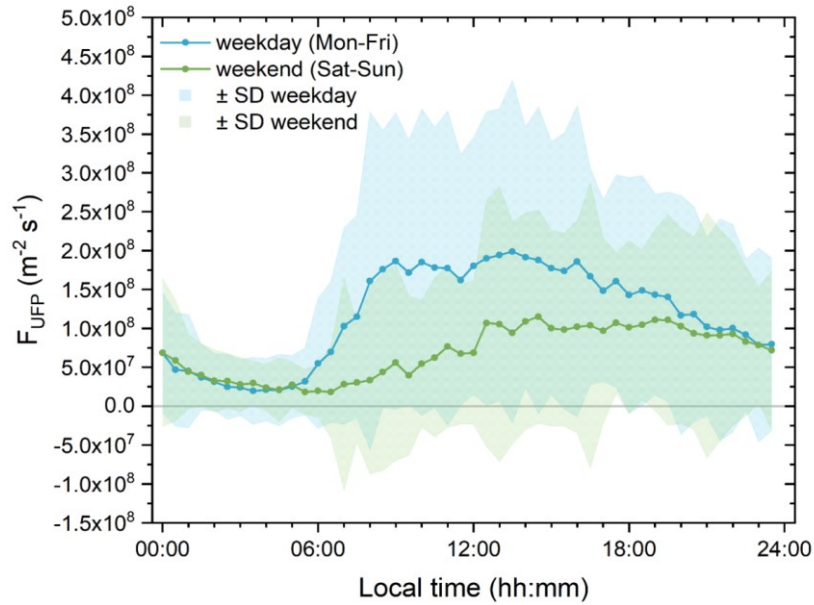


Abb. 3.7.7: Mittlerer Tagesgang (inkl. Standardabweichung, SD) des ultrafeinen Partikelflusses für einen Werktag (Montag - Freitag) bzw. einen Tag des Wochenendes (Samstag - Sonntag). Quelle: Straaten und Weber, 2021.

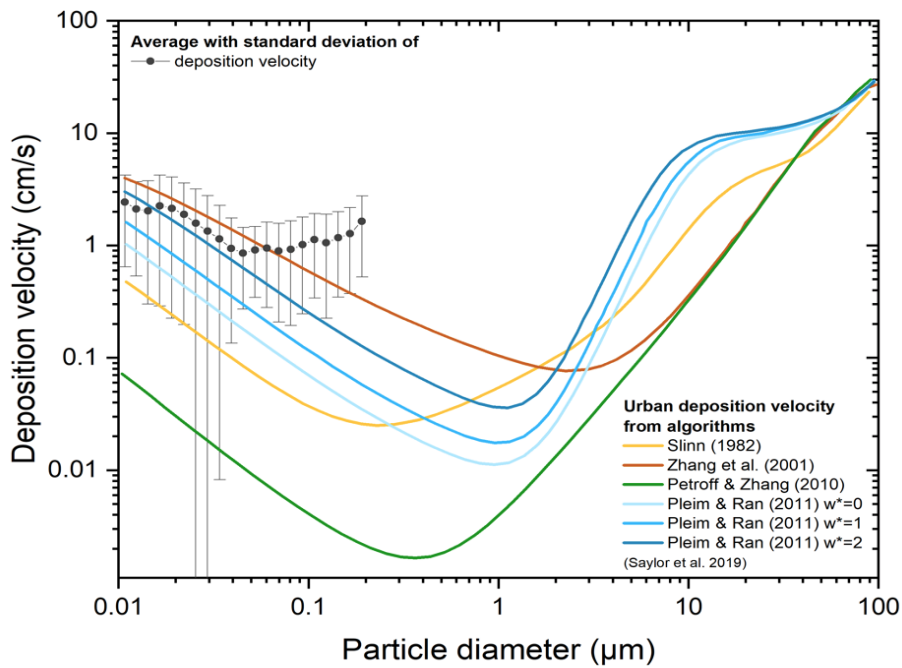


Abb. 3.7.8: Größenklassifizierte Depositionsgeschwindigkeiten basierend auf den Messdaten des LTO Standorts „tomainroof“ (3 Jahre) verglichen mit verschiedenen parametrisierten Depositionsverhalten für urbane Landnutzung (Schubspannungsgeschwindigkeit  $u^* = 0,6 \text{ m s}^{-1}$ ; entnommen aus Saylor et al., 2019). Das an PALM-4U ankoppelbare Aerosolmodell SALSA verwendet die Parametrisierung nach Zhang et al. (2001). Quelle: Agnes Straaten (TUBSgeo).

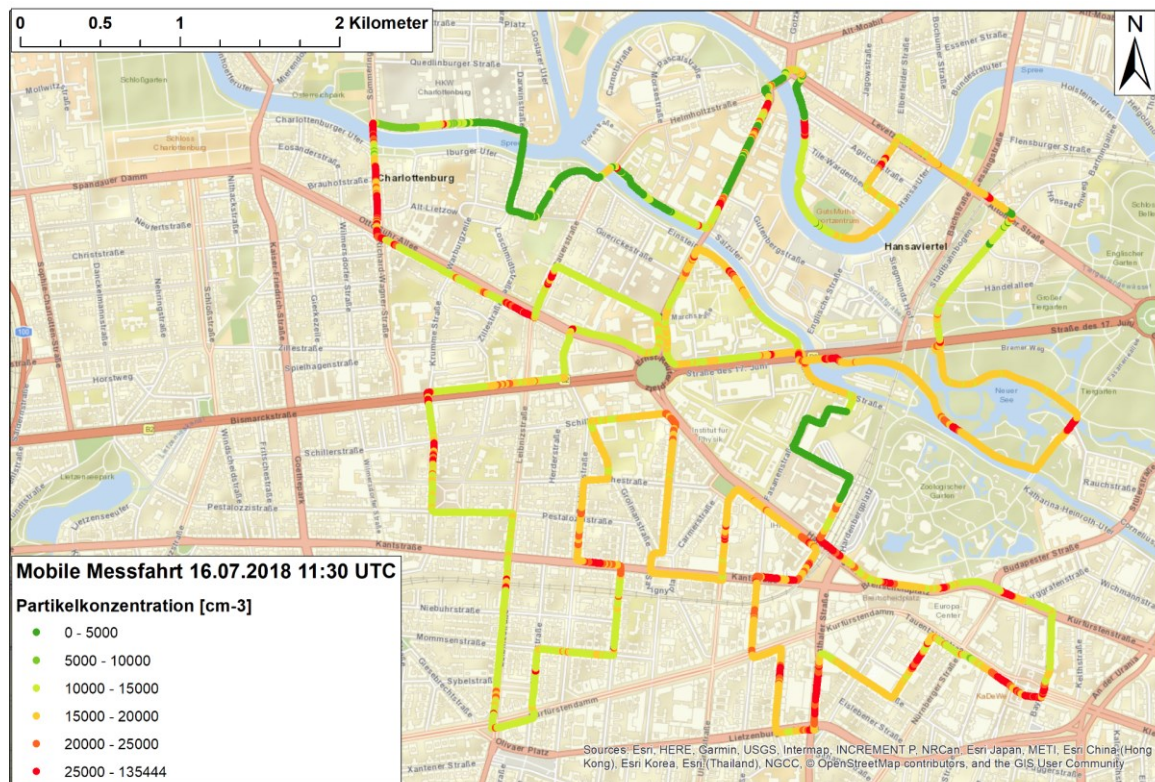


Abb. 3.7.9: Mobil gemessene Partikelkonzentrationen ( $D_p > 10 \text{ nm}$ ) entlang der Messroute in Berlin-Charlottenburg am 16. Juli 2018 in der Zeit von 11:30 bis 13:30 UTC. Quelle: Agnes Straaten (TUBSgeo); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

### 3.7.2 Spurengase

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurden qualitätsgeprüfte Referenzdatensätze zur Luftchemie bzw. zu Spurengasen in Berlin und Stuttgart erhoben. Dabei wurden umfangreiche und aufeinander abgestimmte, teils stationäre, teils mobile Messungen während der IOPs durchgeführt. Die gemessenen Referenzdaten von Spurengasen sowie die verwendeten Messinstrumente sind in den Tabellen in Annex 2 aufgeführt. Sie umfassen die auf fünf reale Episoden bezogenen Evaluierungsfälle in Berlin (VALR01, VALR02, VALR04) und Stuttgart (VALR03, VALR04). Der Schwerpunkt der Spurengasmessungen in  $[\text{UC}]^2$  gilt der Erfassung von raum-zeitlichen Mustern von der Mikro- (Straßenschlucht) bis hin zur Mesoskala (Stadtregion).

Die Stadt Berlin bietet eine ideale Testumgebung für die Validierung von Stadtklimamodellen, da die Luftqualität weder durch topographisch induzierte atmosphärische Prozesse noch durch ein Land-See-Windsystem oder sonstige Küsteneffekte nennenswert beeinflusst wird. Die Stadt Stuttgart hingegen ist eine der deutschen Städte mit den größten Luftqualitätsproblemen, die wesentlich durch topographische Eigenschaften



(Kessellage) bedingt werden. Da die Verteilung der Luftschadstoffe sehr stark durch die lokale Zirkulation beeinflusst werden kann, galt als eines der Hauptziele die Erfassung der kleinskaligen Variabilität von Luftschadstoffen in Abhängigkeit von Luftströmungen.

In Berlin wurden bodengestützte mobile Spurengasmessungen durch TP5 (IASS) und TP6 (FZJiek8) durchgeführt, in Stuttgart durch TP6 (FZJiek8) und TP8 (USifk). An beiden Standorten wurden im Rahmen des TP14 (DLRdfd und DLRpa) satellitenbasierte Beobachtungen ausgewertet sowie darauf abgestimmte flugzeuggestützte Messungen in Stadt und Umland durchgeführt. Die folgende Tabelle (3.7.1) gibt einen Überblick der von den einzelnen Teilprojekten erhobenen Referenzmessungen. Bei den Messperioden wurden zweimal Winter- und dreimal Sommerbedingungen erfasst.

Tab. 3.7.1: Die von den Teilprojekten TP5, TP6, TP8 und TP14 erhobenen Referenzmessungen (VALR\*) zu Spurengasen im Überblick.

Referenz	Ort	Start	Ende	IASS Fahrrad	FZJiek8 KfZ	USifk Fahrrad, stationär	DLRd fd Satellit	DLRpa Flugzeug
VALR01	Berlin	17.01.2017	18.01.2017	x	x			
VALR02	Berlin	16.07.2018	18.07.2018	x	x		x	x
VALR03	Stuttgart	14.02.2017	16.02.2017		x	x		
VALR04	Stuttgart	08.07.2018	09.07.2018		x	x	x	x

### Messvergleiche zur Datenharmonisierung

Im Vorfeld der IOPs in Berlin und Stuttgart wurden von TP6 (FZJiek8) Interkalibrationen der Gas- und Partikelphase mit der MobiLab-Analytik als Referenzsystem durchgeführt. Ziel war dabei die Harmonisierung der Resultate verschiedener Messsysteme zur Sicherstellung eines Gesamtdatensatzes bekannter Datenqualität für Modellevaluierungszwecke. Teilnehmer an den Interkalibrationen waren alle Teilprojektpartner, die während der IOPs Spurenstoffmessungen durchführten. Neben der intensiven Erfassung zeitlich und räumlich hochaufgelöster Spurenstoffdaten mittels MobiLab-Messfahrten wurden in allen Kampagnen Interkalibrationen und Parallelmessungen mit den anderen Spurenstoff-Messteams angeboten und durchgeführt. Tabelle 3.7.2 gibt einen Überblick über die während der IOPs in Berlin und Stuttgart von TP6 (FZJiek8) mit der Referenzanalytik des MobiLabs durchgeführten Außenluftvergleiche und Konzentrationsreihenmessungen an Standards.

Tab. 3.7.2: Messvergleiche zu den Spurengasmessungen und Interkalibrationen (Intercals)

Stadt	Messvergleiche/Intercals
Berlin	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Parallelmessungen mit TP5 (IASS): Zephyr-Sensoren (Mitnahme Messfahrt MobiLab)</li> <li>● Intercals mit TP5 (IASS): Zephyr-Sensoren Konzentrationsreihenmessungen an Standards (am Mathematikgebäude der TU)</li> <li>● Parallelmessungen mit TP14 (DLRpa): CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>; Geräte TP6 (FZJiek8): cavity ringdown: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub></li> <li>● Intercal mit TP14 (DLRpa) am Flughafen Schönhagen bei Berlin : CAPS - NO<sub>2</sub> (vgl. dazu Abb. 3.7.2.1)</li> <li>● Intercals mit TP14 (DLRpa): Konzentrationsreihenmessungen an Standards für NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub></li> </ul>
Stuttgart	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Parallelmessungen mit TP8 (USifk) Fahrradmessungen; Geräte TP6 (FZJiek8): NO<sub>x</sub> (Chemilumin.), ELPI, CO (Reson. FL)</li> <li>● Intercals mit TP8 (USifk): Konzentrationsreihenmessungen an Standards für NO, NO<sub>2</sub>, CO, Partikel</li> </ul>

Abbildung 3.7.10 zeigt die Vorbereitungen für einen Außenluftvergleich auf dem Flughafen Schönhagen. Verglichen wurden die Geräte der Gasphasen-Analytik der Cessna (DLRpa) und die Referenz-Messanalytik des MobiLabs (FZJiek8) während der IOP-IV in Berlin. Zusätzlich wurden für die Spurengase CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> Vergleiche mit Referenzgasmischungen durchgeführt.



Abb. 3.7.10: Vorbereitung zum Außenluftvergleich auf dem Flughafen Schönhagen (17.07.2018). Beide Ansaugsysteme sind in unmittelbarer Nähe zueinander positioniert (Cessna: AIRPOD unmittelbar unter dem rechten Flügel; MobiLab: Ansaugung am Kopf des Aerosol-Einlasses). Durch geeignete Positionierung der beiden Systeme wurde sichergestellt, dass Kontaminationen infolge von Eigenemissionen der Messplattformen vermieden werden konnten (Windströmung von rechts). Foto: Dieter Klemp (FZJiek8).

## Ausgewählte Validierungsmessungen in Berlin

### Stationäre Messungen mit Minisensoren

Nach eingehender Diskussion mit Modellierern und Städtepartnern wurde entschieden Vertikalprofile der Luftschadstoffe  $\text{NO}_2$  und  $\text{O}_3$  zu messen, da die Notwendigkeit und der Mangel solcher Daten zur Evaluierung hochaufgelöster Modelle eklatant ist. Daher wurden in einer Staßenschlucht sechs Earthsense Zephyr-Sensoren installiert, um die Verbreitung von Luftschadstoffen zu erfassen, wobei die Höhe und Distanz zur dominierenden Schadstoffquelle vor Ort (Verkehr) besonders berücksichtigt wurden. Die Lage der Sensoren an der Straße des 17. Juni in Berlin ist in Abbildung 3.7.11 schematisch dargestellt. Die Vertikalprofile wurden vom 29. Juli – 28. August 2017 und vom 27. Januar – 23. Februar 2018 erhoben. Der Standort auf der Nordseite der Straße auf 22 m Höhe war ebenfalls mit Referenzinstrumenten ausgestattet.

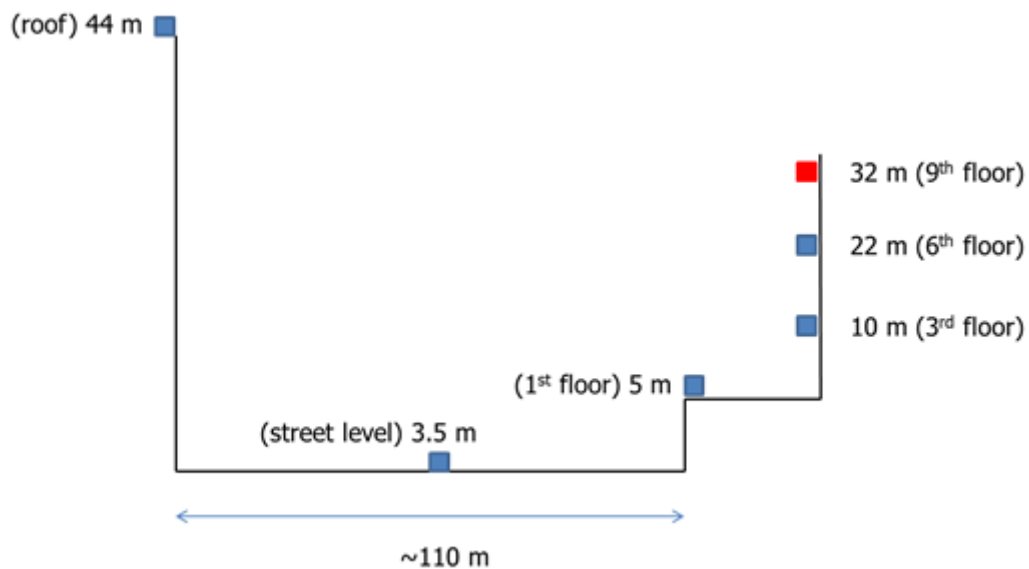


Abb. 3.7.11: Lage der sechs Earthsense Zephyr-Sensoren an der Straße des 17. Juni, Berlin (oben) sowie die graphische Darstellung der Höhen und Distanzen (unten). Die rechte Seite der Darstellung entspricht der Nordseite der Straße, die linke der Südseite. In 22 m Höhe war ein Referenzmessgerät angebracht. Die Daten des Zephyr-Sensors in 32 m Höhe (rot) waren nicht nutzbar. Quelle: Erika von Schneidemesser (IASS).

Unterschiedliche statistische Methoden und Methoden des maschinellen Lernens wurden für die Auswertung und Kalibration genutzt, um die Earthsense Zephyr-Daten in Luftschadstoffkonzentrationen umzuwandeln. Die Sensoren wurden auch mit Referenzmessgeräten und Intercals kalibriert. Diese Ergebnisse zeigen, dass ein Random Forest Modell sehr gut Ozon prognostizieren kann, Stickstoffdioxid hingegen viel schwieriger zu modellieren ist. Die Auswertalgorithmen sollen in aktuellen Untersuchungen weiter verbessert werden.

Vertikalprofile der Konzentrationen von Ozon und Stickstoffdioxid sind in den Abbildungen 3.7.12 und 3.7.13 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Konzentrationen von NO<sub>2</sub> auf Straßenhöhe am höchsten sind und nach oben hin abnehmen. Bei Ozon ist das Verhalten umgekehrt und stimmt mit unserem Wissen über atmosphärische Prozesse überein, da Ozon nicht direkt emittiert wird, sondern erst photochemisch gebildet wird. Ein interessanter Aspekt scheint die höhere Konzentration von NO<sub>2</sub> im 6. Stock, was sowohl vom Referenzinstrument als auch vom Zephyr-Sensor gemessen wird, gegenüber dem 1. Stock und dem 3. Stock. Ein ähnliches Muster, aber in umgekehrter Richtung, ist bei den Ozonkonzentrationen erkennbar.

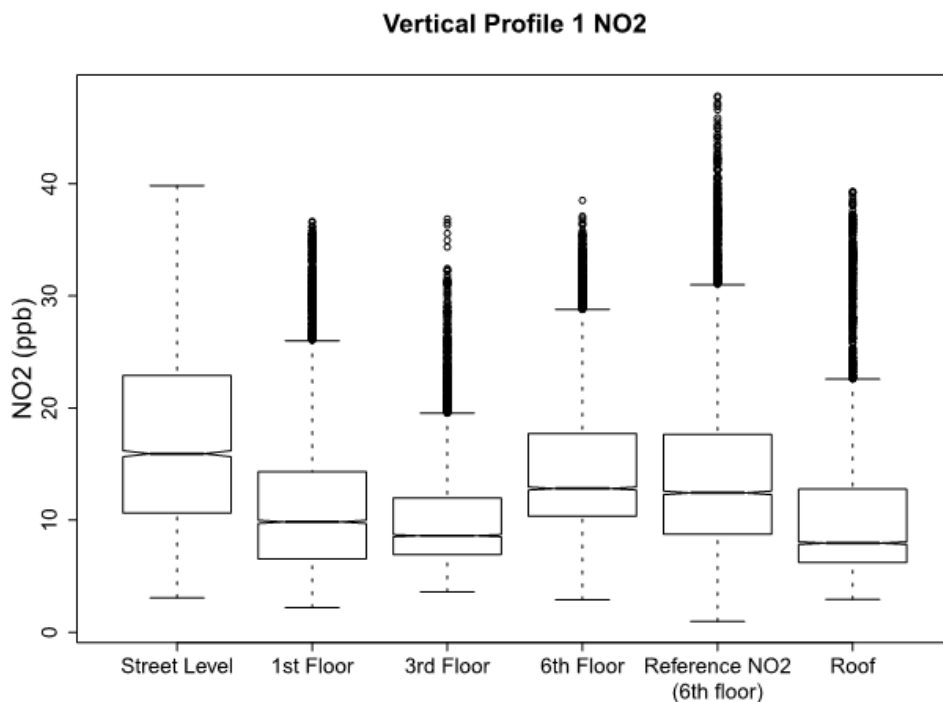


Abb. 3.7.12: Ergebnisse der vertikalen Profilmessungen von NO<sub>2</sub> vom 27. Januar – 23. Februar 2018 als Box-and-Whisker Plots dargestellt. Die untere und obere Grenze der Box entspricht dem ersten und dritten Quartil der Daten, die obere und untere Grenze der Whisker reicht bis 1,5\*IQR (Inter-Quartils-Bereich). Alle Punkte darüber hinaus sind Ausreißer. Die Kerben um den Median reichen bis 1.58\*IQR/sqrt(n) und zeigen ein ca. 95%iges Konfidenzintervall um den Median an. Quelle: Erika von Schneidemesser (IASS).

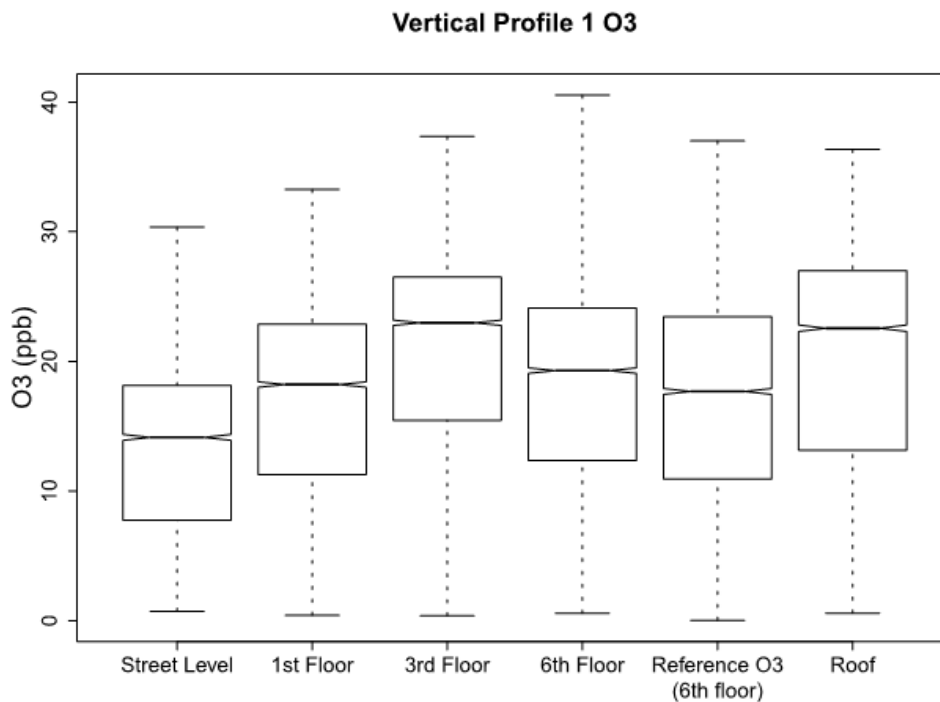


Abb. 3.7.13: Wie Abbildung 3.7.12, aber für O<sub>3</sub>. Quelle: Erika von Schneidemesser (IASS).

Während der IOP-4 (20. Juli – 30. August, 2018) wurden Earthsense Zephyr-Sensoren in einer Straßenschlucht an der Frankfurter Allee in Berlin als Vergleichsort zu den vorhergehenden Messungen installiert. Ziel war es, unterschiedliche Charakteristika von Straßenschluchten zu quantifizieren. Die Standorte der Sensoren während der IOP-4 sind in Abbildung 3.7.14 dargestellt, die vorläufigen Ergebnisse in den Abbildungen 3.7.15 und 3.7.16. Obwohl die Anzahl der Messstandorte aus technischen Gründen geringer war, konnte auch hier nachgewiesen werden, dass die Konzentration in 21 m Höhe im Vergleich zum Straßenniveau für NO<sub>2</sub> geringer (Abbildung 3.7.15) und für O<sub>3</sub> höher ist (Abbildung 3.7.16). Die Tagesverläufe der Messungen in IOP-4 zeigen Ähnlichkeiten zu den vorangegangenen Messungen, wobei das Tagesprofil von NO<sub>2</sub> nach dem durch Pendler verursachten morgendlichen Verkehrspeak eher flacher wird.

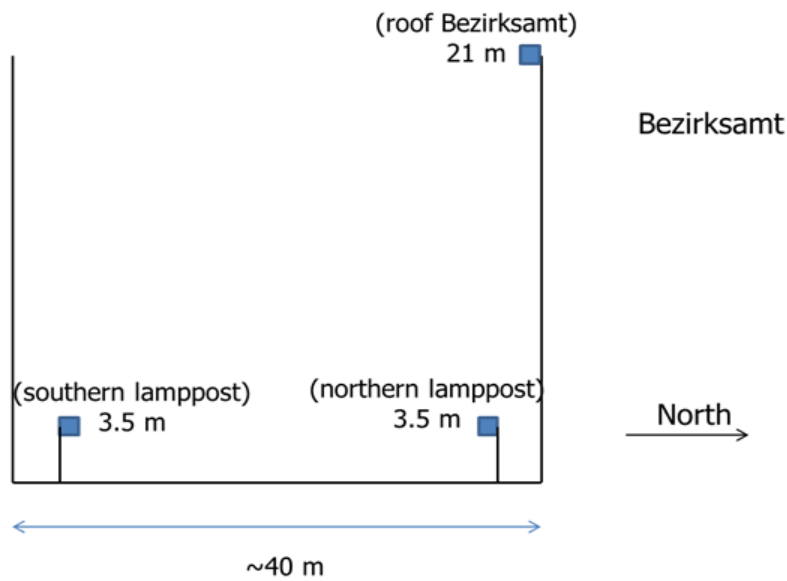


Abb. 3.7.14: Graphische Darstellung der Standorte der Earthsense Zephyr-Sensoren während der IOP-4 (20. Juli – 30. August, 2018) an der Frankfurter Allee, Berlin. Quelle: Erika von Schneidmesser (IASS).

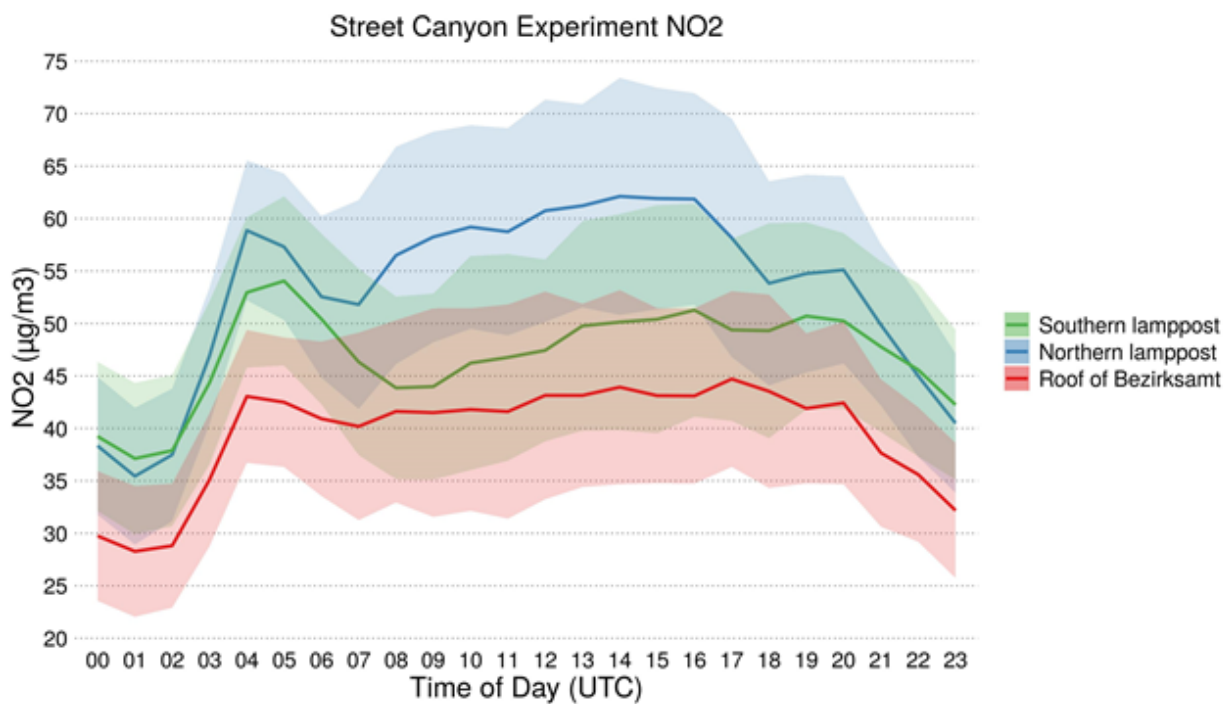


Abb. 3.7.15: Vorläufige Ergebnisse der vertikalen Profilmessungen von NO<sub>2</sub> während IOP-4 (20. Juli – 30. August 2018) als Tagesprofil dargestellt. Fehlerbalken geben das 95% Konfidenzintervall der Daten wieder. Quelle: Erika von Schneidmesser (IASS).

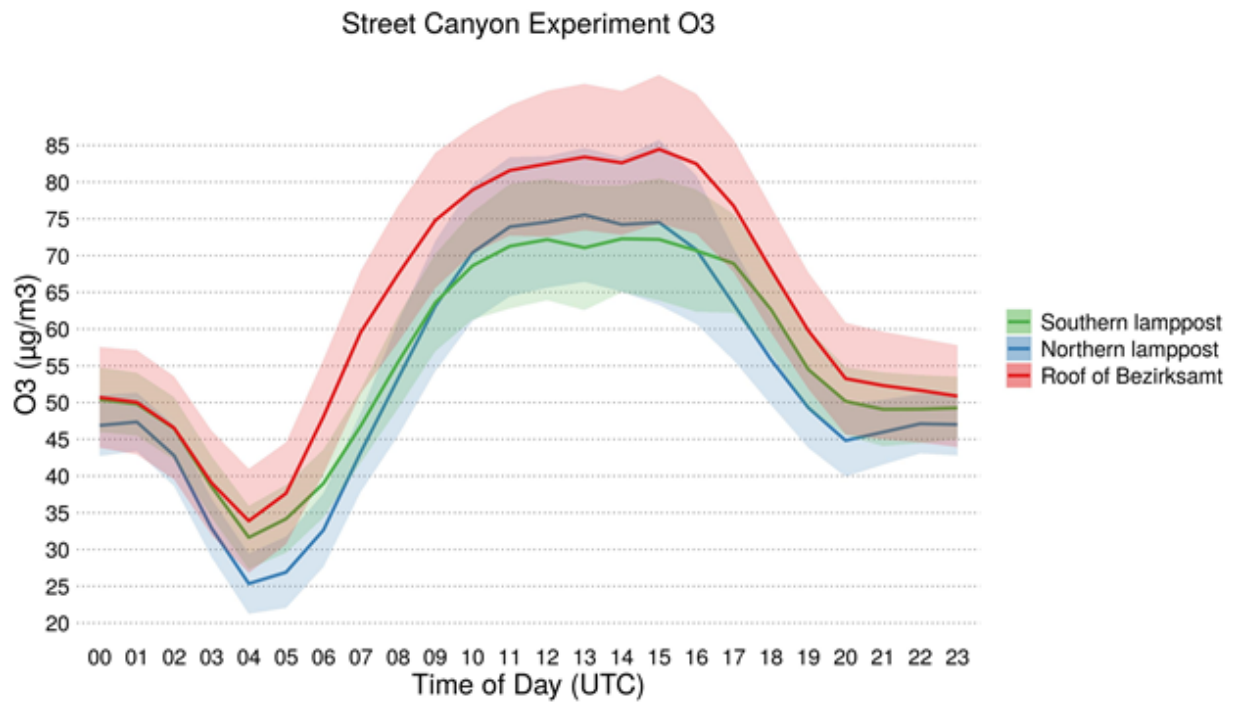


Abb. 3.7.16: Wie bei Abbildung 3.7.15, aber für O<sub>3</sub>. Quelle: Erika von Schneidmesser (IASS).

#### Mobile Messungen (MobiLab)

Das MobiLab des FZJiek8 (TP6) hat während der VALR01 eine Reihe von Messfahrten auf einer Berliner Referenzstrecke durchgeführt, um die raumzeitliche Variabilität einer Reihe von Spurenstoffen zu erfassen. Die Abbildung 3.7.17 zeigt exemplarisch die Messfahrten vom 17.01.2017 von 9:10 bis 10:25 UTC und 11:44 bis 13:13 UTC mit den NH<sub>3</sub>-Konzentrationen [ppb] entlang der Strecke. Des Weiteren wurden CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, NO, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, Partikel Masse [mg/m<sup>3</sup>], Partikelanzahl sowie die Wasserdampfkonzentration erfasst.



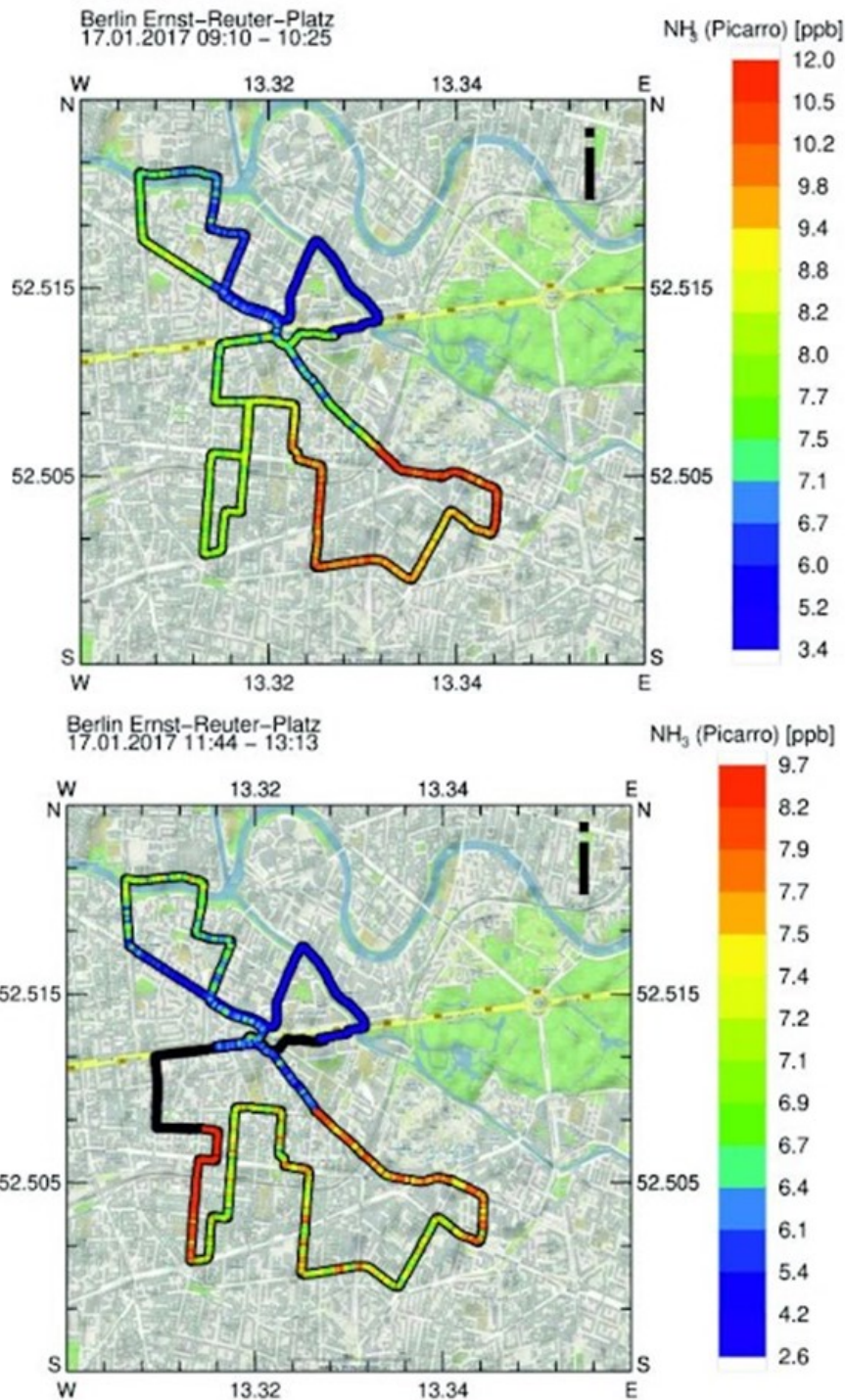


Abb. 3.7.17: Während IOP-1 (VALR01) durchgeführte Messfahrten entlang einer Referenzstrecke am 17.01.2017 von 9:10 – 10:25 UTC (oben) und 11:44 - 13:13 UTC (unten). Exemplarisch sind die NH<sub>3</sub>-Mischungsverhältnisse [ppb] dargestellt. Quelle: Robert Wegener (FZJiek8); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

Bei den Untersuchungen zur Jahreszeitabhängigkeit sind die auftretenden Hintergrundkonzentrationen der Stickstoffoxide von besonderem Interesse. Zum einen erhöhen die luvseitig eingetragenen Hintergrundkonzentrationen besonders im Winter die auftretenden Werte in den Innenstädten. Zum anderen wird deutlich, dass eine Modellierung

mit PALM-4U unbedingt die Einspeisung realer Randbedingungen durch ein regionales Modell erfordert, da nur auf diesem Wege der additive Effekt der luvseitigen Hintergrundkonzentrationen adäquat berücksichtigt werden kann. Abbildung 3.7.18 zeigt die im Rahmen der VALR01 (IOP-1) von MobiLab (FZJiek8) gemessenen  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen unter winterlichen Bedingungen dar. Die winterlichen  $\text{NO}_2$ -Hintergrundwerte im Luv der Stadt Berlin sind um eine Größenordnung höher ( $> 21$  ppb) als die sommerlichen Werte von etwa 2 ppb. Denkbare Gründe sind der vorangegangene Aufbau hoher  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen während einer austauscharmen Hochdrucklage, verbunden mit dem im Winter langsameren Abbau über Hydroxyl-Radikale. Zudem führt im Winter die verlangsamte photochemische Spaltung des  $\text{NO}_2$  infolge geringerer Strahlungsintensität zu einem erhöhten  $\text{NO}_2/\text{NO}$ -Verhältnis.

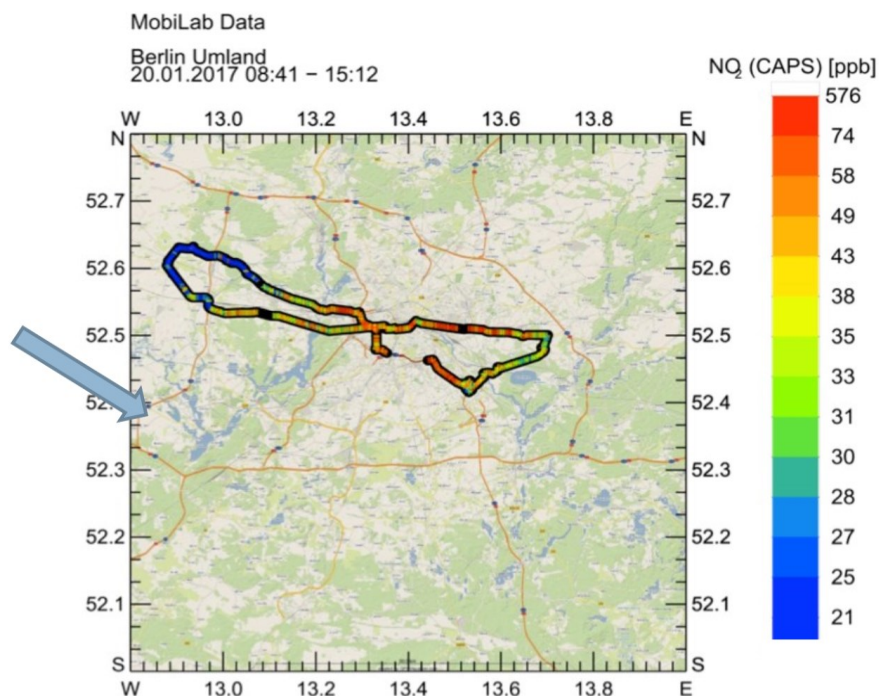


Abb. 3.7.18:  $\text{NO}_2$ -Messungen bei der Durchquerung der Stadt Berlin in Ost-West-Richtung mit MobiLab zur Analyse des Luv- und Leebereichs unter winterlichen Bedingungen und nordwestlicher Windrichtung (siehe blauer Windpfeil). Die Messungen wurden an einem Wochentag während der IOP-1 durchgeführt (20.01.2017 zwischen 09:00 und 12:30 UTC). Quelle: Dieter Klemp (FZJiek8); Kartengrundlage OpenStreetMap.

### Flugzeuggestützte Messungen

Im Rahmen der IOP-4 fand eine Flugzeugmesskampagne mit der DLR Cessna Caravan in Berlin statt. In Abstimmung mit den Überflugzeiten des Satelliten Sentinel 5P, sowie mit bodengestützten Messungen am Tempelhofer Feld, wurden insgesamt sechs Messflüge vom 17.07.2018 bis 25.07.2018 durchgeführt (Tabelle 3.7.3 und Abbildung 3.7.19). Das wissenschaftliche Ziel bestand in der Massenbilanzierung von Spurengasen. Hierzu wurden Messungen in verschiedenen Höhen senkrecht zur jeweils vorherrschenden Windrichtung

durchgeführt. Eine Auflistung der Messinstrumente und der gemessenen Parameter und Spurengase findet sich in Tabelle 3.7.4. Die Instrumente lieferten Daten mit 1 Hz Auflösung.

Zur Realisierung der Projektziele wurde zunächst die Spurengasverteilung im Luv der Stadt in der Mitte der Grenzschicht bestimmt, um Emissionen zu identifizieren, welche bereits in die Quellregion transportiert wurden. Anschließend wurde die Abgasfahne im Lee der Stadt in verschiedenen Höhen innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht vermessen. Mindestens ein Vertikalprofil pro Flug wurde von ~300 m bis ~3 km ü.G. am Tempelhofer Feld geflogen (DLRpa). Durch die koordinierten bodengebundenen Messungen am Tempelhofer Feld der TPs 1 (UAgeo; Unbemannte Luftfahrtsysteme) und 11 (DWDku1; Radiosonden- und Fesselsondensystem) kann die Lücke der meteorologischen Messungen zwischen dem Boden und dem untersten geflogenen Fluglevel geschlossen und so ein lückenloses Vertikalprofil gewonnen werden. Ebenfalls koordinierte Messungen, und ein Prüfgasvergleich, mit TP6 (FZJiek8) erlauben die Verteilung von Spurengasen am Boden und in der Luft zu kombinieren.

Tab. 3.7.3: Durchgeführte Messflüge mit Flugzeiten und mittleren Windparametern.

Stadt	Nr.	Datum	Zeit (UTC)	Windrichtung	Windgeschwindigkeit
Berlin	7	17.07.2018	8:22 - 10:12	340°	6.1 m/s
	8	18.07.2018	11:35 - 14:13	307°	9.0 m/s
	9	20.07.2018	11:30 - 14:06	300°	4.6 m/s
	10	23.07.2018	11:37 - 14:07	292°	5.7 m/s
	11	24.07.2018	12:13 - 14:59	30°	3.5 m/s
	12	25.07.2018	11:29 - 14:09	29°	3.3 m/s

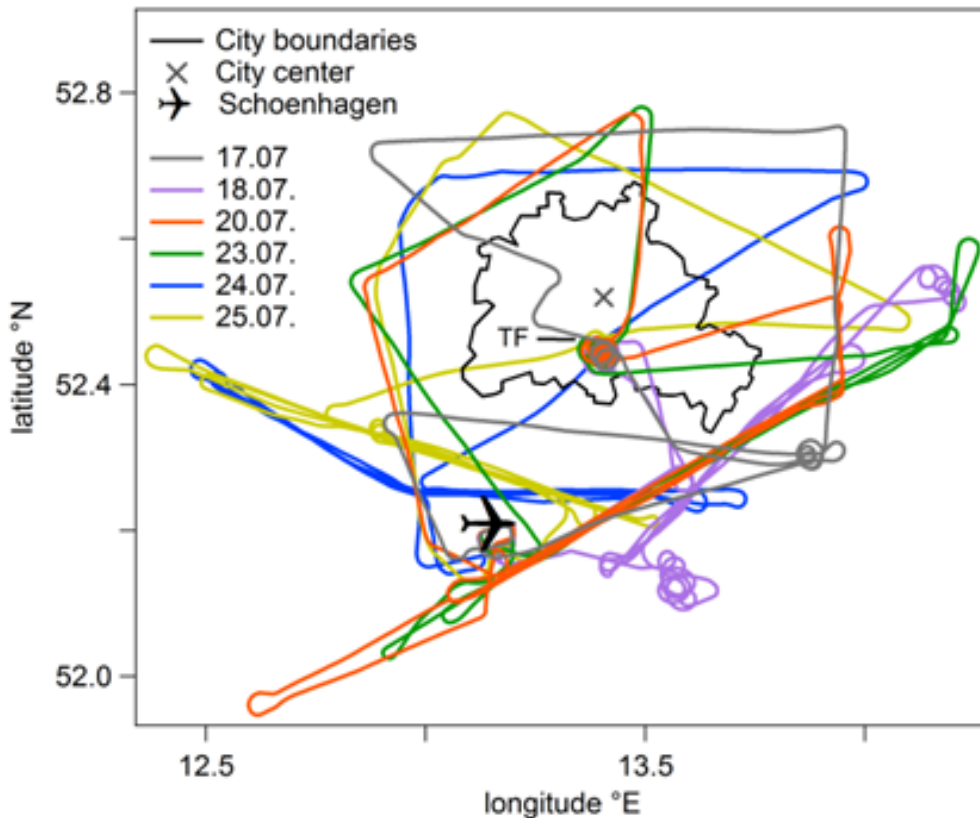


Abb. 3.7.19: Kartendarstellung aller Flugwege der DLR Cessna über Berlin während der IOP-4 im Juli 2018. Das Flugzeug war am Flughafen Schönhausen stationiert. Quelle: Anke Roiger (DLRpa).

Tab. 3.7.4: Auflistung der Messinstrumente, der gemessenen Spezies sowie der Parameter auf der Cessna Caravan während der IOP-4 in Stuttgart und Berlin. Die Geräte lieferten Daten mit 1 Hz Auflösung.

Instrument	Spezies/Parameter	Technik
CAPS NO <sub>2</sub> Monitor (Aerodyne)	NO <sub>2</sub>	Cavity attenuated phase shift (CAPS)
Ozon Monitor (2B)	O <sub>3</sub>	UV Absorption
CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , Analyzer (Picarro G1301-m)	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	Cavity ring-down spectroscopy (CRDS)
QCLS (Aerodyne)	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, CO, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Quantum cascade laser spectrometer (QCLS)
Metpod	Meteorologische Parameter (z. B. Lufttemperatur, Luftdruck, Windrichtung und -geschwindigkeit)	Verschiedene kommerzielle und intern gefertigte Sensoren (Mallaun et al., 2015)

## Satellitenbasierte Messungen

Im Rahmen des europäischen Erdbeobachtungsprogramm Copernicus wurde am 13. Oktober 2017 Sentinel-5P ins All gestartet. Der Satellit umkreist die Erde 14 Mal pro Tag und beobachtet aus 824 km Höhe die Erdatmosphäre auf nahe-polarer sonnensynchroner Umlaufbahn. Kernstück von Sentinel-5P ist das Spektrometer TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), das mit seiner räumlichen Auflösung von 3,5 Kilometer mal 5,5 Kilometer vergleichbare Instrumente um das Hundertfache übertrifft und durch ein Sichtfeld von 2600 km Breite eine täglich globale Erfassung der Erdatmosphäre erlaubt. TROPOMI ermöglicht die Beobachtung von Schwefeldioxid, Ozon, Formaldehyd, Stickstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Methan, Aerosol- und Wolkenparametern.

Wie in Abbildung 3.7.20 deutlich wird, erlaubt TROPOMI erstmals die Detektion städtischer Abgasfahnen (urban plumes) und setzt durch seine bisher unerreichte hohe räumliche Auflösung Maßstäbe in der Fernerkundung der urbanen Atmosphäre. Beispielhaft ist die troposphärische NO<sub>2</sub>-Verteilung über Berlin vom 16. Juli 2018 während der IOP-4 dargestellt; Wind aus NNW verfrachtet die Emissionen nach SSE ins Umland. Das Maximum der NO<sub>2</sub>-Belastung liegt in der Stadtmitte (90 µmol/m<sup>2</sup>). Diese Messdaten liegen zur Evaluierung gesamtstädtischer Spurengasverteilungen sowie der Überprüfung der Anbindung des Stadtnests an die mesoskalige Meteorologie (vor allem bezüglich der Windrichtung und Windgeschwindigkeit) vor. Durch die Auswertung aller Überflüge über einen Zeitraum eines Jahres konnte mit TROPOMI erstmals die städtische Verschmutzungsinsel von Berlin in hoher Auflösung quantifiziert werden. Offensichtlich wird, dass in Berlin das NO<sub>2</sub>-Maximum aus dem Stadtzentrum nach Nordosten verschoben zu sein scheint und die Verschmutzungsinsel über die administrativen Stadtgrenzen hinausgeht.

Durch die synoptische Beobachtung des vertikal integrierten NO<sub>2</sub> durch TROPOMI und der flugzeug-gestützten Vermessung der NO<sub>2</sub>-Verteilung entlang einer Downwind-Wall, lässt sich die horizontale Ausdehnung und Vertikalstruktur der städtischen Abluffahne erfassen (Abbildung 3.7.21). TROPOMI stellt somit eine Ergänzung zu traditionellen Messverfahren zur Kartierung stadtweiter und mesoskaliger Spurengasverteilungen, zur Quantifizierung von gesamtstädtischen Emissionen, zur Schließung von Massenbilanzen sowie zu vertikal integrierten Datensätzen zur dreidimensionalen Evaluierung von Stadtklimamodellen dar.

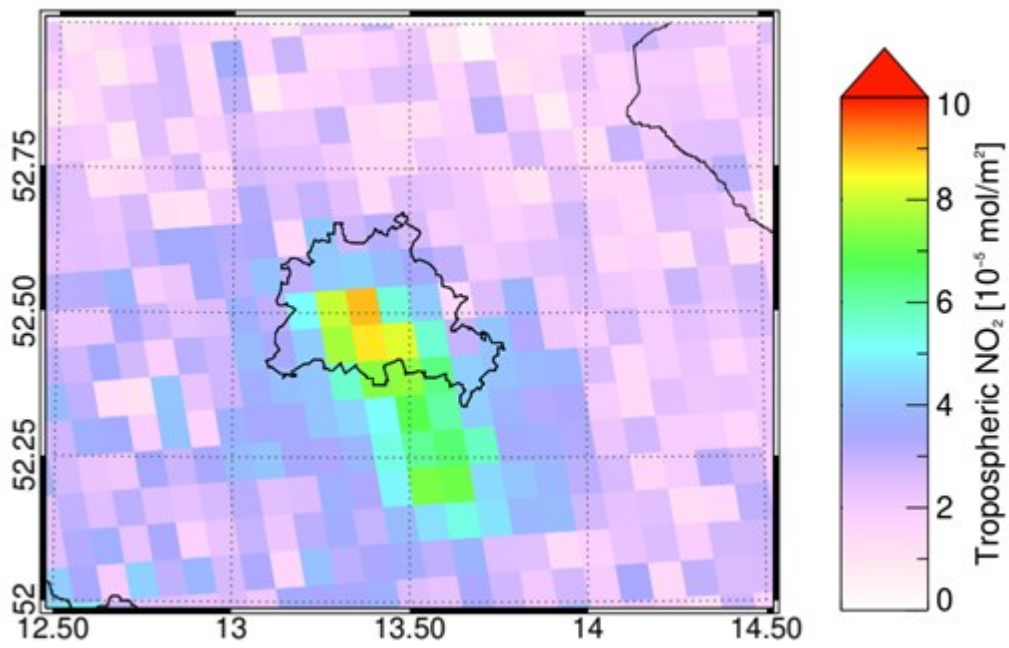


Abb. 3.7.20: Die vertikal integrierte NO<sub>2</sub>-Verteilung über der Stadtregion Berlin am 16. Juli 2018, 11:27 UTC beobachtet durch Sentinel-5P/TROPOMI (in der physikalischen Originalauflösung). Deutlich ist die Abgasfahne der Stadt Richtung SSO (Lee) über die administrativen Stadtgrenzen hinaus zu erkennen. Quelle: Erbertseder et al., (2020) (DLRdfd).

## Sentinel-5P NO<sub>2</sub>, Berlin, 20180724T103602

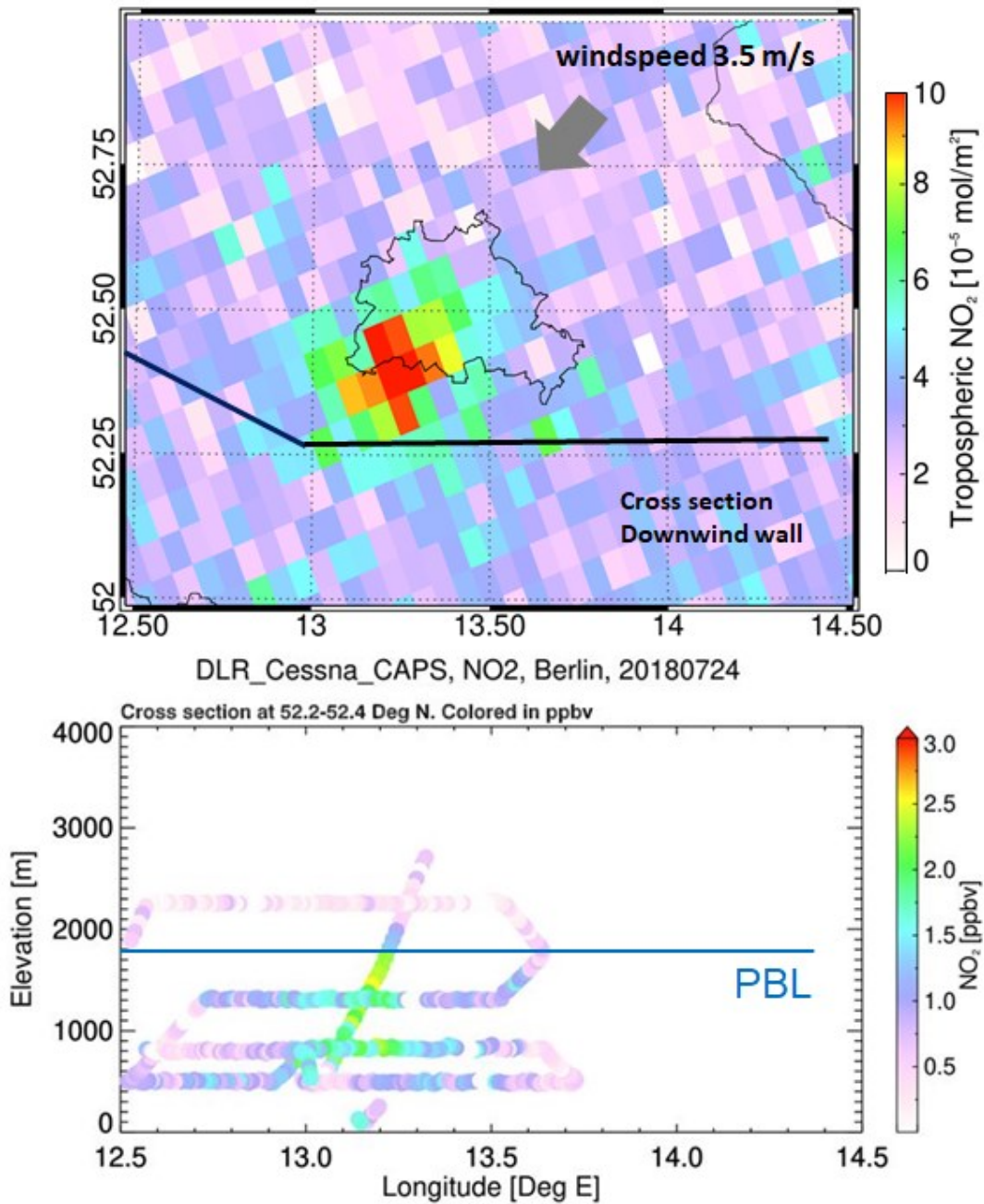


Abb. 3.7.21: Durch die synoptische Beobachtung des vertikal integrierten NO<sub>2</sub> durch TROPOMI (oben) und der flugzeug-gestützten Vermessung der NO<sub>2</sub>-Verteilung entlang einer Downwind-Wall (unten, aufgetragen entlang schwarzer Linie), lässt sich die horizontale Ausdehnung und Vertikalstruktur der städtischen Abluftfahne erfassen. Quelle: Thilo Erbertseder (DLRdfd).

## Ausgewählte Validierungsmessungen in Stuttgart

### Mobile Messungen (MobiLab)

Das mobile Messlabor des FZJiek8 hat während der IOP-3 (VALR03) zwei unterschiedliche Messfahrten durchgeführt, um die raumzeitliche Verteilung von Spurenstoffen zu quantifizieren: 'Stuttgart und das westlich gelegene Umland' sowie 'Stuttgarter Innenstadt'. Abbildung 3.7.22 zeigt die Streckenführung der als Referenz dienenden Rundstrecke in Stuttgart, genannt 'Stuttgarter Innenstadt' und exemplarisch die erfassten  $\text{NO}_2$ -Mischungsverhältnisse.

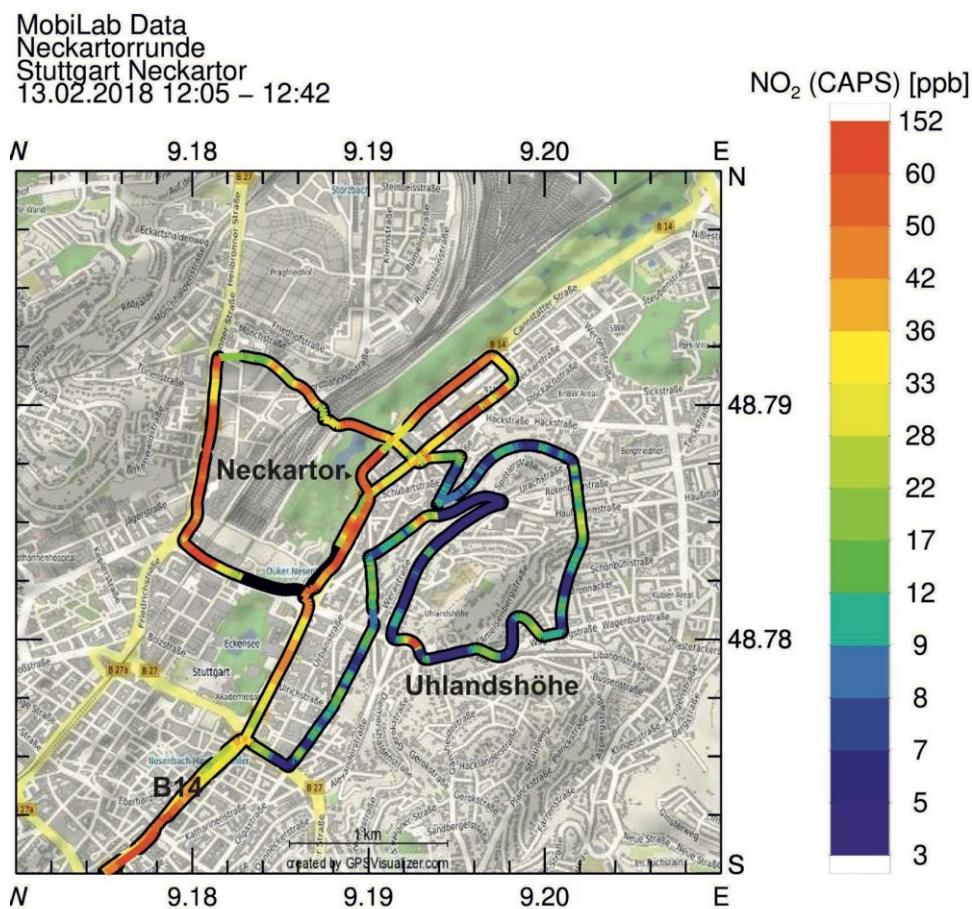


Abb. 3.7.22: Mischungsverhältnis von  $\text{NO}_2$  auf der Referenzstrecke 'Stuttgarter Innenstadt' rund um das Neckartor in Stuttgart am 13. Februar 2018 von 12:05 bis 12:42 UTC. Quelle: Dieter Klemp (FZJiek8); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

Start- und Endpunkt der Messfahrt war der Stuttgarter Marienplatz. Die Fahrtroute führte über die B14 nach Norden bis über das Neckartor hinaus. Anschließend wurde in Form von zwei Schleifen der linke und rechte Teil des Stuttgarter Stadtgebietes vermessen. Die rechts der E14 gelegene Schleife führt durch das auf der Umlandshöhe gelegene Wohngebiet, während die linke Schleife zunächst den Hauptbahnhofs-Vorplatz kreuzt und dann das



Europaviertel passiert. Die linke Schleife mündet am Neckartor wieder auf die B1 und führt zurück zum Marienplatz. Abbildung 3.7.22 zeigt die Variabilität des Spurengases NO<sub>2</sub>. Es ist klar ersichtlich, dass für NO<sub>2</sub> der Straßenverkehr eine direkte Emissionsquelle darstellt: Hohe Verkehrsdichten (z. B. am Neckartor) gehen einher mit Spitzenwerten für NO<sub>2</sub>. Das auf der rechten Seite der B14 gelegene Wohngebiet (Umlandshöhe) zeigt hingegen weitaus niedrigere Werte für NO<sub>2</sub>.

Im Folgenden sollen Resultate der Messrunde ‘Stuttgart und das westlich gelegene Umland’ näher vorgestellt werden. Die Fahrtroute beginnt am Stationierungsort des MobiLabs auf dem Stuttgarter Marienplatz und führt zunächst auf der stark befahrenen B14 durch die Stuttgarter Innenstadt. Anschließend erfolgt ein Schwenk in westliche Richtung hin zum Stadtteil Feuerbach. Über die Feuerbacher Talstraße und ein kurzes Autobahnstück erfolgt die Rückfahrt durch den Heschlacher Tunnel hin zum Marienplatz. In Abbildung 3.7.23 ist der Fahrtverlauf für den 14.02.2017 7:54 bis 9:58 UTC anhand der NO<sub>2</sub>-Massenmischungsverhältnisse [ppb] illustriert. Des Weiteren wurden CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, NO, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, Partikel Masse [mg/m<sup>3</sup>], Partikelanzahl [# /cm<sup>3</sup>] sowie die Wasserdampfkonzentration erfasst.

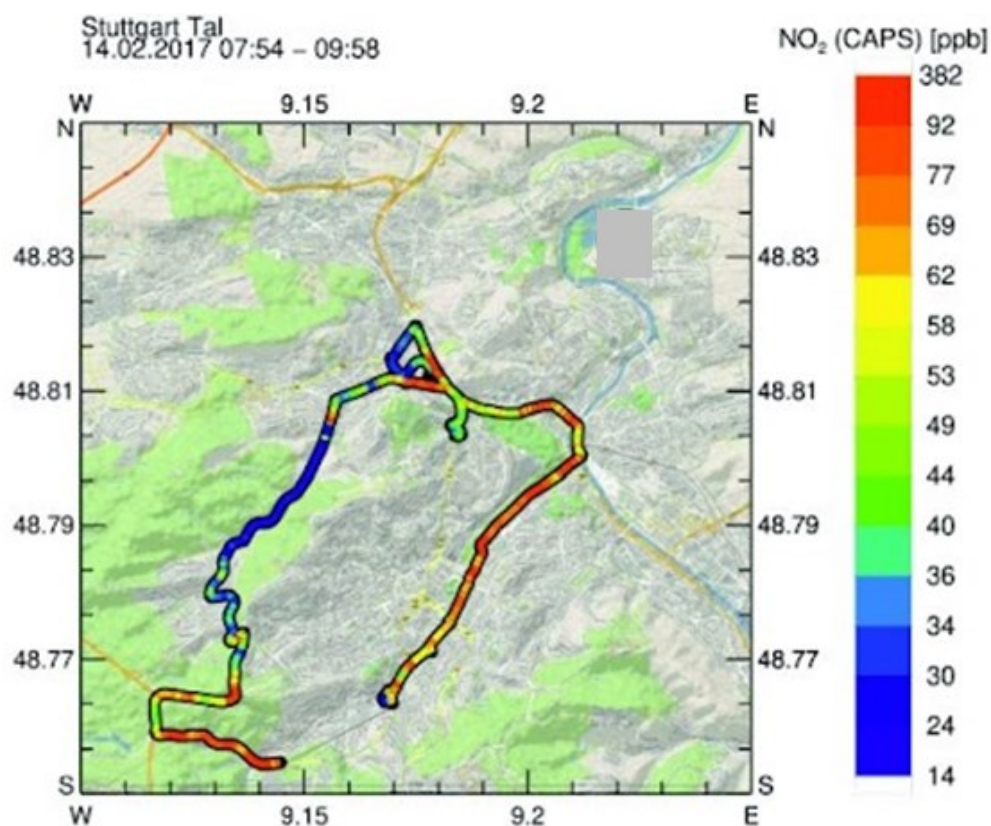


Abb. 3.7.23: Während IOP-3 (VALR03) durchgeführte Messfahrten entlang einer Referenzstrecke ‘Stuttgart und das westlich gelegene Umland’ am 14.02.2017 7:54 – 9:58 UTC. Exemplarisch ist das NO<sub>2</sub>-Massenmischungsverhältnis [ppb] dargestellt. Quelle: Dieter Klemp (FZJiek8); Kartengrundlage: OpenStreetMap.

## Mobile Fahrradmessungen

Die mobilen Fahrradmessungen (USifk) während VALR03 liefern die zeitliche und räumliche Verteilung einer Reihe umweltmeteorologischer Größen. Die gemessenen meteorologischen Parameter waren Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung, Luftdruck und Globalstrahlung. Zudem wurden die Luftverunreinigungen Feinstaub, Ruß, Stickstoffoxide und Ozon gemessen. Um die Daten mit speziellen Ereignissen in Verbindung zu bringen, war eine Videokamera an Bord. Die genaue Orts-Zeit-Positionierung wurde mit einem GPS (Global Positioning System) ermittelt. Die Route der mobilen Fahrradmessungen ist in Abbildung 3.7.24 dargestellt.

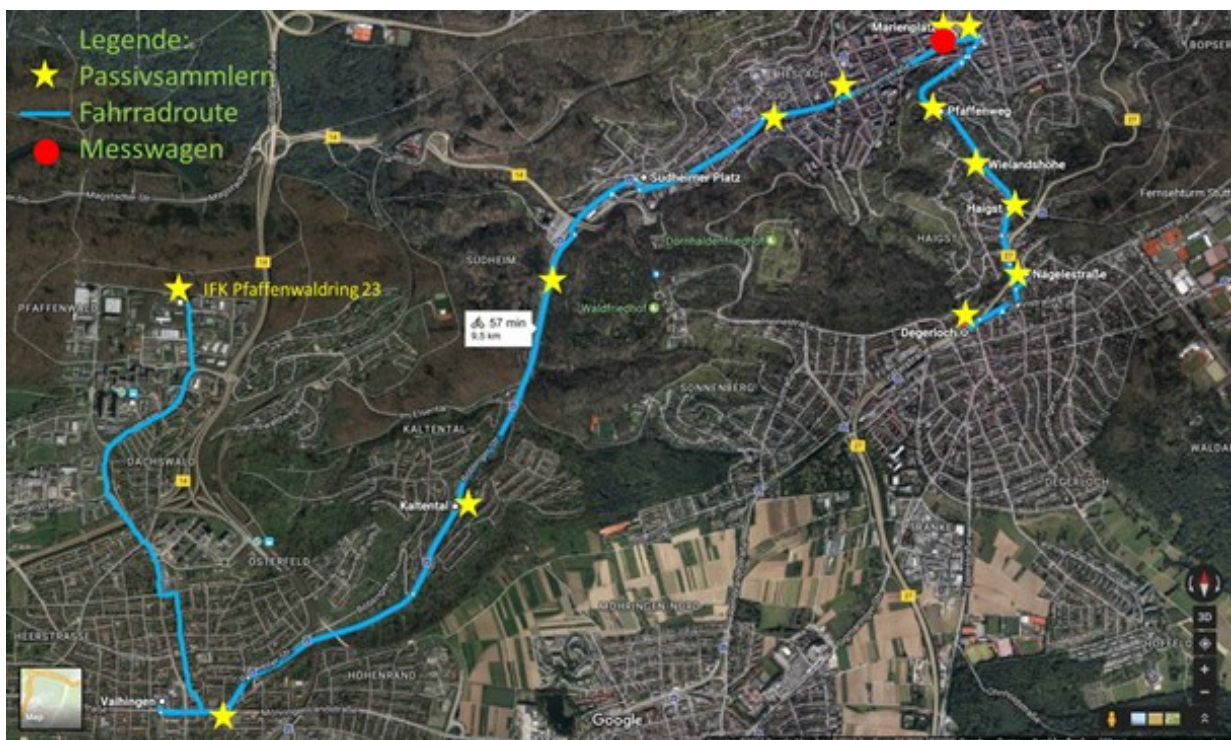


Abb. 3.7.24: Route der Fahrradmessungen. Quelle: Abdul Samad (USifk); Kartengrundlage: Google Earth.

Die durchschnittliche  $\text{NO}_2$ -Konzentration entlang der Messroute für sieben Runden im Zeitraum vom 25. bis 27.02.2017 ist in Abbildung 3.7.25 beispielhaft dargestellt. Die einzelnen Punkte repräsentieren jeweils einen Streckenabschnitt von 100 m entlang der Messroute. Für diese Streckenabschnitte wurde der Mittelwert aller vorhandenen Messwerte gebildet. Wie erwartet, wurden in den Straßenschluchten in der Nähe des Stadtzentrums hohe Konzentrationen für  $\text{NO}_2$  gemessen. Die Konzentrationen lagen dort überwiegend zwischen  $40.1 - 60.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Die Daten sind für die Periode vom 14.02.2017 6:00 bis zum 16.02.2017 6:00 UTC vorhanden und auf dem [UC]<sup>2</sup>-DMS als NetCDF-Files abgelegt.





Abb. 3.7.26: Stuttgart und Umland (links); Luftbild Marienplatz mit Standort des Messwagens (rechts, roter Kreis).  
Quelle: Abdul Samad (USifk). Kartengrundlage: Google Earth.

Als Beispiel der Ballonmessungen ist ein Vertikalprofil von einer Sondierung am 09.07.2018 zwischen 5:54 und 6:23 UTC in Abbildung 3.7.27 dargestellt.

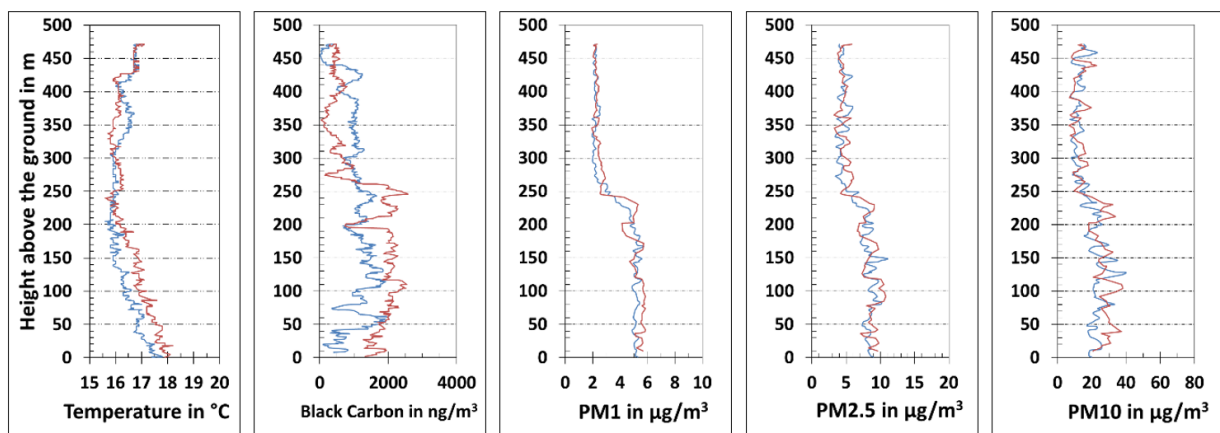


Abb. 3.7.27: Vertikalprofile für eine Sondierung am 09.07.2018 zwischen 5:54 und 6:23 UTC. Quelle: Abdul Samad (USifk).

Basierend auf den kontinuierlichen stationären Messungen am Marienplatz Stuttgart ist in Abbildung 3.7.28 der mittlere Tagesgang als Stundenmittelwerte der NO-, NO<sub>2</sub>- und O<sub>3</sub>-Konzentrationen für alle Wochentage der Periode März 2017 bis Dezember 2019 aufgetragen. Die Daten für die zweite Validierungsreferenzperiode (VALR04) vom 08.07. 4:00 bis zum 09.07.2018 19:00 UTC sind in zeitlich hochaufgelöster Form (Sekunden) vorhanden. Die gegenseitige Abhängigkeit der NO- und O<sub>3</sub>-Konzentrationen einerseits und

der  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen andererseits ist deutlich zu erkennen. In den Nachtstunden, wenn die Sonneneinstrahlung fehlt, dominiert der  $\text{O}_3$ -Abbau durch ständigen Nachschub von  $\text{NO}$  aus Verbrennungsprozessen. Das  $\text{O}_3$ -Minimum wird in den frühen Morgenstunden zwischen 6:00 und 8:00 UTC während des morgendlichen Berufsverkehrs erreicht. Die Neubildung von  $\text{O}_3$  kann nur tagsüber bei Vorhandensein von Sonneneinstrahlung erfolgen, das Maximum der  $\text{O}_3$ -Neubildung wird daher im Sommer an sonnigen Tagen in den Mittagsstunden erreicht.

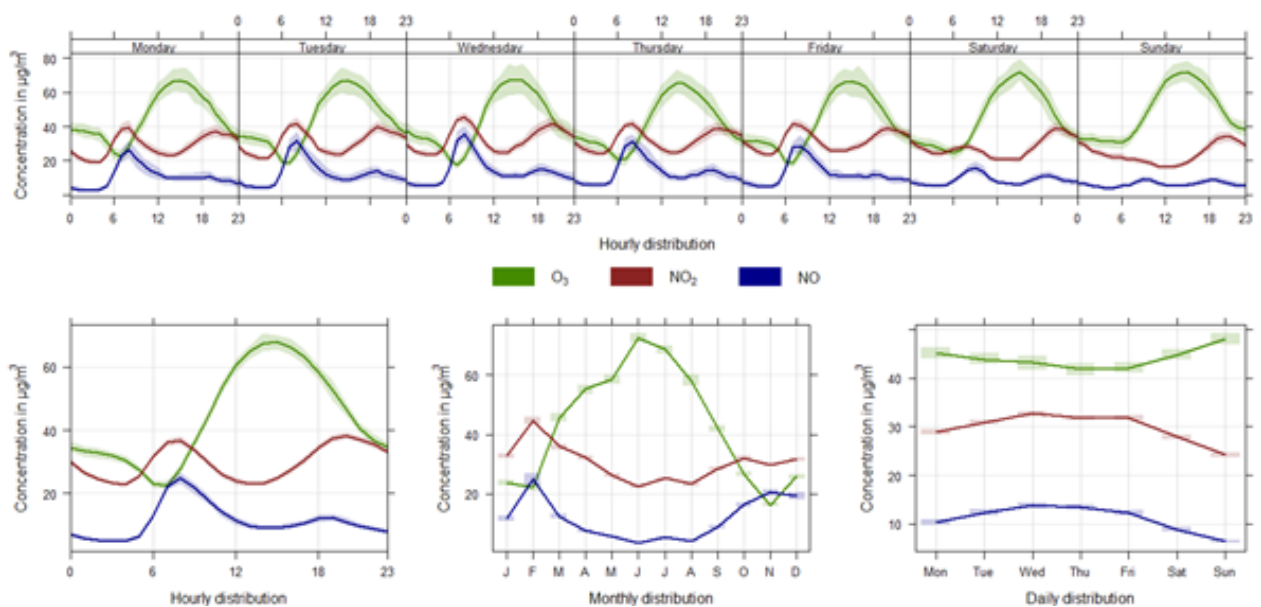


Abb. 3.7.28: Mittlerer Tagesgang (unten links), Monatsgang (unten mitte) und Wochengang (unten rechts) als Stundenmittelwert für die  $\text{NO}$ -  $\text{NO}_2$ - und  $\text{O}_3$ -Konzentrationen in der Periode von März 2017 bis Dezember 2019. Quelle: Abdul Samad (USIfk).

### Flugzeuggestützte Messungen

Zur Vorbereitung der IOP-4 wurden mit den Projektpartnern Treffen durchgeführt, um die bodengebundenen und flugzeuggestützten Messungen abzustimmen. Es wurden Flugmuster entwickelt, um eine Kombinierbarkeit und damit einen Mehrwert der Messungen zu erreichen. In Stuttgart wurde der Überflug des Talkessels mit der Innenstadt und den Messorten angestrebt. Das entwickelte Flugmuster (Abbildung 3.7.29) überquert die aufgereihten LTO- und IOP-Messorte in einer geraden Linie von Punkt 1 zu Punkt 2, um dann in einem Rechteck auf die Strecke zurückzukehren (blaue Linie). Dieses Flugmuster soll in verschiedenen Höhen wiederholt werden, bis die letzte Runde oberhalb der konvektiven Grenzschicht liegt. Außerdem sollten die Flüge zu Beginn und am Ende Vertikalprofile im östlichen Bereich beinhalten (blauer Kreis, 3.7.29). Weiterhin gab es Interesse daran, näher an den Messungen



Tab. 3.7.5: Auflistung der durchgeführten Flüge mit Flugzeiten und mittleren Windparametern. Für die Instrumentierung siehe 3.7.2.4.

Stadt	Nr.	Datum	Zeit (UTC)	Windrichtung	Windgeschwindigkeit
Stuttgart	1	08.07.2018	07:04 - 09:29	15°	3,2 m/s
	2	08.07.2018	11:03 - 13:33	330°	4,7 m/s
	3	09.07.2018	07:31 - 09:43	340°	2,6 m/s
	4	09.07.2018	11:17 - 13:45	340°	3,7 m/s
	5	13.07.2018	06:53 - 09:49	30°	1,4 m/s
	6	13.07.2018	11:03 - 13:14	310°	1,8 m/s

Ziel der Messkampagne in Stuttgart war die Vermessung der Evolution der verschmutzten Grenzschicht. Die Flüge wurden nach dem in der Vorbereitungsphase mit den Projektpartnern besprochenen Muster durchgeführt. Es fanden sechs Messflüge an drei Tagen jeweils vormittags und nachmittags statt. Es wurde ein Boxmuster in verschiedenen Höhen (0-3 km) geflogen (Abbildung 3.7.30). Ein zusätzlicher Überflug durch das Neckartal und ein Vertikalprofil bei der östlichen Ecke wurden realisiert. Auch fanden Flüge jeweils während der Überflugzeit von Sentinel-5P statt.

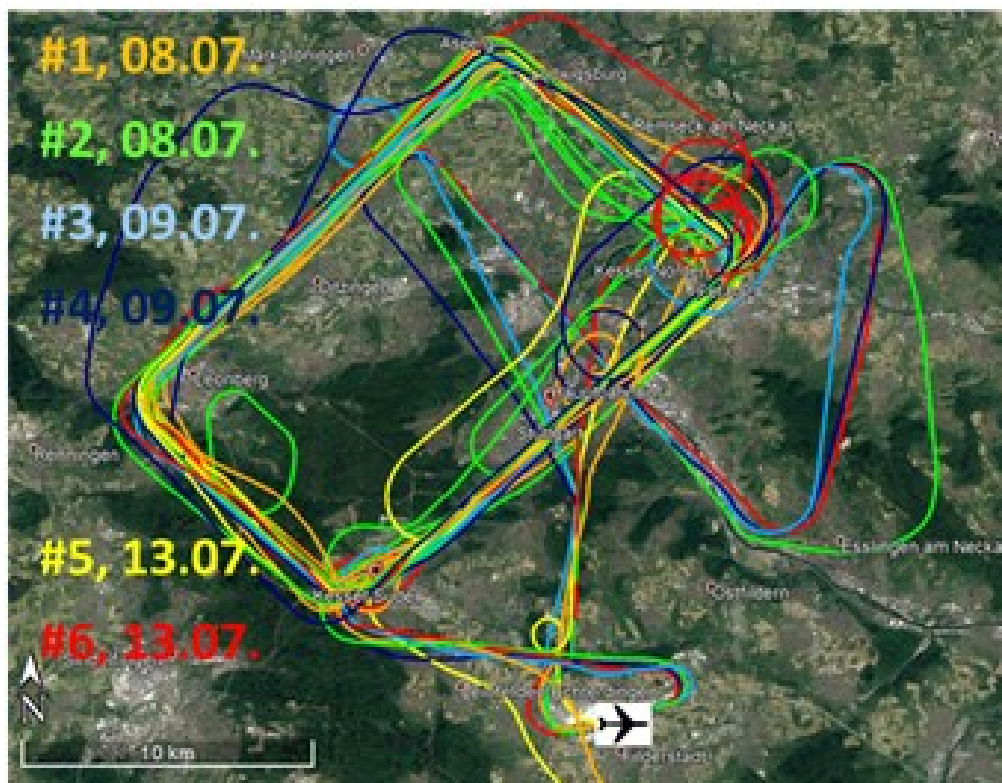


Abb. 3.7.30: Flugrouten der sechs Flüge über Stuttgart und dem Umland. Quelle: Anke Roiger (DLRpa) Kartengrundlage: Google Earth.

Ein Beispiel einer Befliegung samt Boxmuster und vertikaler Abtastung zeigt die Abbildung 3.7.31. Dargestellt sind Ergebnisse vom 09.7.2018, vormittags anhand der in-situ Messung von  $\text{NO}_2$ -Mischungsverhältnissen. Die erhöhten Werte in der unteren Grenzschicht, insbesondere über dem Neckartal sind deutlich zu erkennen.



Abb. 3.7.31: Befliegung Stuttgart vom 09.7.2018, vormittags. Dargestellt sind die in-situ  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen (© 2020 Google, Image Landsat/Copernicus). Quelle: Magdalena Pühl (DLRpa).

In Abbildung 3.7.32 wird exemplarisch der zeitliche Verlauf der Spurengasmessungen von  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$  und  $\text{NO}_2$  sowie die Flughöhe (y-Achsenbeschriftung rechts) auf dem Flug am 09.07.2018 vormittags über Stuttgart gezeigt. Die grauen Kästen kennzeichnen jeweils den Stadtbereich von Stuttgart. In diesem Zusammenhang sind in Abbildung 3.7.33 Vertikalprofile über Stuttgart am 09.07.2018 um 9:21 UTC aufgetragen. Die Grenzschichthöhe lag zu diesem Zeitpunkt ungefähr bei 1050 m ü. NN.



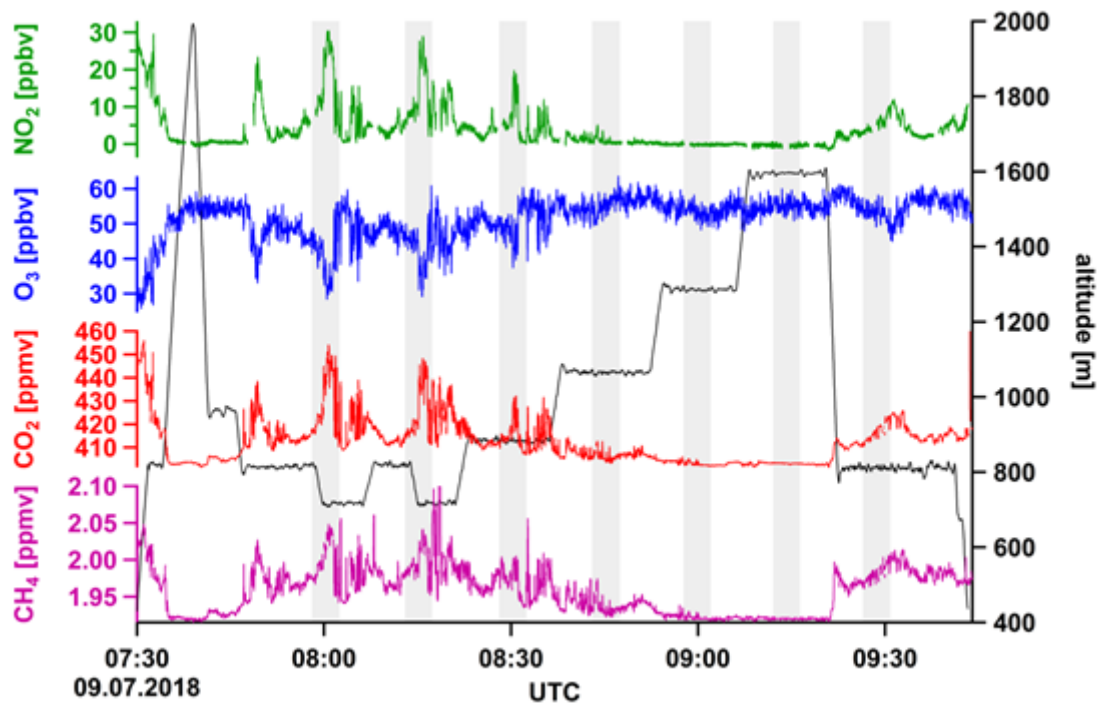


Abb. 3.7.32: Zeitlicher Verlauf der Spurengaskonzentrationen und Flughöhe auf dem Flug am 09.07.2018 am Vormittag über Stuttgart. Die grauen Kästen kennzeichnen den Stadtbereich von Stuttgart. Quelle: Magdalena Pühl (DLRpa).

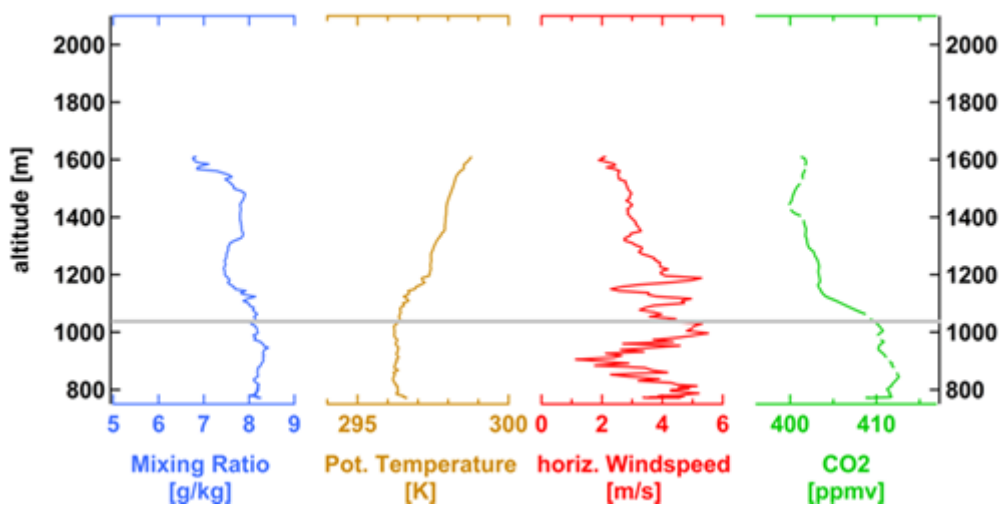


Abb. 3.7.33: Vertikalprofile über Stuttgart am 09.07.2018 um 9:21 UTC. Die Grenzschichthöhe lag zu diesem Zeitpunkt ungefähr bei 1050 m ü. NN. Quelle: Anke Roiger (DLRpa.)

## Satellitenbasierte Messungen

Durch Oversampling und Mittelung aller Überflüge über einen längeren Zeitraum ist Sentinel-5P/TROPOMI in der Lage, städtische Verschmutzungsinseln abzugrenzen (Müller et al., 2022). Abbildung 3.7.32 zeigt die monatliche mittlere troposphärische  $\text{NO}_2$ -Verteilung über Stuttgart für Juli 2018, berechnet aus 31 Überführungen mit einer räumlichen Auflösung von  $0,01 \times 0,01$ . Es wird deutlich, dass die städtische Schadstoffinsel Stuttgart klar abgebildet ist und der Topographie folgt. Die erhöhten Werte reichen auch neckaraufwärts (Stuttgart bis Esslingen am Neckar und weiter flussaufwärts). Die Innenstadt weist Höchstwerte von  $6,0 \cdot 10^{-5} \text{ mol/m}^2$  auf. Trotz der beispiellosen räumlichen Auflösung von TROPOMI muss betont werden, dass aufgrund der physikalischen Einschränkungen nur die städtische Hintergrundbelastung gemessen werden kann. Obwohl die nominelle räumliche Auflösung von TROPOMI immer noch grob ist, um Variationen innerhalb von Städten wie Stuttgart abzubilden, werden die topographischen Effekte relativ gut erfasst. Aspekte zu Einschränkungen und Genauigkeit finden sich ausführlicher bei Müller et al. (2022).

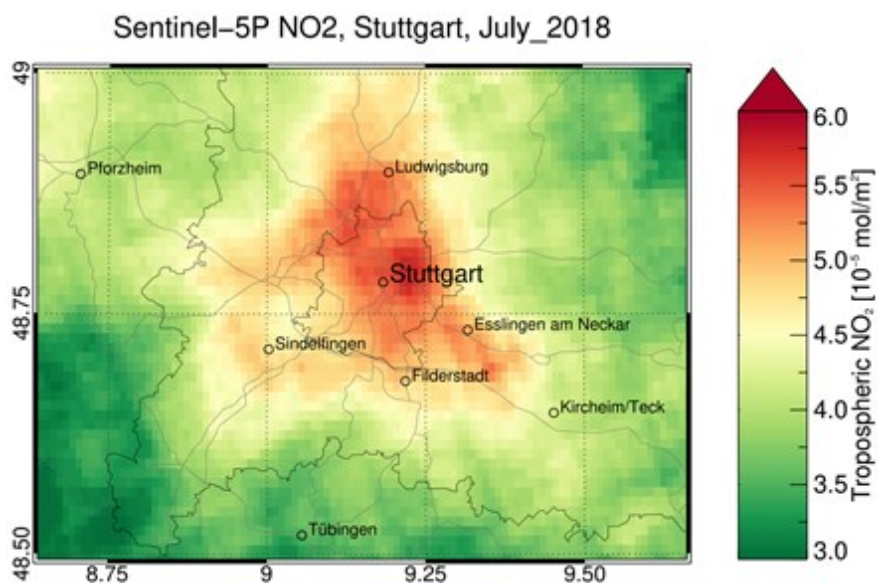


Abb. 3.7.34: Die städtische Verschmutzungsinsel von Stuttgart kartiert durch Sentinel-5P/TROPOMI. Dargestellt ist der Mittelwert des troposphärischen  $\text{NO}_2$  für Juli 2018. Quelle: Thilo Erbertseder (DLRdfd).

Im Projekt [UC]<sup>2</sup> wurde gezeigt, dass TROPOMI die Detektion von urbanen Abluftfahnen ermöglicht und dass das Instrument in der Lage ist, Spurengase in der urbanen Grenzschicht zu detektieren. Satellitenbasierte Beobachtungen von Sentinel-5P/TROPOMI haben ihr Potenzial für die Kartierung von städtischen Verschmutzungsinseln und Abluftfahnen sogar in Städten mit komplexem Gelände wie Stuttgart gezeigt. Das Monatsmittel des troposphärischen  $\text{NO}_2$  im Juli 2018 konnte die Ausdehnung der städtischen Schadstoffinsel Stuttgart abgrenzen und den Transport von  $\text{NO}_2$  den Neckar flussaufwärts nachweisen.

TROPOMI stellt eine Ergänzung zu herkömmlichen Messverfahren zur Kartierung stadtwweiter und mesoskaliger Spurengasverteilungen, sowie zu vertikal integrierten Datensätzen zur dreidimensionalen Evaluierung von Stadtklimamodellen dar. Geostationäre Satelliten wie der geplante Sentinel-4 werden zusätzlich die Beobachtung von Tagesgängen ermöglichen, was der Untersuchung der Spurengasvariabilität und der Bewertung von Stadtklimamodellen eine weitere Dimension hinzufügt.

#### 4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Der vorliegende Teil 1 des [UC]<sup>2</sup>-Evaluierungsberichts umfasst das Evaluierungskonzept sowie die Beschreibung der qualitätsgeprüften Referenzdaten und stellt damit die Basis für eine umfangreiche Validierung von PALM-4U dar. In Teil 2 des [UC]<sup>2</sup>-Evaluierungsberichts werden die Evaluierungsergebnisse vorgestellt. Ferner werden Kerndiagnostiken beschrieben, welche die Grundlage für ein weiterentwickeltes Evaluierungskonzept für moderne Stadtklimamodelle schaffen sollen.

Sämtliche Daten, die während [UC]<sup>2</sup> in Berlin erhoben und qualitätsgeprüft wurden sowie die [UC]<sup>2</sup> Research Licence oder die [UC]<sup>2</sup> Open Licence besitzen, werden, gemäß der Open Science Politik des BMBF, nach Abschluss der Fördermaßnahme der Öffentlichkeit über das in [UC]<sup>2</sup> entwickelte 'Berlin Datenportal' zur Nutzung zur Verfügung gestellt. Auch in [UC]<sup>2</sup> entwickelte Werkzeuge und Konzepte wie z. B. automatisierte Routinen zur Auswertung der Daten, zur Validierung des Modells sowie zur Visualisierung der Modellergebnisse werden in dieses Datenportal eingestellt. Bereits während der Laufzeit der Fördermaßnahme standen die mit einer [UC]<sup>2</sup> Research Licence oder der [UC]<sup>2</sup> Open Licence versehenen Daten über das DMS für die öffentliche Nutzung bereit.

Im Rahmen der Verstetigung von PALM-4U sollen die Referenzdaten zukünftig automatisiert zur Evaluation verschiedener, für Wissenschaft und Praxis relevanten Weiterentwicklungen von PALM-4U genutzt werden können. Hierzu ist eine aktive Teilnahme verschiedener Modul B Partner\*innen an der Verstetigung von PALM-4U in der Forschung wie z. B. für die Qualitätssicherung neuer Modellversionen geplant.

Insgesamt stehen daher nach Ende der Fördermaßnahme umfangreiche Datensätze sowie verschiedenste Werkzeuge und Konzepte sowohl für die Erforschung dreidimensionaler atmosphärischer Prozesse in der Stadt und dem Umland als auch für eine dem Klimawandel angepasste Entwicklung von Siedlungsräumen in städtebaulichen Verfahren sowie für neue Anwendungsfelder zur Verfügung.

## Danksagung

Das BMBF fördert die Maßnahme 'Stadtklima im Wandel' - Urban Climate under Change [UC]<sup>27</sup> im Rahmen der Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA; [www.fona.de](http://www.fona.de)). Die Fördermaßnahme wird vom DLR Projektträger betreut (<https://www.dlr.de/pt>). Die Autoren danken allen Projektleitern, Wissenschaftlern und weiteren Beteiligten der Fördermaßnahme, die mit ihrer Arbeit einen Beitrag zu diesem Evaluierungsbericht geleistet haben.

---

<sup>7</sup> Förderkennzeichen der Verbünde in Phase 1 der Maßnahme: MOSAIK: 01LP1601A-I, 3DO: 01LP1602A-P, KliMoPrax: 01LP1603A-E, UseUClim: 01LP1604A-B  
Förderkennzeichen der Verbünde in Phase 2 der Maßnahme: MOSAIK-2: 01LP1911A-I, 3DO+M: 01LP1912A-L, ProPolis: 01LP1913A-E

## Abkürzungsverzeichnis

3DO	Dreidimensionale Observierung atmosphärischer Prozesse in Städten
3DO+M	Dreidimensionale Observierung und Modellierung atmosphärischer Prozesse in Städten
AG	Arbeitsgruppe
asl	Above sea level
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CBL	Convective Boundary Layer bzw. konvektive Grenzschicht
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
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMS	Datenmanagementsystem
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage)
ENVI-met	Mikroklimasimulationssoftware
EWTL	Environmental Wind Tunnel Laboratory (Grenzschichtwindkanal)
Fa.	Firma

GIS	Geographisches Informationssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GUI	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)
IBP	Fraunhofer Institut für Bauphysik
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)
K	Kelvin
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
MOSAIK-2	Model-based city planning and application in climate change 2
MobiLab	Mobiles Messfahrzeug des Forschungszentrums Jülich
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
NRMSE	Normalized root mean squared error
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)

PKW	Personenkraftwagen
PM	Particulate Matter (Feinstaub)
ppb	parts per billion ( $10^{-9}$ )
ppm	parts per million ( $10^{-6}$ )
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	turbulenzkinetische Energie (TKE)
TU	Technische Universität
TUB	Technische Universität Berlin
UAVs	Unmanned Aerial Vehicles (unbemannte Luftfahrzeuge)
[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, Zonenziffer 32
VALM	Zu evaluierende Modellsimulationen
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

Baklanov, A., Schlünzen, K., Suppan, P., Baldasano, J., Brunner, D., Aksoyoglu, S., Carmichael, G., Douros, J., Flemming, J., Forkel, R., Galmarini, S., Gauss, M., Grell, G., Hirtl, M., Joffre, S., Jorba, O., Kaas, E., Kaasik, M., Kallos, G., Kong, X., Korsholm, U., Kurganskiy, A., Kushta, J., Lohmann, U., Mahura, A., Manders-Groot, A., Maurizi, A., Moussiopoulos, N., Rao, S. T., Savage, N., Seigneur, C., Sokhi, R. S., Solazzo, E., Solomos, S., Sørensen, B., Tsegas, G., Vignati, E., Vogel, B., Zhanget, Y. (2014): Online coupled regional meteorology chemistry models in Europe: current status and prospects. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 317–398. <https://doi.org/10.5194/acp-14-317-2014>.

Bruse, M. (1999): Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, [urn:nbn:de:hbz:294-1169](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:294-1169).

Bruse, M. (2007): Simulating human thermal comfort and resulting usage patterns of urban open spaces with a Multi-Agent System, in: Wittkopf, St. and Tan, B. K. (eds.): Proceedings of the 24th International Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA, 699-706 .

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>

Calhoun, R., R. Heap, M. Princevac, R. Newsom, H. Fernando, and D. Ligon, (2006): Virtual towers using coherent doppler lidar during the joint urban 2003 dispersion experiment. *Journal of Applied meteorology and climatology*, 45 (8), 1116–1126. DOI: 10.1175/JAM2391.1.

Damian, V., Sandu, A., Damian, M., Potra, F. (2002): The kinetic preprocessor KPP—A software environment for solving chemical kinetics. *Computers & Chemical Engineering*, 26(11), 1567-1579. DOI: [10.1016/S0098-1354\(02\)00128-X](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(02)00128-X).

Di Sabatino, S., Buccolieri, R., Olesen, H. R., Ketzler, M., Berkowicz, R., Franke, J., Schatzmann, M., Schlünzen, K. H., Leitl, B., Britter, R., Borrego, C., Costa, A. M., Castelli, S. T., Reisin, T. G., Hellsten, A., Saloranta, J., Moussiopoulos, N., Barmpas, F., Brzozowski, K., Goricsan, I., Balczo, M., Bartzis, J. G., Efthimiou, G., Santiago, J. L., Martilli, A., Piringer, M., Baumann-Stanzer, K., Hirtl, M., Baklanov, A. A., Nuterman, R.B., Starchenko, A. V. (2011), COST 732 in practice: the MUST model evaluation exercise, *International Journal of Environment and Pollution (IJEP)*, Vol. 44, No. 1/2/3/4.

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., und 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, 5307–5329, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-5307-2021>.

Gillner S., Vogt J., Tharang A., Dettmann S., Roloff, A. (2015): Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites. *Landscape and Urban Planning* 143:33–42.

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

Gronemeier, T. und 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>.

Gross, G. (2015): Dispersion scenarios for pollution release in an occupied underground station – a numerical study with a micro-scale and a multi-agent model. *Met. Z.*, Vol. 24(5), 511 - 524. DOI: [10.1127/metz/2015/0680](https://doi.org/10.1127/metz/2015/0680).

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).

Hecht, R., Münzinger, M., Poglitsch, H., Hartmann, A. (2017): Grünvolumenbestimmung der Stadt Dresden auf der Grundlage von Laserscandaten 2017. Leibniz Institut für ökologische Raumentwicklung.

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., Neggens, 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).

Hellsten, A., Ketelsen, K., Sühling, M., Auvinen, M., Maronga, B., Knigge, C., Barmpas, F., Tsegas, G., Moussiopoulos, N., und Raasch, S. (2021): A nested multi-scale system implemented in the large-eddy simulation model PALM model system 6.0, *Geoscientific Model Development*, 14, 3185–3214, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3185-2021>.

Heusinger, J., und Weber, S. (2017a). Surface energy balance of an extensive green roof as quantified by full year eddy-covariance measurements. *Science of the Total Environment*, 577, 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.168>.

Heusinger, J., und Weber, S. (2017b). Extensive green roof CO<sub>2</sub> exchange and its seasonal variation quantified by eddy covariance measurements. *Science of the Total Environment*, 607–608, 623–632. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.052>.

IMuK (2022): PALM Input Data Standard („PIDS“) für das Static input file: <https://palm.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/doc/app/iofiles/pids/static> (Aufruf am 26.04.2022).

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.

Kato, M. und Launder, B. E. (1993): The Modelling of Turbulent Flow around Stationary and Vibrating Square Cylinders, in *Proceedings of the 9th Symposium on Turbulent Shear Flows*, Kyoto, Japan.

Khan, B., Banzhaf, S., Chan, E. C., Forkel, R., Kanani-Sühling, F., Ketelsen, K., Kurppa, M., Maronga, B., Mauder, M., Raasch, S., Russo, E., Schaap, M., und Sühling, M. (2021): Development of an atmospheric chemistry model coupled to the PALM model system 6.0: implementation and first applications, *Geoscientific Model Development*, 14, 1171–1193, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-1171-2021>.

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).

Kiseleva, O., Adler, B., Kalthoff, N., Kohler, M., Wieser, A., Wittkamp, N. (2019): Data set of meteorological observations (wind, temperature, humidity) collected from a microwave radiometer and lidar measurements during four intensive observations periods in 2017 and 2018 in Stuttgart, Germany, under the BMBF Programme ‘Urban Climate Under Change’ [UC]2). <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000093534>.

Kokkola, H., Korhonen, H., Lehtinen, K.E.J., Makkonen, R., Asmi, A. (2008): SALSA - a Sectional Aerosol module for Large Scale Applications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, European Geosciences Union, 8(9), 2469-2483. (hal-00296541).

Konopka, J., Heusinger, J., & Weber, S. (2021): Extensive Urban Green Roof Shows Consistent Annual Net Uptake of Carbon as Documented by 5 Years of Eddy-Covariance Flux Measurements. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(2). <https://doi.org/10.1029/2020JG005879>.

Krč, P., Resler, J., Sühling, M., Schubert, S., Salim, M. H., und Fuka, V. (2021): Radiative Transfer Model 3.0 integrated into the PALM model system 6.0, *Geoscientific Model Development*, 14, 3095–3120, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3095-2021>.

Kurppa, M., Hellsten, A., Roldin, P., Kokkola, H., Tonttila, J., Auvinen, M., Kent, C., Kumar, P., Maronga, B., und Järvi, L. (2019): Implementation of the sectional aerosol module SALSA2.0 into the PALM model system 6.0: model development and first evaluation, *Geoscientific Model Development*, 12, 1403–1422, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1403-2019>.

Lillisand, T.M., Keifer, R.W., Chipman, J.W. (2004): Remote sensing and image interpretation. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons.

López, S. D., C. Lüpkes, K. H. Schlünzen (2005): The effect of different k-e closures on the results of a micro-scale model for the flow in the obstacle layer. *Meteorologische Zeitschrift*, 14 (6), 839-848, DOI:10.1127/0941-2948/2005/0084.

Lundgren, K., Hohenegger, C., Ament, F., Beyrich, F., Löhnert, U., Göber, M., Rust, H., Sakradzija, M., Bastak-Duran, I., Masbou, M., Jahnke-Bornemann, A. (2022): FESSTVaL: Field Experiment on sub-mesoscale spatio-temporal variability in Lindenberg – the campaign, first results and data availability, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-8889, DOI: 10.5194/egusphere-egu22-8889.

Mann, J., Menke, R., Vasiljević, N., Berg, J., Troldborg, N. (2018): Challenges in using scanning lidars to estimate wind resources in complex terrain. - *J. Phys.: Conf. Ser.* 1037 072017, DOI: 10.1088/1742-6596/1037/7/072017.

Maronga, B., Gryschka, M., Heinze, R., Hoffmann, F., Kanani-Sühring, F., Keck, M., Ketelsen, K., Letzel, M. O., Sühring, M., und Raasch, S. (2015): The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives, *Geoscientific Model Development*, 8, 2515–2551, <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2515-2015>.

Maronga, B., Groß, G., Raasch, S., Banzhaf, S., Forkel, R., Heldens, W., Kanani-Sühring, F., Matzarakis, A., Mauder, M., Pavlik, D., Pfafferott, J., Schubert, S., Seckmeyer, G., Sieker, H., Trusilova, K. (2019): 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., Banzhaf, S., Burmeister, C., Esch, T., Forkel, R., Fröhlich, D., Fuka, V., Gehrke, K. F., Geletič, J., Giersch, S., Gronemeier, T., Groß, G., Heldens, W., Hellsten, A., Hoffmann, F., Inagaki, A., Kadasch, E., Kanani-Sühring, F., Ketelsen, K., Khan, B. A., Knigge, C., Knoop, H., Krč, P., Kurppa, M., Maamari, H., Matzarakis, A., Mauder, M., Pallasch, M., Pavlik, D., Pfafferott, J., Resler, J., Rissmann, S., Russo, E., Salim, M., Schrempf, M., Schwenkel, J., Seckmeyer, G., Schubert, S., Sühring, M., von Tils, R., Vollmer, L., Ward, S., Witha, B., Wurps, H., Zeidler, J., and Raasch, S. (2020): Overview of the PALM model system 6.0, *Geosci. Model Dev.*, 13, 1335–1372. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1335-2020>.

Matzarakis, A. und Matuschek, O. (2011): Sky view factor as a parameter in applied climatology – rapid estimation by the SkyHelios model. *Met. Z.* Vol 20(1), 39-45. DOI: [10.1127/0941-2948/2011/0499](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/0499).

Matzarakis, A, Rutz, F., Mayer, H. (2010): Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *Int. J. Biometeorol.*, 54, 131–139. DOI: [10.1007/s00484-009-0261-0](https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0).

Meier, F. (2019): Interner Bericht zu Vergleichsmessungen der Lufttemperatur und relativen Feuchte in der Klimakammer. BMBF Verbundprojekt Dreidimensionale Observierung atmosphärische Prozesse in Städten. Fachgebiet Klimatologie, Institut für Ökologie, Technische Universität Berlin, 26. S. (unveröffentlicht).

Müller, I., Erbertseder, T. und Taubenböck, H. (2022): Tropospheric NO<sub>2</sub>: Explorative Analyses of Spatial Variability and Impact Factors, *Rem. Sens. Env.*, Volume 270, 112839, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112839>.

Pfafferott, J., Reißmann, S., Sühling, M., Kanani-Sühling, F., und Maronga, B. (2021): Building indoor model in PALM-4U: indoor climate, energy demand, and the interaction between buildings and the urban microclimate, *Geoscientific Model Development*, 14, 3511–3519, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3511-2021>.

Pühl, M. (2019): Performance and Analysis of Airborne Observations of Nitrogen Dioxide and Ozone Concentrations over the German Cities Stuttgart and Berlin. Masterarbeit, Fakultät für Physik, Technische Universität München.

Raasch, S. und 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., Krč, P., Belda, M., Jurus, P., Benesova, N., Lopata, J., Vlcek, O., Damaskova, D., Eben, K., Derbek, P., Maronga, B., Kanani-Sühling, F. (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).

Sandu, A. und Sander, R. (2006): Technical Note: Simulating chemical systems in Fortran90 and Matlab with the Kinetic PreProcessor KPP-2.1 *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 187–195. DOI: [10.5194/acpd-5-8689-2005](https://doi.org/10.5194/acpd-5-8689-2005).

Sandu, A., Daescu, D.N., Carmichael, G.R. (2003): Direct and adjoint sensitivity analysis of chemical kinetic systems with KPP: Part I—theory and software tools. *Atmospheric Environment* 37(36), 5083–5096. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.08.019>.

Scherer, D., Fehrenbach, U., Grassmann, T., Holtmann, A., Kerschbaumer, A., Krug, A., Meier, F., Petersen, E., Philipp, A., Scherber, K., Welsch, J., Schneider, C., Venkatraman Jagatha, J., Fritz, S., Sodoudi, S., Langer, I., Werner, J., Ulbrich, U., Weber, S., Gerling, L., Meyer-Kornblum, A., Schneidmesser, E. von, Villena, G., Klemp, D., Dubus, R., Javed, U., Wegener, R., Adler, B., Emeis, S., Holst, C., Kalthoff, N., Kiseleva, O., Kohler, M., Wieser, A., Zeeman, M., Vogt, U., Samad, A., Goldberg, V., Queck, R., Ament, F., Leitl, B., Surm, K., Wiesner, S., Koßmann, M., Becker, R., Heene, V., Hodan, C., Stanislavsky, P., Groß, G., Meusel, G., Trute, P., Büter, B., Pavlik, D., Erbertseder, T., Roiger, A., Klausner, T., Pühl, M. (2021): Dreidimensionale Observierung atmosphärischer Prozesse in Städten – 3DO. Schlussbericht des Verbundvorhabens 3DO. <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-11314>.

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](https://doi.org/10.1127/metz/2019/0913).

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).

Steuri, B. und Heese, I. (Hrsg., 2019): Evaluationsbericht zur Praxistauglichkeit von PALM-4U. [https://www.uc2-propolis.de/imperia/md/assets/propolis/images/190531\\_stadtklima\\_palm-4u\\_c\\_evaluation\\_bericht\\_final.pdf](https://www.uc2-propolis.de/imperia/md/assets/propolis/images/190531_stadtklima_palm-4u_c_evaluation_bericht_final.pdf) (Zugriff: November 2021).

Straaten, A., Weber, S. (2021): Measurement report: Three years of size-resolved eddy-covariance particle number flux measurements in an urban environment, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 18707–18726, DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-21-18707-2021>.

Vasiljević, N., Palma, J. M. L. M., Angelou, N., Matos, J. C., Menke, R., Lea, G., Mann, J., Courtney, M., Ribeiro, L. F., Gomes, V. M. M. G. C. (2017): Perdigão 2015: Methodology for atmospheric multi-Doppler lidar experiments. - *Atmos. Meas. Tech.* 10, 3463–3483, DOI: [10.5194/amt-10-3463-2017](https://doi.org/10.5194/amt-10-3463-2017).

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (2017a): Umweltmeteorologie. Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung. VDI-Richtlinie 3783 Blatt 9, Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN, Berlin Beuth Verlag.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (2017b): Umweltmeteorologie. Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle. VDI 3783 Blatt 7 - Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder. Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN, Berlin, Beuth-Verlag.

Wang, Q., Adiku, S., Tenhunen, J., and Granier, A. (2005): On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote sensing of environment*, 94(2), 244-255.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.2.1: Konzept zur Evaluierung von PALM-4U. 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. Quelle: Scherer et al. 2019a.....	8
Abb. 1.2.2: LTOs in Berlin (schwarze Linie: Stadtgrenze) im Rahmen von [UC] <sup>2</sup> . Daten der LTOs werden von folgenden Institutionen bereitgestellt (Akronyme siehe Annex 1): SenUVKB, Berliner Luftgüte Messnetz (BLUME) (gelbe Pentagone); DWD (Cyan-Kreise); FUBmeteo (hellgrüne Quadrate); HUBgeo (dunkelgrüne Sterne); TUBklima: (rote Diamanten); TUBSgeo (dunkelblaue Dreiecke). Kartenquelle: OpenStreetMap – veröffentlicht unter OdbL 1.0. Quelle: Scherer et al. 2019b.....	11
Abb. 1.2.3: IOLs in Berlin (Akronyme siehe Annex 1). Links: TUB Campus Charlottenburg; rechts: Rothenburgstraße, Steglitz. Rote Kreise: maßstabsgetreue Modelle (Radius 875 m) für Windkanalversuche (EWTL) des UHHmeteo; gelbe Kreise: zu analysierende Bereiche (Radius 675 m). Die Kartendarstellungen sind in WGS84 / Pseudo-Mercator-Projektion. Koordinaten an Bildrändern sind in UTM33 angegeben. Kartenquelle: © 2017 GeoBasis-DE / BKG (© 2009), Google. Quelle: Scherer et al. 2019b.....	12
Abb. 1.2.4: LTOs in Hamburg (schwarze Linie: Stadtgrenze) im Rahmen von [UC] <sup>2</sup> . Daten der LTOs werden von folgenden Institutionen bereitgestellt (Akronyme siehe Annex 1): DWD (Cyan-Kreise); UHHmeteo (orangefarbene Dreiecke). Kartenquelle: OpenStreetMap - veröffentlicht unter ODbL 1.0. Quelle: Scherer et al. 2019b.....	13
Abb. 1.2.5: IOL in der Hamburger HafenCity (Akronyme siehe Annex 1). Roter Kreis: Modell (1: 500; Radius 875 m) zur Verwendung durch Windkanalversuche (EWTL) des UHHmeteo; gelber Kreis: zu analysierende Fläche (Radius 675 m). Die Bilder sind in WGS84 / Pseudo-Mercator-Projektion. Koordinaten an Bildrändern sind in UTM32. Kartenquelle: © 2017 GeoBasis-DE / BKG (© 2009), Google. Quelle: Scherer et al. 2019b.....	14
Abb. 1.2.6: LTOs in Stuttgart (schwarze Linie: Stadtgrenze) im Rahmen von [UC] <sup>2</sup> . Daten der LTOs werden von folgenden Institutionen bereitgestellt (Akronyme siehe Annex 1): Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (lila Sterne); AfUSklima (weiße Diamanten); DWD (Cyan-Kreise), Universität Hohenheim (graues Quadrat), USifk (rosa Dreiecke). Kartenquelle: OpenStreetMap - veröffentlicht unter ODbL 1.0. Quelle: Scherer et al. 2019b.....	15
Abb. 1.2.7: IOL in Stuttgart (Akronyme siehe Annex 1). Rotes Rechteck: Modell im Maßstab (1: 500; Ausdehnung 875 m) für Windkanalversuche des UHHmeteo; gelbes Rechteck: zu analysierende Fläche (Ausdehnung 675 m). Die Bilder befinden sich in S84 / Pseudo-Mercator-Projektion. Koordinaten an Bildrändern sind in UTM32. Kartenquelle: © 2017	



GeoBasis-DE / BKG (© 2009), Google. Quelle: Scherer et al. 2019b.....	16
Abb. 2.3.1: Visualisierung des mit der PALM-4U GUI erstellten statischen Treibers. Der rote Rahmen kennzeichnet die parent domain (4000 m x 4000 m) und der blaue Rahmen die child domain (400 m x 400 m). Vegetationsflächen sind in grün gekennzeichnet und Gebäude in rot. Graue und weiße Areale sind Asphaltflächen. Quelle: J. Heusinger (TUBSgeo). .....	33
Abb. 2.3.2: Meteorologische Bedingungen während des Simulationszeitraums am 30.07.2017 an der auf dem Gründach BER befindlichen Messstation. Die auf dem Gründach gemessenen sensiblen ( $Q_H$ ) und latenten ( $Q_E$ ) Wärmeflüsse, sowie die volumetrische Bodenfeuchte (VWC) sind ebenfalls dargestellt. Quelle: J. Heusinger (TUBSgeo).....	34
Abb. 2.3.3: Simulationsgebiet (Orographie plus Gebäude) mit Messstationen (Dreieck – Lidar, Viereck – Radiosonde): Rathaus (cityhall), Amt für Umweltschutz (cityafus), Schnarrenberg (msschnarren). Das gepunktete Viereck von 3 x 3 km <sup>2</sup> markiert das Gebiet für die Varianzberechnung. Quelle: KITimktro. ....	37
Abb. 2.3.4: (a) Zeitlicher Verlauf der Grenzschichthöhe abgeleitet aus Ceilometerdaten an msschnarr (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 msschnarr. (b) Profile der potentiellen Temperatur $\theta$ , der spezifischen Feuchte q, u- und v-wind Komponenten von Radiosonden an msschnarr 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 der Beobachtung (rot) bzw. der Simulation (blau). Quelle: KITimktro.....	38
Abb. 2.3.5: Zeitreihen von Vertikalwinden auf der Höhe von 350 m agl, (a) stündlich gleitend (b) dreistündlich gleitend 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 $\sigma_w, 3 \times 32$ und die durchgezogene schwarze Linie in a) stündlich gleitende in b) dreistündlich gleitende Mittelwerte, die aus $\sigma_w, 3 \times 32$ berechnet sind. Die Standardabweichung ist grau hinterlegt. Quelle: KITimktro. ....	39
Abb. 2.3.6: Links: Simulationsgebiet (Orographie plus Gebäude). Rechts: Ausschnitt des Simulationsgebiets mit Messstationen (Dreieck – Lidar, Kreise – virtuelle Masten, Vierecke – Radiosonde/Fesselsonde): Erwin-Schöttle-Platz (erwschoettpl), Rathaus (cityhall), Schnarrenberg (msschnarren) und virtuelle Masten 1-6 (wolfram, uthbherzogen, naehter, citycannstat, bcmercedes, citywera). Quelle: KITimktro.....	40
Abb. 2.3.7: Parent- und Child-Domain; Basissimulation für Dresden als graue Quadrate, die Blätter symbolisieren Bäume, an denen meteorologische Messungen durchgeführt wurden.	

Quelle: TUDDmeteo.....	43
Abb. 2.3.8: Voxelrepräsentation der Blattflächendichte abgeleitet aus Messungen mit einem terrestrischen Laserscanner, Kantenlänge 0,1 m. Quelle: TUDDmeteo. ....	45
Abb. 2.3.9: Modellgebiete der Parent und Child Domain der realistischen PALM-4U Simulation rund um den Wettermast Hamburg am östlichen Stadtrand. Quelle Satellitenbild: Google Earth.....	46
Abb. 2.3.10: Standorte der Sondermessungen, bestehend aus einer Theodor-Friedrichs-Station am Maschsee, vier Thies-Stationen an Straßenlaternen im Altenbekener Damm sowie zwei Drohnen DJI Flamewheel 550 mit angehängter Radiosonde DFM-06 von GRAW. Quelle: Gregor Meusel (LUHimuk).....	47
Abb. 2.3.11: Horizontales 5 m Raster der Eingangsdaten des Statischen Treibers für die Südstadt Hannovers, erstellt nach dem PALM-4U-Eingangsdatenstandard. Quelle: LUHimuk 2022.....	50
Abb. 2.3.12: Horizontales 5 m-Raster der Geländehöhe des Statischen Treibers für die Südstadt Hannovers. Quelle: LUHimuk 2022. ....	51
Abb. 2.3.13: Lage der Parentdomain und der zwei Childdomains für die PALM-4U Simulationen in Augsburg, stationäres Messnetz und Messorte der Flüge mit unbemannten Luftfahrtsystemen (UAS) zur Erhebung von Vertikalprofilen. Quelle: UAgeo.....	55
Abb. 2.6.1: Ergebnisse einer gesamtstädtischen Simulation für Berlin für die IOP-4 mit dem mesoskaligen Chemie-Transportmodell Polyphemus/DLR. Dargestellt sind Vergleiche mit in-situ Messungen der bodennahen NO <sub>2</sub> -Konzentration (Stundenmittel) für Verkehrsstationen (links oben), Stationen des städtischen Hintergrunds (rechts oben), vorstädtischen Hintergrunds (rechts unten) und des stadtnahen Hintergrunds (links unten). Quelle: Thilo Erbertseder (DLRdfd). ....	57
Abb. 2.6.2: Simulationsergebnisse der Lufttemperatur in 2 m ü.G. mit dem Modell MUKLIMO_3 (Mikroskaliges Urbanes KLimaMOdel) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) der IOP-2 vom 31.07.2017 9:00 UTC bis zum 01.08.2017 8:00 UTC, Berlin, gesamtstädtisch. Links oben ist die gesamte Stadt dargestellt (0:00 UTC). Rechts wird der Tagesgang von zwei ausgewählten Stationen, eine innerstädtische Station (Schillerstr.) und eine am nördlichen Stadtrand von Berlin (Tegel Forstamt), gezeigt. Links unten ist die Korrelation der simulierten 2 m Temperatur zu den Beobachtungsdaten über 24 h dargestellt. Bereiche mit einer systematischen Über- bzw. Unterschätzung der Temperatur von +/-2 K sind eingezeichnet. Quelle: Ines Langer (FUBmeteo).....	58
Abb. 2.6.3: Simulationsergebnisse für die Lufttemperatur und die Relative Feuchte in 2 bzw. 3 m ü.G. mit dem mikroskaligen Modell ENVI-met für IOP-1 vom 17.01. bis zum 18.01.2017 von 6:00 UTC bis 6:00 UTC für den Ernst-Reuter-Platz. Links oben ist die Temperatur und	

rechts oben die Relative Feuchte für 14:00 UTC dargestellt. Parallel dazu ist in den unteren Abbildungen der entsprechende Tagesgang für den Standort der Mensa der TU Berlin ('tucanteen') dargestellt. Quelle: Ronald Queck (TUDDmeteo)..... 59

Abb. 2.6.4: UTCI am 31.07.2017 16:00, berechnet aus einer ENVI-met Simulation (Fläche) und aus Messdaten (Band), graue Flächen entsprechen Gebäuden oder aufgrund von Bewölkung ausgeschlossenen Abschnitten der Messstrecke. Quelle: Ronald Queck (TUDDmeteo)..... 60

Abb. 2.6.5: UTCI Differenz zwischen ENVI-met Simulation und mobiler Plattform 'Rucksack' mit Bezug zur Vegetation (Luftbild im Hintergrund Google Earth 6/2016). Die größten Abweichungen (positiv u. negativ) ergeben sich in Bereichen mit Baumbestand. Quelle: Ronald Queck (TUDDmeteo). ..... 60

Abb. 2.6.6: Mit MUKLIMO\_3 simulierte Lufttemperatur und Windvektoren in 5 m über Grund am 17.07.2017, 20 UTC (22 MESZ) in einem 10 km x 10 km großen Gebietsausschnitt mit dem Stuttgarter Stadtkessel, dem Nesenbachtal und angrenzenden Stadtgebieten. Schwarze Konturlinien zeigen die Geländehöhe in 50 m Höhenintervallen. Quelle: Meinolf Koßmann (DWD). ..... 61

Abb. 3.1.1: Struktur des [UC]<sup>2</sup>-Datenmanagementsystems (DMS). Links zu einzelnen Komponenten: GUI (<https://dms.klima.tu-berlin.de/>); DMS (<https://dmsapi.klima.tu-berlin.de/>); Batch (<https://gitlab.klima.tu-berlin.de/klima/uc2data>). Quelle: TUBklima..... 64

Abb. 3.1.2: Startseite der web-basierten grafischen Benutzeroberfläche (GUI) des [UC]<sup>2</sup>-Datenmanagementsystems (DMS). Quelle: <https://dms.klima.tu-berlin.de/> (Zugriff: Mai 2022)..... 65

Abb. 3.2.1: Standorte von stationären Messungen der Lufttemperatur und -feuchte in Berlin während der Evaluierungszeiträume VALR01 und VALR02. Die Kreissegmente stehen für Temperatur (rot), Feuchte (blau) und Flüssigwasser/Wasserdampf in Luftsäule (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten, dass keine Messung dieser atmosphärischen Variable stattgefunden hat. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap. .... 66

Abb. 3.2.2: Standorte von stationären Messungen der Lufttemperatur und -feuchte in Berlin in der IOL 'TUB Campus Charlottenburg' während der Evaluierungszeiträume VALR01 und VALR02. Die Kreissegmente stehen für Temperatur (rot), Feuchte (blau) und Flüssigwasser/Wasserdampf in Luftsäule (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten, dass keine Messung dieser atmosphärischen Variable stattgefunden hat. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap. .... 67

Abb. 3.2.3: Standorte von stationären Messungen der Lufttemperatur und -feuchte in Berlin an der IOL 'Rothenburgstraße, Steglitz' während der Evaluierungszeiträume VALR01 und

VALR02. Die Kreissegmente stehen für Temperatur (rot), Feuchte (blau) und Flüssigwasser/Wasserdampf in Luftsäule (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten, dass keine Messung der Variablen stattgefunden hat. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.....	68
Abb. 3.2.4: Standorte von stationären Messungen der Lufttemperatur und -feuchte in Stuttgart während der Evaluierungszeiträume VALR03 und VALR04. Die Kreissegmente stehen für Temperatur (rot), Feuchte (blau) und Flüssigwasser/Wasserdampf in Luftsäule (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten, dass keine Messung der Variablen stattgefunden hat. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap. ....	69
Abb. 3.2.5: Standorte von stationären Messungen der Lufttemperatur und -feuchte in Hamburg während der Evaluierungszeiträume VALR05. Die Kreissegmente stehen für Temperatur (rot), Feuchte (blau) und Flüssigwasser/Wasserdampf in Luftsäule (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten, dass keine Messung der Variablen stattgefunden hat. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap. ....	70
Abb. 3.2.6: Temperaturmessung entlang der mobilen Messroute am 16. Juli 2018 in der Zeit von 11:30 bis 13:30 UTC. Quelle: Agnes Straaten (TUBSgeo); Kartengrundlage: OpenStreetMap. ....	72
Abb. 3.2.7: <i>Klimakammer im Fachgebiet Klimatologie der TU Berlin. Foto: Fred Meier (TUBklima).</i> .....	73
Abb. 3.2.8: Während der Vergleichsmessung im Juli 2018 auf dem Marienplatz in Stuttgart gemessene Werte der Lufttemperatur (links) und der relativen Feuchte (rechts). Quelle: Robert Wegener (FZJiek8). ....	74
Abb. 3.2.9: MobiLab (FZJiek8), Profilmesswagen (DWDku1), stationärer Messwagen (USifk) während der Vergleichsmessungen am Marienplatz in Stuttgart (v.l.n.r.). Foto: Robert Wegener (FZJiek8). ....	74
Abb. 3.2.10: MobiLab (FZJiek8) und instrumentierte Cessna Caravan (DLRpa) während der Vergleichsmessungen am Flughafen in Berlin. Foto: Robert Wegener (FZJiek8). ....	75
Abb. 3.3.1: Standorte der stationären Messungen von Windkomponenten in Berlin während der Evaluierungszeiträume VALR01 und VALR02. Die Kreissegmente stehen für Windgeschwindigkeit (rot), Windrichtung (blau) sowie die Windkomponenten u, v, w (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten keine Messung der jeweiligen Variable(n). Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.....	76
Abb. 3.3.2: Standorte der stationären Messungen von Windkomponenten in Berlin in der IOL 'TUB Campus Charlottenburg' während der Evaluierungszeiträume VALR01 und VALR02. Die Kreissegmente stehen für Windgeschwindigkeit (rot), Windrichtung (blau) sowie die	

Windkomponenten u, v, w (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten keine Messung der jeweiligen Variable(n). Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.....	77
Abb. 3.3.3: Standorte der stationären Messungen von Windkomponenten in Berlin in der IOL 'Rothenburgstraße, Steglitz' während der Evaluierungszeiträume VALR01 und VALR02. Die Kreissegmente stehen für Windgeschwindigkeit (rot), Windrichtung (blau) sowie die Windkomponenten u, v, w (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten keine Messung der jeweiligen Variable(n). Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.....	78
Abb. 3.3.4: Standorte der stationären Messungen von Windkomponenten in Stuttgart während der Evaluierungszeiträume VALR03 und VALR04. Die Kreissegmente stehen für Windgeschwindigkeit (rot), Windrichtung (blau) sowie die Windkomponenten u, v, w (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten keine Messung der jeweiligen Variable(n). Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.....	79
Abb. 3.3.5: Standorte der stationären Messungen von Windkomponenten in Hamburg während der Evaluierungszeiträume VALR05. Die Kreissegmente stehen für Windgeschwindigkeit (rot), Windrichtung (blau) sowie die Windkomponenten u, v, w (grün). Weiß markierte Kreissegmente bedeuten keine Messung der jeweiligen Variable(n). Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.....	80
Abb. 3.4.1: Standorte von stationären Strahlungsmessungen in Berlin während der Evaluierungszeiträume VALM01 und VALM02. Die Kreissegmente stehen für: Globalstrahlung (rsd), diffuse kurzwellige Strahlung (rsddif), kurzwellige Strahlung von unten (rsu), langwellige Strahlung von oben (rld) und langwellige Strahlung von unten (rlu). Die Zahlen an den Symbolen geben an, in welchen der Validierungszeiträume die Daten verfügbar sind. Schwarz markierte Kreissegmente bedeuten keine Messung / Bestimmung der jeweiligen Strahlungskomponente. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.....	90
Abb. 3.4.2: Standorte von stationären Strahlungsmessungen in der IOL TUB Campus Charlottenburg während der Validierungszeiträume VALM01 und VALM02. Die Kreissegmente stehen für: Globalstrahlung (rsd), diffuse kurzwellige Strahlung (rsddif), kurzwellige Strahlung von unten (rsu), langwellige Strahlung von oben (rld) und langwellige Strahlung von unten (rlu). Die Zahlen an den Symbolen geben an, in welchen der Validierungszeiträume die Daten verfügbar sind. Schwarz markierte Kreissegmente bedeuten keine Messung / Bestimmung der jeweiligen Strahlungskomponente. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap.....	91
Abb. 3.4.3: Standorte von stationären Strahlungsmessungen in Stuttgart während der	

Validierungszeiträume VALM03 und VALM04. Die Kreissegmente stehen für: Globalstrahlung (rsd), kurzwellige Strahlung von unten (rsu), langwellige Strahlung von oben (rld) und langwellige Strahlung von unten (rlu). Die Zahlen an den Symbolen geben an, in welchen der Validierungszeiträume die Daten verfügbar sind. Schwarz markierte Kreissegmente bedeuten keine Messung der jeweiligen Strahlungskomponente. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima); Kartengrundlage: OpenStreetMap..... 92

Abb. 3.4.4: Zeitlicher Verlauf von Aerosolbackscatterprofilen (oben), Wolkenbedeckungsgrad (Mitte) und Globalstrahlung (unten) am Standort tumainroof. Quelle: Achim Holtmann (TUBklima)..... 93

Abb. 3.5.1: Messaufbau während der IOPs entlang der Überseeallee vor dem Gebäude der HafenCity Universität, Hamburg. Quelle: UHHmeteo, Kartengrundlage: Google Earth. .... 95

Abb. 3.5.2: Histogramme der Windgeschwindigkeit und -richtung der 50 m ü.G. Windmessung am Wettermast Hamburg für IOP-1 (a), IOP-2 (b), IOP-3 (c) und IOP-4 (d). Alle Histogramme sind jeweils normiert. Quelle: Felix Ament (UHHmeteo)..... 96

Abb. 3.5.3: Standorte der Wetterstationen im Hamburger Stadtgebiet. Quelle: UHHmeteo, Kartengrundlage: Google Earth..... 97

Abb. 3.5.4: (a) Geographische Lage des Messtandortes am Flughafen BER, der Messtandort ist mit einem roten Punkt markiert. Quelle: Jannik Heusinger, Kartengrundlage: OpenStreetMap. (b) Gründach Aufnahme am Flughafen BER vom 22.07.2014 mit Eddy-Kovarianz Messgeräten, die in 1,15 m Höhe installiert waren. Quelle: Jannik Heusinger (TUBSgeo)..... 98

Abb. 3.6.1: Standorte der biometeorologischen Messstationen in Berlin während der VALM02 (rote Kreise, 1: airportthf; in IOL 'TUB Campus Charlottenburg': 2: tuchembuild, 3: schillerosz), Messstrecken der mobilen Plattformen (blaue Linie: Fahrrad, grüne Linie: Rucksack; charlottenb). Quelle: Ronald Queck (TUDDmeteo); Kartengrundlage: OpenStreetMap. .... 100

Abb. 3.6.2: Standort der biometeorologischen Messstation in Stuttgart (nesenbachtal) während der Validierungszeiträume VALM03 und VALM04. Quelle: Ronald Queck (TUDDmeteo); Kartengrundlage: OpenStreetMap..... 101

Abb. 3.6.3: Biometeorologische Station der TUBklima auf dem Schulhof des Oberstufenzentrums Körperpflege in Berlin (Bildmitte) mit Thermalscanner (rechts) während einer Vergleichsmessung mit der mobilen Plattform (Rucksack) der TUDD (links). Foto: Ronald Queck (TUDDmeteo). .... 102

Abb. 3.6.4: DWD Station auf dem Tempelhofer Feld in Berlin, rechts im Vordergrund temporäre Strahlungsmessungen des DWDfelg. Foto: Ralf-Becker (DWDfelg)..... 102

Abb. 3.6.5: Links: DWDku1 Station beim Chemiegebäude der TU in Berlin. Rechts: DWDku1

Station im Nesenbachtal in Stuttgart. Fotos: DWD.....	103
Abb. 3.6.6: Vergleich zwischen den in Berlin eingesetzten mobilen Messplattformen vor dem Hauptgebäude der TU Berlin, von links nach rechts: MobiLab des FZJiek8, Messfahrräder der TUBSgeo, Rucksack und Messfahrrad der TUDDmeteo. Foto: Ronald Queck (TUDDmeteo). .....	104
Abb. 3.7.1: Das Gerät Urbmobi 3.0 für die mobile Erfassung von Luftqualität und Meteorologie mit Sensoren für Feinstaub (OPC-N2), Gase (Stickstoffdioxid (NO <sub>2</sub> ), Stickoxid (NO) und Ozon (O <sub>3</sub> ), Lufttemperatur und -feuchte (SHT35), und Globalstrahlung (EKO ML-01); Foto: Janani Venkatraman Jagatha (HUBgeo).....	105
Abb. 3.7.2: Messstrecken zur Charakterisierung der Umgebung der LTO 'Berlin-Adlershof' und der räumlichen Variabilität der PM10-Partikel, gemessen mit Grimm 1.109 und Urbmobi 3.0, Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, im Rahmen der IOP-4. Datenbasis: Geoportal Stadt Berlin. Quelle: Janani Venkatraman Jagatha (HUBgeo); Kartengrundlage: OpenStreetMap. ....	106
Abb. 3.7.3: Links: Luftqualitätsmessstation für Ultrafeinstaub der LTO 'Berlin-Adlershof' mit GRIMM EDM 465 UFPC, LUFFT WS600 und Minikin RTHi/QTHi; Foto: Sabine Fritz. Rechts: IOP-Standort 'tumathsouth' während IOP-1 und -2 mit GRIMM EDM465 UFPC, LUFFT WS600, GRIMM 1.109 und Stickstoff-Passivsammler. Foto: Janani Venkatraman Jagatha (HUBgeo).....	107
Abb. 3.7.4: Datensätze zur Charakterisierung der räumlichen Variabilität der Partikelanzahlkonzentration. Oben: Karte und Bild der Messpunkte der IOP-2 am Messstandort 'Straße des 17. Juni'. Unten: Karte und Bilder der Messroute zur Charakterisierung des Umfelds der LTO 'Berlin-Adlershof' im Rahmen der IOPs-3 und -4. Datenbasis der Karten: Geofabrik GmbH Karlsruhe; Fotos: Sabine Fritz (HUBgeo; oben) und Hanna Maris (HUBgeo; unten).....	108
Abb. 3.7.5: Messstandort der größenklassifizierten Partikelflussmessung auf dem Dach des Hauptgebäudes der TU Berlin. Foto: Agnes Straaten (TUBSgeo).....	110
Abb. 3.7.6: (a) Boxplots der gemessenen Gesamtpartikelflüsse (10 nm < D <sub>p</sub> < 200 nm; FTNC) und der ultrafeinen Partikelflüsse (10 nm < D <sub>p</sub> < 100 nm; FUFF) bzw. (b) Häufigkeitsverteilungen des ultrafeinen Partikelflusses für die drei Messjahre am Standort Berlin-Charlottenburg. Quelle: Straaten und Weber, 2021. ....	110
Abb. 3.7.7: Mittlerer Tagesgang (inkl. Standardabweichung, SD) des ultrafeinen Partikelflusses für einen Werktag (Montag - Freitag) bzw. einen Tag des Wochenendes (Samstag - Sonntag). Quelle: Straaten und Weber, 2021.....	111
Abb. 3.7.8: Größenklassifizierte Depositionsgeschwindigkeiten basierend auf den Messdaten des LTO Standorts „tomainroof“ (3 Jahre) verglichen mit verschiedenen parametrisierten	

Depositionsverhalten für urbane Landnutzung (Schubspannungsgeschwindigkeit  $u^* = 0,6 \text{ m s}^{-1}$ ; entnommen aus Saylor et al., 2019). Das an PALM-4U ankoppelbare Aerosolmodell SALSA verwendet die Parametrisierung nach Zhang et al. (2001). Quelle: Agnes Straaten (TUBSgeo).....111

Abb. 3.7.9: Mobil gemessene Partikelkonzentrationen ( $D_p > 10 \text{ nm}$ ) entlang der Messroute in Berlin-Charlottenburg am 16. Juli 2018 in der Zeit von 11:30 bis 13:30 UTC. Quelle: Agnes Straaten (TUBSgeo); Kartengrundlage: OpenStreetMap.....112

Abb. 3.7.10: Vorbereitung zum Außenluftvergleich auf dem Flughafen Schönhagen (17.07.2018). Beide Ansaugsysteme sind in unmittelbarer Nähe zueinander positioniert (Cessna: AIRPOD unmittelbar unter dem rechten Flügel; MobiLab: Ansaugung am Kopf des Aerosol-Einlasses). Durch geeignete Positionierung der beiden Systeme wurde sichergestellt, dass Kontaminationen infolge von Eigenemissionen der Messplattformen vermieden werden konnten (Windströmung von rechts). Foto: Dieter Klemp (FZJiek8).....115

Abb. 3.7.11: Lage der sechs Earthsense Zephyr-Sensoren an der Straße des 17. Juni, Berlin (oben) sowie die graphische Darstellung der Höhen und Distanzen (unten). Die rechte Seite der Darstellung entspricht der Nordseite der Straße, die linke der Südseite. In 22 m Höhe war ein Referenzmessgerät angebracht. Die Daten des Zephyr-Sensors in 32 m Höhe (rot) waren nicht nutzbar. Quelle: Erika von Schneidemesser (IASS).....116

Abb. 3.7.12: Ergebnisse der vertikalen Profilmessungen von  $\text{NO}_2$  vom 27. Januar – 23. Februar 2018 als Box-and-Whisker Plots dargestellt. Die untere und obere Grenze der Box entspricht dem ersten und dritten Quartil der Daten, die obere und untere Grenze der Whisker reicht bis  $1,5 \cdot \text{IQR}$  (Inter-Quartils-Bereich). Alle Punkte darüber hinaus sind Ausreißer. Die Kerben um den Median reichen bis  $1,58 \cdot \text{IQR} / \sqrt{n}$  und zeigen ein ca. 95%iges Konfidenzintervall um den Median an. Quelle: Erika von Schneidemesser (IASS).....117

Abb. 3.7.13: Wie Abbildung 3.7.12, aber für  $\text{O}_3$ . Quelle: Erika von Schneidemesser (IASS).  
.....118

Abb. 3.7.14: Graphische Darstellung der Standorte der Earthsense Zephyr-Sensoren während der IOP-4 (20. Juli – 30. August, 2018) an der Frankfurter Allee, Berlin. Quelle: Erika von Schneidemesser (IASS).....119

Abb. 3.7.15: Vorläufige Ergebnisse der vertikalen Profilmessungen von  $\text{NO}_2$  während IOP-4 (20. Juli – 30. August 2018) als Tagesprofil dargestellt. Fehlerbalken geben das 95% Konfidenzintervall der Daten wieder. Quelle: Erika von Schneidemesser (IASS).....119

Abb. 3.7.16: Wie bei Abbildung 3.7.15, aber für  $\text{O}_3$ . Quelle: Erika von Schneidemesser (IASS).  
.....120

Abb. 3.7.17: Während IOP-1 (VALR01) durchgeführte Messfahrten entlang einer Referenzstrecke am 17.01.2017 von 9:10 – 10:25 UTC (oben) und 11:44 - 13:13 UTC (unten).



Exemplarisch sind die NH <sub>3</sub> -Mischungsverhältnisse [ppb] dargestellt. Quelle: Robert Wegener (FZJiek8); Kartengrundlage: OpenStreetMap.....	121
Abb. 3.7.18: NO <sub>2</sub> -Messungen bei der Durchquerung der Stadt Berlin in Ost-West-Richtung mit MobiLab zur Analyse des Luv- und Leebereichs unter winterlichen Bedingungen und nordwestlicher Windrichtung (siehe blauer Windpfeil). Die Messungen wurden an einem Wochentag während der IOP-1 durchgeführt (20.01.2017 zwischen 09:00 und 12:30 UTC). Quelle: Dieter Klemp (FZJiek8); Kartengrundlage OpenStreetMap.....	122
Abb. 3.7.19: Kartendarstellung aller Flugwege der DLR Cessna über Berlin während der IOP-4 im Juli 2018. Das Flugzeug war am Flughafen Schönhagen stationiert. Quelle: Anke Roiger (DLRpa).....	124
Abb. 3.7.20: Die vertikal integrierte NO <sub>2</sub> -Verteilung über der Stadtregion Berlin am 16. Juli 2018, 11:27 UTC beobachtet durch Sentinel-5P/TROPOMI (in der physikalischen Originalauflösung). Deutlich ist die Abgasfahne der Stadt Richtung SSO (Lee) über die administrativen Stadtgrenzen hinaus zu erkennen. Quelle: Erbertseder et al., (2020) (DLRdfd). .....	126
Abb. 3.7.21: Durch die synoptische Beobachtung des vertikal integrierten NO <sub>2</sub> durch TROPOMI (oben) und der flugzeug-gestützten Vermessung der NO <sub>2</sub> -Verteilung entlang einer Downwind-Wall (unten, aufgetragen entlang schwarzer Linie), lässt sich die horizontale Ausdehnung und Vertikalstruktur der städtischen Abluftfahne erfassen. Quelle: Thilo Erbertseder (DLRdfd).....	127
Abb. 3.7.22: Mischungsverhältnis von NO <sub>2</sub> auf der Referenzstrecke 'Stuttgarter Innenstadt' rund um das Neckartor in Stuttgart am 13. Februar 2018 von 12:05 bis 12:42 UTC. Quelle: Dieter Klemp (FZJiek8); Kartengrundlage: OpenStreetMap.....	128
Abb. 3.7.23: Während IOP-3 (VALR03) durchgeführte Messfahrten entlang einer Referenzstrecke 'Stuttgart und das westlich gelegene Umland' am 14.02.2017 7:54 – 9:58 UTC UTC. Exemplarisch ist das NO <sub>2</sub> -Massenmischungsverhältnis [ppb] dargestellt. Quelle: Dieter Klemp (FZJiek8); Kartengrundlage: OpenStreetMap.....	129
Abb. 3.7.24: Route der Fahrradmessungen. Quelle: Abdul Samad (USifk); Kartengrundlage: Google Earth.....	130
Abb. 3.7.25: Durchschnittliche räumliche Verteilung von NO <sub>2</sub> während IOP-1 25.–27.02.2017. Quelle: Abdul Samad (USifk); Kartengrundlage: OpenStreetMap.....	131
Abb. 3.7.26: Stuttgart und Umland (links); Luftbild Marienplatz mit Standort des Messwagens (rechts, roter Kreis). Quelle: Abdul Samad (USifk). Kartengrundlage: Google Earth.....	132
Abb. 3.7.27: Vertikalprofile für eine Sondierung am 09.07.2018 zwischen 5:54 und 6:23 UTC. Quelle: Abdul Samad (USifk).....	132
Abb. 3.7.28: Mittlerer Tagesgang (unten links), Monatsgang (unten mitte) und Wochengang	

(unten rechts) als Stundenmittelwert für die NO- NO <sub>2</sub> - und O <sub>3</sub> -Konzentrationen in der Periode von März 2017 bis Dezember 2019. Quelle: Abdul Samad (USifk).....	133
Abb. 3.7.29: Flugmuster für die Befliegung von Stuttgart während IOP-4 inklusive der Orte der Bodenmessungen (gelb) und Windlidare (rot). Das blaue Flugmuster wird in verschiedenen Höhen wiederholt und beinhaltet ein spiralförmiges Vertikalprofil in der östlichen Ecke (blauer Kreis). Auf der orangen Strecke wird das Neckartal auf niedriger Höhe überflogen. Quelle: Anke Roiger (DLRpa); Kartengrundlage: Google Earth. ....	134
Abb. 3.7.30: Flugrouten der sechs Flüge über Stuttgart und dem Umland. Quelle: Anke Roiger (DLRpa) Kartengrundlage: Google Earth. ....	135
Abb. 3.7.31: Befliegung Stuttgart vom 09.7.2018, vormittags. Dargestellt sind die in-situ NO <sub>2</sub> -Konzentrationen (© 2020 Google, Image Landsat/Copernicus). Quelle: Magdalena Pühl (DLRpa). ....	136
Abb. 3.7.32: Zeitlicher Verlauf der Spurengaskonzentrationen und Flughöhe auf dem Flug am 09.07.2018 am Vormittag über Stuttgart. Die grauen Kästen kennzeichnen den Stadtbereich von Stuttgart. Quelle: Magdalena Pühl (DLRpa).....	137
Abb. 3.7.33: Vertikalprofile über Stuttgart am 09.07.2018 um 9:21 UTC. Die Grenzschichthöhe lag zu diesem Zeitpunkt ungefähr bei 1050 m ü. NN. Quelle: Anke Roiger (DLRpa.) ....	137
Abb. 3.7.34: Die städtische Verschmutzungsinsel von Stuttgart kartiert durch Sentinel-5P/TROPOMI. Dargestellt ist der Mittelwert des troposphärischen NO <sub>2</sub> für Juli 2018. Quelle: Thilo Erbertseder (DLRdfd).....	138

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1.2.1: Kategorien der in [UC] <sup>2</sup> erhobenen, aufbereiteten sowie qualitätsgeprüften Referenzdatensätze:.....	9
Tab. 2.2.1: Überblick zu den vereinbarten Simulationen für Berlin und Hamburg.....	29
Tab. 2.2.2: Überblick zu den Simulationen für Stuttgart.....	29
Tab. 2.2.3: Die vereinbarten Evaluierungszeiträume für Modellsimulationen (VALM*) und Referenzmessungen (VALR*) im Überblick: .....	30
Tab. 2.3.1: Zusätzliche PALM-4U Simulationen der TPs zur Evaluierung von PALM-4U in Projektphase 2.....	31
Tab. 2.3.2: Modelleinstellungen für die Modellläufe in PALM-4U.....	35
Tab. 2.3.3: RMSE und NRMSE der Windgeschwindigkeit und RMSE der Windrichtung zwischen Referenzdaten und PALM-4U Simulationen für 1000 m asl und 410 m asl.....	42
Tab. 2.3.4: Messungen während der Sondermesskampagne im Sommer 2020 in Hannover. ....	48
Tab. 2.3.5 Geodatensätze des LGLN.....	49
Tab. 2.3.6: Initialisierungseinstellungen in PALM-4U für den Modelllauf in der Südstadt in Hannover.....	53
Tab. 2.6.1: Übersicht der zusätzlich zu den vereinbarten Simulationsläufen mit PALM-4U (VALM*) durchgeführte Läufe mit anderen Modellen. ....	56
Tab. 3.7.1: Die von den Teilprojekten TP5, TP6, TP8 und TP14 erhobenen Referenzmessungen (VALR*) zu Spurengasen im Überblick.....	113
Tab. 3.7.2: Messvergleiche zu den Spurengasmessungen und Interkalibrationen .....	114
Tab. 3.7.3: Durchgeführte Messflüge mit Flugzeiten und mittleren Windparametern.....	123
Tab. 3.7.4: Auflistung der Messinstrumente, der gemessenen Spezies sowie der Parameter auf der Cessna Caravan während der IOP-4 in Stuttgart und Berlin.....	124
Tab. 3.7.5: Auflistung der durchgeführten Flüge mit Flugzeiten und mittleren Windparametern.....	135

## Annex 1

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

TP	PI	Institution	Acronym
01	Dieter Scherer	Technische Universität Berlin, Fachgebiet Klimatologie	TUBklima
01	Andreas Philipp	Universität Augsburg, Institut für Geographie	UAgeo
01	Jörn Welsch	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen Berlin	SenSWB
01	Andreas Kerschbaumer	Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin	SenUVKB
02	Christoph Schneider	Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut	HUBgeo
03	Sahar Sodoudi	Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie	FUBmeteo
04	Stephan Weber	Technische Universität Braunschweig, Institut für Geoökologie	TUBSgeo
05	Erika von Schneidemesser	Institute of Advanced Sustainability Studies Potsdam	IASS
06	Dieter Klemp	Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung	FZJiek8
07	Stefan Emeis	Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Meteorologie und Atmosphärische Klimaforschung, Umweltforschung	KITimkifu
07	Norbert Kalthoff	Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Troposphärenforschung	KITimktro
08	Ulrich Vogt	Universität Stuttgart, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik	USifk
08	Ulrich Reuter	Amt für Umweltschutz Stuttgart, Abteilung Stadtklimatologie	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	Meinolf Koßmann	Deutscher Wetterdienst, Geschäftsbereich Klima und Umwelt, Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung	DWDku1; DWDfelg
12	Günter Groß	Leibniz Universität Hannover, Institut für Meteorologie und Klimatologie	LUHimuk
13	Peter Trute	GEO-NET Umweltconsulting GmbH	GEONET
14	Thilo Erbertseder	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum	DLRdfd
14	Anke Roiger	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 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

### Abkürzung der Variablen

Abkürzung	Variable	Einheit
hur	relative Feuchte	%
plev	Luftdruck	hPa
rad_net	Nettostrahlung	Wm <sup>-2</sup>
ta	Lufttemperatur	°C
t_va	virtuelle akustische Temperatur	Kelvin
u	O-W-Komponente (Windvektor)	m s <sup>-1</sup>
v	N-S-Komponente (Windvektor)	m s <sup>-1</sup>
w	Vertikalkomponente (Windvektor)	m s <sup>-1</sup>
wdir	Windrichtung	Grad
wspeed	Windgeschwindigkeit	m s <sup>-1</sup>
wspeed_max	maximale Windgeschwindigkeit	m s <sup>-1</sup>

## Annex 2

### Übersicht zu den qualitätsgesicherten Referenzdatensätzen für die Evaluation (VALR)

Hinweis: Die VALR entsprechen dem UC2 Datenstandard (siehe <https://uc2-program.org/index.php/datenmanagement>).

**Lufttemperatur und -feuchte: VALR01, Berlin, Messzeitraum: 17.01.2017 06:00 bis 18.01.2017 06:00 UTC**

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp (featureType)
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	albrecht	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	bamberger	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	dahlemerfeld	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	dessauer	timeSeries
TUBklima	Klimastation, Messmast	Campbell Scientific CS215	ta, hur	jagen91	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	koepenick	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Vaisala WXT536	ta, hur	potsdamneuga	timeSeries
TUBklima	Klimastation, Dach	Campbell Scientific CS215, Vaisala HMP45A, PT100	ta, hur	rothenburg	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Vaisala WXT536	ta, hur	schlosscharl	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	spandauer	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	swinemuender	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	tiergarten	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215, Driesen + Kern DK390 DM-4M	ta, hur	tucanteen	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	tuerpl	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	tumainlawn	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Vaisala HMP155	ta, hur	tumainroof	timeSeries
TUBklima	Balkongeländer	Driesen + Kern DK390-DM-4M	ta, hur	tumathnorth	timeSeries
TUBklima	Balkongeländer	Driesen + Kern DK390-DM-4M	ta, hur	tumathsouth	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	tustr17east	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	tustr17west	timeSeries
TUBklima	Messmast	Campbell Scientific CS215	ta, hur	wiener	timeSeries
UAgeo	Starrflügler Drohne	Sensirion SHT75	ta, hur	dahlemerfeld	timeSeriesProfile, trajectory

UAgeo	Starrflügler Drohne	Sensirion SHT75	ta, hur	gutsmuths	timeSeriesProfile, trajectory
HUBgeo	Klimastation	Vaisala HMP155A	ta, hur	adlershofgeo	timeSeries
HUBgeo	Klimastation	LUFFT WS600	ta, hur	tumathsouth	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	funkturm	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	gatow	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	marzahnwuhle	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	mueggelsee	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	pichelsdorf	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	tegelersee	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	wannsee	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	tumainplaza	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	amselgrund	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	amselne	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	amselsw	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	biesdorf	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	botangarden	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	buchholzer	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	buckower	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	elisabethaue	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	fasanen	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	fichtenberg	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	galvani	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	landsberger	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	martinhoffm	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	montan	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	motard	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	petit	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	preissconif	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	rctegel	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	schillerosz	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	tegelforest	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	tegelforoff	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	zerpensch	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	zoo	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	dahlemerfeld	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	tuextension	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	tuiurpnorth	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	tuiurpsouth	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	tumarch	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	udk	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	gutsmuths	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	knesebeck92	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	tucanteen	timeSeries
FZJiek8	Kfz	Visala WXT520	ta, hur	berlincity	trajectory
DWD	Radiosonde	Radiosonde RS92-SGP	ta, hur	lindenberg	trajectory
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	lindenberg	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, MP300	ta, hur	airportsfx	timeSeries



DWD	Klimastation	PT100, MP300	ta, hur	airporttxl	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	airportthf	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	alexanderpl	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100; HMP45D	ta, hur	heckelberg	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	muencheberg	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	neuruppin	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	potsdam	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	berge	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	baruth	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	buch	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	kaniswall	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	marzahn	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, HMP45D	ta, hur	zehdenick	timeSeries
LUHimuk	Hexakopter, Radiosonde	DJI Flamewheel 550, GRAW DFM-06	ta, theta, hur, haa, hu	fichtenberg	trajectory

*Lufttemperatur und -feuchte: VALR02, Berlin, Messzeitraum: 16.07.2018 06:00 bis zum 18.07.2018 06:00 UTC*

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp (featureType)
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	airportthf	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	albrecht	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	bamberger	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	dahlemerfeld	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	dessauer	timeSeries
TUBklima	Klimastation, Messmast	Campbell Scientific CS215	ta, hur	jagen91	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	koepenick	timeSeries
TUBklima	Klimastation	mc115	ta, hur	mc115	timeSeries
TUBklima	Klimastation	mc117	ta, hur	mc117	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Vaisala WXT536	ta, hur	potsdamneuga	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Driesen + Kern DK390-DM-4M	ta, hur	rothab3tree	timeSeries
TUBklima	Klimastation, Messmast, Dach	Campbell Scientific CS215, Vaisala HMP45A, Campbell Scientific IRGASON Ta probe	ta, hur	rothenburg	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Driesen + Kern DK390-DM-4M	ta, hur	rothtree0030	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Driesen + Kern DK390-DM-4M	ta, hur	rothtree0094	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Driesen + Kern DK390-DM-4M	ta, hur	rothtree0196	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Driesen + Kern DK390-DM-4M	ta, hur	rothtree0263	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Driesen + Kern DK390-DM	ta, hur	rothtree0376	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Driesen + Kern DK390-DM-4M	ta, hur	rothtree0441	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Driesen + Kern DK390-DM-4M	ta, hur	rothtree0500	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215, Driesen + Kern DK390-DM-4M	ta, hur	schillerosz	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Vaisala WXT536	ta, hur	schlosscharl	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	spandauer	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	swinemuender	timeSeries

TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific CS215	ta, hur	tiergarten	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Vaisala HMP155	ta, hur	tumainroof	timeSeries
TUBklima	Mikrowellenradiometer	Mikrowellenradiometer RPG HATPRO-G5	ta, haa	tumainroof	timeSeriesProfile
TUBklima	Messmast	Campbell Scientific CS215	ta, hur	wiener	timeSeries
UAgeo	Starrflügler Drohne	Sensirion SHT75	ta, hur	airportthf	timeSeriesProfile, trajectory
UAgeo	Starrflügler Drohne	Sensirion SHT75	ta, hur	gutmuths	timeSeriesProfile, trajectory
UAgeo	Starrflügler Drohne	Sensirion SHT75	ta, hur	hertzallee	timeSeriesProfile, trajectory
HUBgeo	Fahrrad	Sensirion SHT35	ta, hur	adlershof	trajectory
HUBgeo	Fahrrad	Sensirion SHT35	ta, hur	steglitzarea	trajectory
HUBgeo	Fahrrad	Sensirion SHT35	ta, hur	charlottenb	trajectory
HUBgeo	Klimastation	Vaisala HMP155A	ta, hur	adlershofgeo	timeSeries
HUBgeo	Klimastation	Vaisala HMP155A	ta, hur	adlershofgeo	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	funkturm	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	gatow	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	marzahnwuhle	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	mueggelsee	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	pichelsdorf	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	tegelersee	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	wannsee	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	tumainplaza	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	marzahnwuhle	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	amselgrund	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	amselne	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	amselsw	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	biesdorf	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	botangarden	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	buchholzer	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	buckower	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	elisabethaue	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	fichtenberg	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	galvani	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	landsberger	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	martinhoffm	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	montan	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	motard	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	petit	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	preissconif	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	rcetegel	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	schillerosz	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	tegelersee	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	tegelforest	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	tegelforoff	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	zerpensch	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	zoo	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	waldschule	timeSeries

FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	jagow	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thies	ta,hur,hus	planetarium	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	brentano	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	ejf	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	mattkirche	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	lepsius	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	herderl184	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	herderl0089	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	forstl0085	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Rotronic	ta,hur,hus	forstl167	timeSeries
FZJiek8	Kfz	Visala WXT520	ta, hur	berlincity	trajectory
TUDDmeteo	Fahrrad	Thermoelement FW3, Temperature-Humidity Sensor HMP45 (Vaisala Finland)	ta, hur	charlottenb	trajectory
TUDDmeteo	Rucksack	Thermoelement FW3, Wetterstation WXT520 (Vaisala, Finland)	ta, hur	charlottenb	trajectory
DWDfelg	Fesselsonde	Vaisala TTS111 tethersonde	ta, hur	airportthf	trajectory
DWDku1	Radiosonde	Vaisala RS92 SGPL	ta, hur	airportthf	trajectory
DWD	Radiosonde	Radiosonde RS41-SGP	ta, hur	lindenberg	trajectory
DWDku1	Klimastation	PT100 LTS2000, Vaisala HMP45D	ta, hur	tuchembuild	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	lindenberg	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, HMP45D	ta, hur	airportsfx	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	airporttxl	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	airportthf	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	alexanderpl	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	heckelberg	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	muencheberg	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	neuruppin	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	potsdam	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	berge	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	baruth	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	buch	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	kaniswall	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	marzahn	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, HMP45D	ta, hur	zehdenick	timeSeries
DWDku1	Kfz	Frankenberger PT100, EE33, Vaisala PTB110	ta, hur	tiergarten	trajectory
DWDku1	Kfz	Frankenberger PT100, EE33, Vaisala PTB110	ta, hur	airportthf	trajectory
LUHimuk	Hexakopter, Radiosonde	DJI Flamewheel 550, GRAW DFM-06	ta, theta, hur, haa, hu	fichtenberg	trajectory
LUHimuk	Hexakopter, Radiosonde	DJI Flamewheel 550, GRAW DFM-06	ta, theta, hur, haa, hu	tuerpl	trajectory
DLRpa	Flugzeug Meteopod		ta, haa, hur, hus, tdps, theta, thetav	berlincity	trajectory

*Lufttemperatur und -feuchte: VALR03, Stuttgart, Messzeitraum: 14.02.2017 06:00 bis 16.02.2017 06:00 UTC*

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp (featureType)
FZJiek8	Kfz	Visala WXT520	ta, hur	stuttgartcity	trajectory
KITimktro	Mikrowellenradiometer	HATPRO RPG	haa, ta	cityhalltow	timeSeriesProfile
KITimktro	Mikrowellenradiometer	HATPRO RPG	prw, lwp	cityhalltow	timeSeries
USifk	Fahrrad	Gill Maximet GMX501	ta, hur	vsouthdl	trajectory
DWD	Radiosonde	Radiosonde RS92-SGP	ta, hur	mschnarren	trajectory
DWDku1	Klimastation	PT100 LTS2000, Vaisala HMP45D	ta, hur	nesenbachtal	timeSeries
DWDku1	Klimastation	PT100 LTS2000, Vaisala HMP45D	ta, hur	booehmoehr	timeSeries
DWDku1	Klimastation	PT100 LTS2000, Vaisala HMP45D	ta, hur	marienpl	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	mschnarren	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	airportstr	timeSeries
LUHimuk	Hexakopter, Radiosonde	DJI Flamewheel 550, GRAW DFM-06	ta, theta, hur, haa, hu	nesenbachtal	trajectory

*Lufttemperatur und -feuchte: VALR04, Stuttgart, Messzeitraum: 08.07.2018 04:00 bis 09.07.2018 19:00 UTC*

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp (featureType)
FZJiek8	Kfz	Visala WXT520	ta, hur	stuttgartcity	trajectory
KITimktro	Mikrowellenradiometer	HATPRO RPG	haa, ta	cityhalltow	timeSeriesProfile
KITimktro	Mikrowellenradiometer	HATPRO RPG	prw, lwp	cityhalltow	timeSeries
USifk	Fesselsonde	Vaisala DigiCORA Tethersonde system TT12	ta, hur	cityusgfw	trajectory
DWD	Radiosonde	Radiosonde RS92-SGP	ta, hur	mschnarren	trajectory
DWDfelg	Fesselsonde	Vaisala TTS111 tethersonde	ta, hur	bcreitstad	trajectory
DWDku1	Radiosonde	Vaisala RS92 SGPL	ta, hur	suedheimerpl	trajectory
DWDku1	Klimastation	PT100 LTS2000, Vaisala HMP45D	ta, hur	nesenbachtal	timeSeries
DWDku1	Klimastation	PT100 LTS2000, Vaisala HMP45D	ta, hur	booehmoehr	timeSeries
DWDku1	Klimastation	PT100 LTS2000, Vaisala HMP45D	ta, hur	erwschoettpl	timeSeries
DWDku1	Klimastation	PT100 LTS2000, Vaisala HMP45D	ta, hur	marienpl	timeSeries
DWDku1	Klimastation	PT100 LTS2000, Vaisala HMP45D	ta, hur	leonberg	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	mschnarren	timeSeries
DWD	Klimastation	PT100, EE33	ta, hur	airportstr	timeSeries
DWDku1	Kfz	Frankenberger PT100, EE33, Vaisala PTB110	ta, hur	citysouth	trajectory
LUHimuk	Hexakopter, Radiosonde	DJI Flamewheel 550, GRAW DFM-06	ta, theta, hur, haa, hu	nesenbachtal	trajectory
LUHimuk	Hexakopter, Radiosonde	DJI Flamewheel 550, GRAW DFM-06	ta, theta, hur, haa, hu	marienpl	trajectory
DLRpa	Flugzeug Meteopod		hur, tdps, theta, thetav, haa, ta, hus	stuttgartcity	trajectory

**Lufttemperatur und -feuchte: VALR05 und 07, Hamburg, Messzeiträume: jeweils von 00:00 bis 00:00 UTC vom 21.01.2017-01.02.2017, 14.08.2017-18.09.2017, 15.01.2018-13.02.2018 und 13.08.2018-12.09.2018**

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp (featureType)
TUDDmeteo	Fesselsonde	Digicora (tethered sounding system)	ta, hur	hcuroof	timeSeriesProfile
TUDDmeteo	Klimastation	Wetterstation WXT520 (Vaisala, Finnland)	ta, hur	hcuroof	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Vaisala WXT520	ta, hur, hus	hcuroof	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell HMP155	ta, hur, hus	stb	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell HMP155	ta, hur, hus	hcv	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell HMP155	ta, hur, hus	lgs	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell HMP155	ta, hur, hus	lra	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell HMP155	ta, hur, hus	sgs	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell HMP155	ta, hur, hus	sga	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell HMP155	ta, hur, hus	zbi	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell HMP155	ta, hur, hus	wgs	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell HMP155	ta, hur, hus	wra	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell HMP155	ta, hur, hus	rra	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell HMP155	ta, hur, hus	eddy1	timeSeries

**Wind: VALR01, Berlin, Messzeitraum: 17.01.2017 06:00 bis 18.01.2017 06:00 UTC**

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp "featureType"
TUBklima	Klimastation	Vaisala WXT536	wspeed, wdir	potsdamneuga	timeSeries
TUBklima	Dach	METEK USA-1	ua, va, w	rothenburg	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Lambrecht cup anemometer with wind vane type 1458 W 30	wspeed, wdir	rothenburg	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Vaisala WXT536	wspeed, wdir	schlosscharl	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Gill Instruments WindMaster 1590-PK-020	ua, va, w	tucanteen	timeSeries
TUBklima	Messmast (10 m)	Thies Clima Ultraschallanemometer 3D	ua, va, w	tuerpl	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Gill Instruments WindMaster 1590-PK-020	ua, va, w	tumainlawn	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Campbell Scientific IRGASON	ua, va, w	tumainroof	timeSeries
TUBklima	geparkter Bus	Gill Instruments WindMaster 1590-PK-020	ua, va, w	tustr17east	timeSeries
TUBklima	geparkter Bus	Gill Instruments WindMaster 1590-PK-020	ua, va, w	tustr17west	timeSeries
UAgeo	Starrflügler Drohne	UBLOX NEO M8T	wdir, wspeed	gutsmuths	timeSeriesProfile
UAgeo	Starrflügler Drohne	UBLOX NEO M8T	wdir, wspeed	dahlemerfeld	timeSeriesProfile
HUBgeo	Klimastation	LUFFT WS600	wdie, wspeed	adlershofgeo	timeSeries
HUBgeo	Klimastation	LUFFT WS600	wdie, wspeed	tumathsouth	timeSeries

FUBmeteo	Klimastation	Thiess, 2D Ultrasonic	wspeed,wdir	funkturm	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess Windgeber	wspeed,wdir	gatow	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess, 2D Ultrasonic	wspeed,wdir	ifmroof	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess Windgeber	wspeed,wdir	marzahnwuhle	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess, 2D Ultrasonic	wpeed,wdir	mueggelsee	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess Windgeber	wpeed,wdir	pichelsdorf	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess Windgeber	wpeed,wdir	tegelersee	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess Windgeber	wpeed,wdir	wannsee	timeSeries
FUBmeteo	Rollator	Thiess, 2D Ultrasonic	wpeed,wdir	tumainplaza	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess Windgeber	wpeed,wdir	marzahnwuhle	timeSeries
FZJiek8	Kfz	Vaisala WXT 520	wdir, wspeed	berlincity	trajectory
DWD	Radiosonde	Radiosonde RS92-SGP	wspeed, wdir	lindenberg	trajectory
DWD	Klimastation	Ultrasonic Anemometer 2D, Windrichtungssensor Classic 4.3121	wspeed, wdir	lindenberg	timeSeries
DWD	Klimastation	Windsensor Classic 4.3303, Windrichtungssensor Classic 4.3121	wspeed, wdir	airportsfx	timeSeries
DWD	Klimastation	Windsensor Classic 4.3303 (DWDSYN), Windrichtungssen- sor Classic 4.3121 (DWDSYN)	wspeed, wdir	airporttxl	timeSeries
DWD	Klimastation	Ultrasonic Anemometer 2D	wspeed, wdir	airportthf	timeSeries
DWD	Funkturm	Ultrasonic Anemometer 2D	wspeed, wdir	alexanderpl	timeSeries
DWD	Klimastation	Ultrasonic Anemometer 2D	wspeed, wdir	heckelberg	timeSeries
DWD	Klimastation	Ultrasonic Anemometer 2D	wspeed, wdir	muencheberg	timeSeries
DWD	Klimastation	WMG 201	wspeed, wdir	neuruppin	timeSeries
DWD	Klimastation	Ultrasonic Anemometer 2D	wspeed, wdir	potsdam	timeSeries
DWD	Klimastation	Ultrasonic Anemometer 2D	wspeed, wdir	berge	timeSeries
DWD	Klimastation	Ultrasonic Anemometer 2D	wspeed, wdir	baruth	timeSeries
LUHimuk	Hexakopter, Radiosonde	DJI Flamewheel 550, GRAW DFM-06	wdir,wspeed	fichtenberg	trajectory

*Wind: VALR02, Berlin, Messzeitraum: 16.07.2018 06:00 bis 18.07.2018 06:00 UTC*

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp "featureType"
TUBklima	Klimastation	METEK uSonic-3 Class A AHNSi	ua, va, w	airportthf	timeSeries
TUBklima	BLUME- Messcontainer	Gill Instruments WindMaster 1590-PK-020	ua, va, w	mc115	timeSeries
TUBklima	BLUME- Messcontainer	Gill Instruments WindMaster 1590-PK-020	ua, va, w	mc117	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Vaisala WXT536	wspeed, wdir	potsdamneug a	timeSeries

TUBklima	Klimastation, Messmast	Campbell Scientific IRGASON CSAT3 Sonic	ua, va, w	rothenburg	timeSeries
TUBklima	Wind-Lidar	HALO Photonics StreamLine XR	wspeed, wdir	rothenburg	timeSeriesProfile
TUBklima	Klimastationen	Gill Instruments WindMaster 1590-PK-020, Thies Clima Ultraschallanemometer 3D, METEK USA-1	ua, va, w	schillerosz	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Vaisala WXT536	wspeed, wdir	schlosscharl	timeSeries
TUBklima	Messmast	Campbell Scientific IRGASON	ua, va, w	tumainroof	timeSeries
TUBklima	Wind-Lidar	HALO Photonics StreamLine XR	wspeed, wdir	tumainroof	timeSeriesProfile
UAgeo	Starrflügler Drohne	UBLOX NEO M8T	wdir, wspeed	gutsmuths	timeSeriesProfile
UAgeo	Starrflügler Drohne	UBLOX NEO M8T	wdir, wspeed	airportthf	timeSeriesProfile
UAgeo	Starrflügler Drohne	UBLOX NEO M8T	wdir, wspeed	hertzallee	timeSeriesProfile
HUBgeo	Klimastation	RM-Young	wdie, wspeed	adlershofgeo	timeSeries
HUBgeo	Klimastation	RM-Young	wdie, wspeed	adlershofgeo	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess, 2D Ultrasonic	wspeed,w dir	funkturm	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess Windgeber	wspeed,w dir	gatow	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess, 2D Ultrasonic	wspeed,w dir	ifmroof	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess Windgeber	wspeed,w dir	marzahnwuhle	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess, 2D Ultrasonic	wpeed,wdir	mueggelsee	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess Windgeber	wpeed,wdir	pichelsdorf	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess Windgeber	wpeed,wdir	tegelersee	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess Windgeber	wpeed,wdir	wannsee	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess Windgeber	wpeed,wdir	marzahnwuhle	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess, 2D Ultrasonic	wpeed,wdir	jagow	timeSeries
TUBSgeo	Messmast	USA-1 (Metek GmbH)	ua, va, w	tumainroof	timeSeries
FZJiek8	Kfz	Visala WXT 520	wdir, wspeed	berlincity	trajectory
DWDfelg	Fesselsonde	TTS111 Vaisala tethersonde	wspeed, wdir	airportthf	trajectory
DWDku1	Radiosonde	Vaisala RS92 SGP	wspeed, wdir	airportthf	trajectory
DWD	Radiosonde	Radiosonde RS41-SGP	wspeed, wdir	lindenberg	trajectory
DWDku1	Klimastation	PT100 LTS2000, Vaisala HMP45D	wspeed, wdir	tuchembuild	timeSeries
DWD	Klimastation	Ultrasonic Anemometer 2D, Windrichtungssensor Classic	wspeed, wdir	lindenberg	timeSeries

		4.3121			
DWD	Klimastation	Windsensor Classic 4.3303, Windrichtungssensor Classic 4.3121	wspeed, wdir	airportsfx	timeSeries
DWD	Klimastation	Windsensor Classic 4.3303 (DWDSYN), Windrichtungssensor Classic 4.3121 (DWDSYN)	wspeed, wdir	airporttxl	timeSeries
DWD	Klimastation	Ultrasonic Anemometer 2D	wspeed, wdir	airportthf	timeSeries
DWD	Funkturm	Ultrasonic Anemometer 2D	wspeed, wdir	alexanderpl	timeSeries
DWD	Klimastation	Ultrasonic Anemometer 2D	wspeed, wdir	heckelberg	timeSeries
DWD	Klimastation	Ultrasonic Anemometer 2D	wspeed, wdir	muencheberg	timeSeries
DWD	Klimastation	WMG 201	wspeed, wdir	neuruppin	timeSeries
DWD	Klimastation	Ultrasonic Anemometer 2D	wspeed, wdir	potsdam	timeSeries
DWD	Klimastation	Ultrasonic Anemometer 2D	wspeed, wdir	berge	timeSeries
DWD	Klimastation	Ultrasonic Anemometer 2D	wspeed, wdir	baruth	timeSeries
LUHimuk	Hexakopter, Radiosonde	DJI Flamewheel 550, GRAW DFM-06	wdir,wspeed	fichtenberg	trajectory
LUHimuk	Hexakopter, Radiosonde	DJI Flamewheel 550, GRAW DFM-06	wdir,wspeed	tuerpl	trajectory
DLRpa	Flugzeug Meteopod	Rosemount model 858 AJ air velocity probe	u,v,w,wdir,wspeed	berlincity	trajectory

*Wind: VALR03, Stuttgart, Messzeitraum: 14.02.2017 06:00 bis 16.02.2017 06:00 UTC*

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp "featureType"
FZJiek8	Kfz	Vaisala WXT 520	wdir, wspeed	stuttgartcity	trajectory
KITimkro	Wind-Lidar	Windlidar Windcube WLS 8 (Leosphere)	ua,va	cityhall	timeSeriesProfile
KITimkifu	Wind-Lidar (3 Systeme)	HALO Photonics StreamLine virtual tower	wspeed, wdir	cityhall	timeSeriesProfile
Usifk	Fahrrad	Meteorological instrument (Gill Maximet GMX501)	ua, va, ws	vsouthdl	trajectory
DWD	Radiosonde	Radiosonde RS92-SGP	wspeed, wdir	mschnarren	trajectory
DWDku1	Klimastation	Thies Classic	wspeed, wdir	nesenbachtal	timeSeries
DWDku1	Klimastation	Thies Classis	wspeed, wdir	boeohmoehr	timeSeries
DWDku1	Klimastation	Thies Classic	wspeed, wdir	marienpl	timeSeries
DWD	Klimastation	Windsensor Classic 4.3303 (DWDSYN), Windrichtungssensor Classic 4.3121	wspeed, wdir	mschnarren	timeSeries
DWD	Klimastation	Windsensor Classic 4.3303 (DWDSYN), Windrichtungssensor Classic 4.3121 (DWDSYN)	wspeed, wdir	airportstr	timeSeries
LUHimuk	Hexakopter, Radiosonde	DJI Flamewheel 550, GRAW DFM-06	wdir, wspeed	nesenbachtal	trajectory



*Wind: VALR04, Stuttgart, Messzeitraum: 08.07.2018 04:00 bis 09.07.2018 19:00 UTC*

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp "featureType"
FZJiek8	Kfz	Visala WXT 520	wdir, wspeed	stuttgartcity	trajectory
KITimktro	Wind-Lidar	Windlidar Windcube WLS 8 (Leosphere)	ua,va	cityhall	timeSeriesProfile
KITimktro	Virtueller Turm aus 3 Wind-Lidaren	Windlidar WLS200 (Leosphere)	ua,va	bcfw	timeSeriesProfile
KITimkifu	Wind-Lidar	HALO Photonics StreamLine XR	w	bcfw	timeSeriesProfile
KITimkifu	Wind-Lidar	HALO Photonics StreamLine	w	afu	timeSeriesProfile
KITimkifu	Wind-Lidar	HALO Photonics StreamLine	w	mhw	timeSeriesProfile
USifk	Fesselballon	Meteorological instrument (Vaisala DigiCORA Tethersonde system TT12)	ua, va, ws	cityusgw	trajectory
DWDfelg	Fesselsonde	TTS111 Vaisala tethersonde	wspeed, wdir	breitstad	trajectory
DWDku1	Radiosonde	Vaisala RS92 SGP	wspeed, wdir	suedheimerpl	trajectory
DWDku1	Klimastation	Thies Classic	wspeed, wdir	nesenbachtal	timeSeries
DWDku1	Klimastation	Thies Classic	wspeed, wdir	boehmoehr	timeSeries
DWDku1	Klimastation	Thies Classic	wspeed, wdir	erwschoettpl	timeSeries
DWDku1	Klimastation	Thies Classic	wspeed, wdir	marienpl	timeSeries
DWDku1	Klimastation	Thies Classic	wspeed, wdir	leonberg	timeSeries
DWD	Klimastation	Windsensor Classic 4.3303 (DWDSYN), Windrichtungssensor Classic 4.3121	wspeed, wdir	mschnarren	timeSeries
DWD	Radiosonde	Radiosonde RS41-SGP	wspeed, wdir	mschnarren	trajectory
DWD	Klimastation	Windsensor Classic 4.3303 (DWDSYN), Windrichtungssensor Classic 4.3121	wspeed, wdir	airportstr	timeSeries
LUHimuk	Hexakopter, Radiosonde	DJI Flamewheel 550, GRAW DFM-06	wdir,wspeed	marienpl	trajectory
LUHimuk	Hexakopter, Radiosonde	DJI Flamewheel 550, GRAW DFM-06	wdir,wspeed	nesenbachtal	trajectory
DLRpa	Flugzeug Meteopod	Rosemount model 858 AJ air velocity probe	u,v,w,wdir, wspeed	stuttgartcity	trajectory
DLRpa	Flugzeug Meteopod	Rosemount model 858 AJ air velocity probe	u,v,w,wdir, wspeed	stuttgartcity	trajectory
DLRpa	Flugzeug Meteopod	Rosemount model 858 AJ air velocity probe	u,v,w,wdir, wspeed	stuttgartcity	trajectory
DLRpa	Flugzeug Meteopod	Rosemount model 858 AJ air velocity probe	u,v,w,wdir, wspeed	stuttgartcity	trajectory

*Wind: VALR05 und 07, Hamburg, Messzeiträume: jeweils von 00:00 bis 00:00 UTC vom 21.01.2017-01.02.2017, 14.08.2017-18.09.2017, 15.01.2018-13.02.2018 und 13.08.2018-12.09.2018*

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp "featureType"
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 3.25 m Höhe (Anton)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 6.75 m Höhe (Alfa)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 3.25 m Höhe (Berta)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 6.75 m Höhe (Bravo)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 3.25 m Höhe (Cäsar)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 6.75 m Höhe (Charlie)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 3.25 m Höhe (Dora)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 6.75 m Höhe (Delta)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 3.25 m Höhe (Emil)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 6.75 m Höhe (Echo)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 3.25 m Höhe (Friedrich)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 6.75 m Höhe (Foxtrott)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
TUDDmeteo	Teleskop Mast (30 m, feste Position)	Young 81000, Clarkmast CM1, 2.5 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	baakenhoeft	timeSeries
TUDDmeteo	Teleskop Mast (30 m, feste Position)	Young 81000, Clarkmast CM2, 5.3 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	baakenhoeft	timeSeries
TUDDmeteo	Teleskop Mast (30 m, feste Position)	Young 81000, Clarkmast CM3, 11.5 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	baakenhoeft	timeSeries
TUDDmeteo	Teleskop Mast (30 m, feste Position)	Young 81000, Clarkmast CM4, 20.6 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	baakenhoeft	timeSeries
TUDDmeteo	Teleskop Mast (30 m, feste Position)	Young 81000, Clarkmast CM5, 31.0 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	baakenhoeft	timeSeries
TUDDmeteo	Mobiler Mast (4 m, wechselnde Position)	Young 81000, Mobiler Mast, MM1, 0.4 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	baakenhoeft	timeSeries
TUDDmeteo	Mobiler Mast (4 m, wechselnde Position)	Young 81000, Mobiler Mast, MM2, 1.4 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	baakenhoeft	timeSeries
TUDDmeteo	Mobiler Mast (4 m, wechselnde Position)	Young 81000, Mobiler Mast, MM3, 4.0 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	baakenhoeft	timeSeries
TUDDmeteo	Fesselsonde	3-cup anemometer (tethered sounding system)	wspeed	hcuroof	timeSeries
TUDDmeteo	Fesselsonde	Digicora (tethered	wdir	hcuroof	timeSeries

		sounding system)			
TUDDmeteo	Klimastation (temporär)	Wetterstation WXT520 (Vaisala, Finland)	u,v,w,wspeed, wdir	hcuroof	timeSeries
UHHmeteo (METEK)	LiDAR	METEK HALO Photonics Stream Line XR Doppler LiDAR	u,v,wspeed, wdir	hcuroof	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	Vaisala WXT520, 9.0 m	u,v,wspeed, wdir	hcuroof	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Vaisala WXT530, vor 16.06.2017 CS WindSonic1-L 2D	wspeed,wdir	stb	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell Scientific WindSonic1-L 2D	wspeed,wdir	hcv	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Vaisala WXT530, vor 21.06.2017 CS WindSonic1-L 2D	wspeed,wdir	lgs	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Vaisala WXT530, vor 21.06.2017 CS WindSonic1-L 2D	wspeed,wdir	lra	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Vaisala WXT530 ab 12.06.2017, vor 04.05.2017 CS WindSonic1-L 2D	wspeed,wdir	sgs	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Vaisala WXT530, vor 21.06.2017 CS WindSonic1-L 2D	wspeed,wdir	sra	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Vaisala WXT530, vor 19.06.2017 CS WindSonic1-L 2D	wspeed,wdir	zbi	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Vaisala WXT530, vor 19.06.2017 CS WindSonic1-L 2D	wspeed,wdir	wgs	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Vaisala WXT530, vor 19.06.2017 CS WindSonic1-L 2D	wspeed,wdir	war	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Vaisala WXT530, vor 16.06.2017 CS WindSonic1-L 2D	wspeed,wdir	rra	timeSeries
UHHmeteo	Campbell Scientific CSAT3	CSAT3	u,v,w,wspeed, wdir	eddy1	timeSeries
UHHmeteo	Grenzschichtmast	METEK USA-1, 10 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	weathermast	timeSeries
UHHmeteo	Grenzschichtmast	METEK USA-1, 50 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	weathermast	timeSeries
UHHmeteo	Grenzschichtmast	METEK USA-1, 70 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	weathermast	timeSeries
UHHmeteo	Grenzschichtmast	METEK USA-1, 110 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	weathermast	timeSeries
UHHmeteo	Grenzschichtmast	METEK USA-1, 175 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	weathermast	timeSeries
UHHmeteo	Grenzschichtmast	METEK USA-1, 250 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	weathermast	timeSeries
UHHmeteo	Grenzschichtmast	METEK USA-1, 280 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	weathermast	timeSeries

**Strahlung und Wolken: VALR01, Berlin, Messzeiträume: 17.01.2017 06:00 bis 18.01.2017 06:00 UTC**

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp "featureType"
DWD	Klimastation	CM21	rsd	lindenberg	timeSeries
DWD	Klimastation	SCAPP	rsd, rsddif	airportsfx	timeSeries
DWD	Klimastation	SCAPP	rsd, rsddif	airporttxl	timeSeries
DWD	Klimastation	SCAPP	rsd, rsddif	airportthf	timeSeries
DWD	Klimastation	CM11, CG4	rsd, rsddif, rld	potsdam	timeSeries
TUBklima	Messmast	Lambrecht Sternpyranometer type 1610	rsd	jagen91	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Kipp & Zonen NR Lite, Apogee Instruments SP-110	rnds, rsd	potsdamneuga	timeSeries
TUBklima	Klimastation, Dach	Kipp & Zonen CNR1, Kipp & Zonen NR Lite, Lambrecht Sternpyranometer type 1610	rld, rlu, rsd, rsu, rnds	rothenburg	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Kipp & Zonen NR Lite, Apogee Instruments SP-110	rnds, rsd	schlosscharl	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Apogee IRTS, Kipp & Zonen NR Lite, Campbell Scientific CS300	rlu, rnds, rsd, rsu	tucanteen	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Apogee Instruments SP-110	rsd	tumainlawn	timeSeries
TUBklima	Messmast	Kipp & Zonen CNR4, Delta-T Devices SPN1	rld, rlu, rsd, rsu, rsddif	tumainroof	timeSeries
TUBklima	Balkongeländer	Apogee Instruments SP-110	rsd	tumathnorth	timeSeries
TUBklima	Balkongeländer	Apogee Instruments SP-110	rsd	tumathsouth	timeSeries
TUBklima	geparkter Bus	Apogee Instruments SP-110	rsd	tustr17east	timeSeries
TUBklima	Messmast	Kipp & Zonen CGR3, Kipp & Zonen CM3	rld, rsd	wiener	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Thiess	rsd,rsddif	ifmroof	timeSeries

**Strahlung und Wolken: VALR02, Berlin, Messzeiträume: 16.07.2018 06:00 bis 18.07.2018 06:00 UTC**

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp "featureType"
HUBgeo	Klimastation	CNR1 (Kipp & Zonen)	rsd , rsu , rld , rlu	adlershofgeo	timeSeries
HUBgeo	Klimastation	RA01-05 (Hukseflux)	rsd, rld	adlershofgeo	timeSeries
DWDfelg	Fesselsonde	net radiation tethersonde	rsd, rsu, rld, rlu	airportthf	trajectory
DWDfelg	Mobile Station	CMP21, CGR4	rsd, rsu, rld, rlu	airportthf	timeSeries
DWDku1	Klimastation	Kipp und Zonen, CNR4	rsd, rsu, rld, rlu, rnds	tuchembuild	timeSeries
DWD	Klimastation	CM21	rsd	lindenberg	timeSeries
DWD	Klimastation	SCAPP	rsd, rsddif	airportsfx	timeSeries
DWD	Klimastation	SCAPP	rsd, rsddif	airporttxl	timeSeries
DWD	Klimastation	SCAPP	rsd, rsddif	airportthf	timeSeries
DWD	Klimastation	CM11, CG4	rsd, rsddif, rld	potsdam	timeSeries
TUDDmeteo	Fahrrad	CS300 (Apogee), SK215 (Skye), IR 1000 (Volkraft)	rsd, pard, paru, ts	charlottenb	trajectory
TUDDmeteo	Rucksack	SKS 1110 (Skye Instruments), LI-190SZ (Li-Cor, Inc), IR120 (Campbell Scientific)	rsd, pard, paru, rld, ts	charlottenb	trajectory

TUDDmeteo	Fahrrad	Thermoelement FW3, CS300 (Apogee), SK215 (Skye), IR 1000 (Volkraft), HMP45 (Vaisala), Schalenkreuzanemometer	t_mrt, t_perceived, t_pet, t_utci	charlottenb	trajectory
TUDDmeteo	Rucksack	Thermoelement FW3, SKS 1110 (Skye Instruments), LI-190SZ (Li-Cor, Inc), IR120 (Campbell Scientific), WXT520 (Vaisala)	t_mrt, t_perceived, t_pet, t_utci	charlottenb	trajectory
TUBklima	Klimastation	Kipp & Zonen CNR1	rld, rlu, rsd, rsu	airportthf	timeSeries
TUBklima	Messmast	Lambrecht Sternpyranometer type 1610	rsd	jagen91	timeSeries
TUBklima	BLUME-Messcontainer	Apogee Instruments SP-110	rsd	mc115	timeSeries
TUBklima	BLUME-Messcontainer	Apogee Instruments SP-110	rsd	mc117	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Kipp & Zonen NR Lite, Apogee Instruments SP-110	rnds, rsd	potsdamneuga	timeSeries
TUBklima	Messmast	Kipp & Zonen CNR4, Delta-T Devices SPN1	rld, rlu, rsd, rsu, rsddif	rothenburg	timeSeries
TUBklima	Biomet-Station	Ingo Suchland ping-pong globe thermometer	tg	schillerosz	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Kipp & Zonen CNR4	rld, rlu, rsd, rsu	schillerosz	timeSeries
TUBklima	Klimastation	Kipp & Zonen NR Lite, Apogee Instruments SP-110	rnds, rsd	schlosscharl	timeSeries
TUBklima	Messmast	Kipp & Zonen CNR4, Delta-T Devices SPN1	rld, rlu, rsd, rsu, rsddif	tumainroof	timeSeries
TUBklima	Messmast	Kipp & Zonen CGR3, Kipp & Zonen CM3	rld, rsd	wiener	timeSeries
FUBmeteo	Klimastation	Kipp & Zonen	rsd	ifmroof	timeSeries

**Strahlung und Wolken: VALR03, Stuttgart, Messzeitraum: 14.02.2017 06:00 bis 16.02.2017 06:00 UTC**

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp "featureType"
DWDku1	Klimastation	Kipp & Zonen, CNR4	rsd, rsu, rld, rlu, rnds	nesenbachtal	timeSeries

**Strahlung und Wolken: VALR04, Stuttgart, Messzeitraum: 08.07.2018 04:00 bis 09.07.2018 19:00 UTC**

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp "featureType"
DWDfelg	Fesselsonde	net radiation tethersonde	rsd, rsu, rld, rlu	bcreitstad	trajectory
DWDfelg	Mobile Station	CMP21, CGR4	rsd, rsu, rld, rlu	bcreitstad	timeSeries

**Strahlung und Wolken:** VALR05, Hamburg, Messzeiträume: jeweils von 00:00 bis 00:00 UTC vom 21.01.2017-01.02.2017, 14.08.2017-18.09.2017, 15.01.2018-13.02.2018 und 13.08.2018-12.09.2018

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp "featureType"
UHHmeteo	Klimastation	Campbell Scientific CS300	rsd	stb	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell Scientific CS300	rsd	hcv	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell Scientific CS300	rsd	lgs	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell Scientific CS300	rsd	lra	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell Scientific CS300	rsd	sgs	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell Scientific CS300	rsd	sra	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell Scientific CS300	rsd	zbi	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell Scientific CS300	rsd	wgs	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell Scientific CS300	rsd	war	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell Scientific CS300	rsd	rra	timeSeries

**Turbulenz und Eddy-Kovarianz:** VALR05 und 07, Hamburg, Messzeiträume: jeweils von 00:00 bis 00:00 UTC vom 21.01.2017-01.02.2017, 14.08.2017-18.09.2017, 15.01.2018-13.02.2018 und 13.08.2018-12.09.2018

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp (featureType)
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 3.25 m Höhe (Anton)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 6.75 m Höhe (Alfa)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 3.25 m Höhe (Berta)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 6.75 m Höhe (Bravo)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 3.25 m Höhe (Cäsar)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 6.75 m Höhe (Charlie)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 3.25 m Höhe (Dora)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 6.75 m Höhe (Delta)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 3.25 m Höhe (Emil)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 6.75 m Höhe (Echo)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 3.25 m Höhe (Friedrich)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
UHHmeteo	Mobiler Mast	METEK USA-1, 6.75 m Höhe (Foxtrott)	u,v,w,wspeed, wdir	ueberseeallee	timeSeries
TUDDmeteo	Teleskop Mast (30 m, feste Position)	Young 81000, Clarkmast CM1, 2.5 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	baakenhoeft	timeSeries
TUDDmeteo	Teleskop Mast (30 m, feste Position)	Young 81000, Clarkmast CM2, 5.3 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	baakenhoeft	timeSeries
TUDDmeteo	Teleskop Mast (30 m, feste Position)	Young 81000, Clarkmast CM3, 11.5 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	baakenhoeft	timeSeries

TUDDmeteo	Teleskop Mast (30 m, feste Position)	Young 81000, Clarkmast CM4, 20.6 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	baakenhoeft	timeSeries
TUDDmeteo	Teleskop Mast (30 m, feste Position)	Young 81000, Clarkmast CM5, 31.0 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	baakenhoeft	timeSeries
TUDDmeteo	Mobiler Mast (4 m, wechselnde Position)	Young 81000, Mobiler Mast, MM1, 0.4 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	baakenhoeft	timeSeries
TUDDmeteo	Mobiler Mast (4 m, wechselnde Position)	Young 81000, Mobiler Mast, MM2, 1.4 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	baakenhoeft	timeSeries
TUDDmeteo	Mobiler Mast (4 m, wechselnde Position)	Young 81000, Mobiler Mast, MM3, 4.0 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	baakenhoeft	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	Campbell Scientific CSAT3	u,v,w,wspeed, wdir	eddy1	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	METEK USA-1, 10 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	weathermast	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	METEK USA-1, 50 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	weathermast	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	METEK USA-1, 70 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	weathermast	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	METEK USA-1, 110 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	weathermast	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	METEK USA-1, 175 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	weathermast	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	METEK USA-1, 250 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	weathermast	timeSeries
UHHmeteo	Klimastation	METEK USA-1, 280 m Höhe	u,v,w,wspeed, wdir	weathermast	timeSeries

**Thermischer Wirkungskomplex: VALR02, Berlin, Messzeitraum: 16.07.2018 06:00 bis 18.07.2018 06:00 UTC**

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp (featureType)
TUBklima	Biomet-Station	Kipp & Zonen CNR4, Campbell Scientific CS215, Gill Instruments WindMaster 1590-PK-020	t_mrt, t_perceived, t_pet, t_utci	schillerosz	timeSeries
TUDDmeteo	Fahrrad	Thermoelement FW3, CS300 (Apogee), SK215 (Skye), IR 1000 (Volkraft), HMP45 (Vaisala), Schalenkreuzanemometer	t_mrt, t_perceived, t_pet, t_utci	charlottenb	trajectory
TUDDmeteo	Rucksack	Thermoelement FW3, SKS 1110 (Skye Instruments), LI-190SZ (Li-Cor, Inc), IR120 (Campbell Scientific), WXT520 (Vaisala)	t_mrt, t_perceived, t_pet, t_utci	charlottenb	trajectory

**Luftchemie: VALR01, Berlin, Messzeitraum: 17.01.2017 06:00 UTC bis zum 18.01.2017 06:00 UTC**

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp (featureType)
HUBgeo	Klimastation	Grimm EDM 465 UFPC	ncaa	adlershofgeo	timeSeries
HUBgeo	Klimastation	Grimm EDM 465 UFPC	ncaa	tumathsouth	timeSeries
HUBgeo	Fassade Gebäude	Grimm 1.109	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	tumathsouth	timeSeries
HUBgeo	Fahrrad	Grimm 1.109	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	charlottenb	trajectory
HUBgeo	Klimastation	Grimm 107	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	adlershofgeo	timeSeries
FZJiek8	Kfz	Decati ELPI	mcaa, ncaa, psa	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	TSI CPC-3788	ncaa	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Picarro G2311-f CRD	mfco2, mfch4, mfh2o	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	AeroLaser AL5002	mfco	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Aerodyne CAPS	mfno2	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	EcoPhysics CLD770 AL ppt	mfno2, mfno, mfnof	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Picarro G2103 CRD	mfnh3	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Los Gatos Off-axis ICOS	mfnh3	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Thermo Scientific 43i-TLE	mfso2	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Ansyco O342M	tro3	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Agilent GC/MS/FID	voc*	berlincity	trajectory
TUBSgeo	Fahrrad-anhänger	MicroAeth AE51 (Aethlabs), NanoScan 3919 (TSI), WindSonic (Gill Instruments)	mcabcd, ncaa, wspeed, wdir	chartransect	trajectory
TUBSgeo	Fahrrad-anhänger	CPC 3007 (TSI)	ncaa	chartransect	trajectory
TUBSgeo	Containerdach	EEPS 3090 (TSI)	ncaa	tucontainer	timeSeries
TUBSgeo	Fahrrad	CPC 3007 (TSI), Licor 840A	ncaa, mfco2	charlottenb	trajectory

\* Variablenkategorie für VOC

**Luftchemie: VALR 02, Berlin, Messzeitraum: 16.07.2018 06:00 UTC bis 18.07.2018 06:00 UTC**

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp (featureType)
HUBgeo	Klimastation	Grimm EDM 465 UFPC	ncaa	adlershofgeo	timeSeries
HUBgeo	Mobile Station	TSI 3007	ncaa	adlershof	trajectory
HUBgeo	Messfahrrad	OPC-N2 (Urbmobi 3.0)	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	adlershof	trajectory
HUBgeo	Messfahrrad	OPC-N2 (Urbmobi 3.0)	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	steglitzarea	trajectory
HUBgeo	Messfahrrad	OPC-N2 (Urbmobi 3.0)	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	charlottenb	trajectory
HUBgeo	Kfz	Grimm 1.109	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	tustr17west	timeSeries
HUBgeo	Klimastation	Grimm 107	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	adlershofgeo	timeSeries
HUBgeo	Mobile Station	Grimm 1.109	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	amselne	timeSeries



FZJiek8	Kfz	Decati ELPI	mcaa, ncaa, psa	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	TSI CPC-3788	ncaa	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Picarro G2401 CRD	mfco2, mfch4, mfh2o, mfco	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	AeroLaser AL5002	mfco	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Aerodyne CAPS	mfno2	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	EcoPhysics CLD770 AL ppt	mfno2, mfno, mfnof	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Picarro G2103 CRD	mfnh3	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Los Gatos Off-axis ICOS	mfnh3	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Thermo Scientific 43i-TLE	mfso2	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Ansyco O342M	tro3	berlincity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Agilent GC/MS/FID	voc*	berlincity	trajectory
TUBSgeo	Messfahrad	CPC 3007 (TSI)	ncaa, mfco2	charlottenb	trajectory
TUBSgeo	Messmast	EEPS 3090 (TSI), USA-1 (Metek GmbH)	ufluxufp	tumainroof	timeSeries
TUBSgeo	Fahrrad-anhänger	MicroAeth AE51 (Aethlabs), NanoScan 3919 (TSI), WindSonic (Gill Instruments)	mcbcd, ncaa, wspeed, wdir	chartransect	trajectory
TUBSgeo	Fahrrad-anhänger	CPC 3007 (TSI)	ncaa	chartransect	trajectory
TUBSgeo	Messhäuschen (ca. 1,50 m)	Licor 804A	mfco2	tumainroof	timeSeries

\* Variablenkategorie für VOC

**Luftchemie:** VALR 03, Stuttgart, Messzeitraum: 14.02.2017 06:00 UTC bis 16.02.2017 06:00 UTC

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp (featureType)
USifk	Fahrrad	Optical Particle Counter (Grimm 1.108)	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	vsouthdl	trajectory
USifk	Fahrrad	NO2/NO/NOx Sensor (2B Technologies 405nm)	mfno2, mfno, mfnof	vsouthdl	trajectory
USifk	Fahrrad	O3 Sensor (2B Technologies OM202)	mfo3	vsouthdl	trajectory
USifk	Fahrrad	Aethalometer (Aethlabs AE51)	mcbcd	vsouthdl	trajectory
FZJiek8	Kfz	Decati ELPI	mcaa, ncaa, psa	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	TSI CPC-3788	ncaa	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Picarro G2401 CRD	mfco2, mfch4, mfh2o, mfco	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	AeroLaser AL5002	mfco	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Aerodyne CAPS	mfno2	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	EcoPhysics CLD770 AL ppt	mfno2, mfno, mfnof	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Picarro G2103 CRD	mfnh3	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Los Gatos Off-axis ICOS	mfnh3	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Thermo Scientific 43i-TLE	mfso2	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Ansyco O342M	tro3	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Agilent GC/MS/FID	voc*	stuttgartcity	trajectory

\* Variablenkategorie für VOC

**Luftchemie:** VALR 04, Stuttgart, Messzeitraum: 08.07.2018 04:00 UTC bis 09.07.2018 04:00 UTC

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp (featureType)
USifk	Fesselballon	Optical Particle Counter (Grimm 1.108)	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	cityusgfw	trajectory
USifk	Fesselballon	NO2/NO/NOx Sensor (2B Technologies 405nm)	mfno2, mfno, mfnofx	cityusgfw	trajectory
USifk	Fesselballon	O3 Sensor (2B Technologies OM202)	mfo3	cityusgfw	trajectory
USifk	Fesselballon	Aethalometer (Aethlabs AE51)	mcbcd	cityusgfw	trajectory
USifk	Fesselballon	TSI CPC-3007	ncaa	cityusgfw	trajectory
USifk	Messstation	Optical Particle Counter (Grimm EDM180)	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	marienpl	timeSeries
USifk	Messstation	NO/NOx Sensor (MLU200a)	mfno2, mfno, mfnofx	marienpl	timeSeries
USifk	Messstation	O3 Sensor (Horiba APOA360)	mfo3	marienpl	timeSeries
USifk	Messstation	CO Sensor (Horiba APMA360)	mfc	marienpl	timeSeries
USifk	Messstation	Aethalometer (Magee AE33)	mcbcd	marienpl	timeSeries
FZJiek8	Kfz	Decati ELPI	mcaa, ncaa, psa	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	TSI CPC-3788	ncaa	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Picarro G2401 CRD	mfc2, mfch4, mfh2o, mfc	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	AeroLaser AL5002	mfc	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Aerodyne CAPS	mfno2	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	EcoPhysics CLD770 AL ppt	mfno2, mfno, mfnofx	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Picarro G2103 CRD	mfnh3	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Los Gatos Off-axis ICOS	mfnh3	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Thermo Scientific 43i-TLE	mfso2	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Ansyco O342M	tro3	stuttgartcity	trajectory
FZJiek8	Kfz	Agilent GC/MS/FID	voc*	stuttgartcity	trajectory
DLRpa	Flugzeug	GHG Analyzer (Picarro G1301-m)	CH4, CO2 (mfch4, mfc2)	stuttgartcity	trajectory
DLRpa	Flugzeug	CAPS NO2 (Aerodyne)	NO2 (mfno2)	stuttgartcity	trajectory
DLRpa	Flugzeug	O3 Analyzer (2B Technologies)	O3 (tro3)	stuttgartcity	trajectory

\* Variablenkategorie für VOC

Sondermesskampagnen (SOP)

Institution	Plattform	Gerät	Variable	Messort	Datentyp (featureType)
SOP01					
28.04.-10.05.2020					
FZJiek8	Kfz	Decati ELPI, TSI CPC-3788, Picarro G2401 CRD, AeroLaser AL5002, Aerodyne CAPS, EcoPhysics CLD770 AL ppt, Picarro G2103 CRD, Los Gatos Off-axis ICOS, Thermo Scientific 43i-TLE, Ansyco O342M, Agilent GC/MS/FID, Visala WXT520	mcaa, ncaa, psa, mfco2, mfch4, mfh2o, mfco, mfno2, mfno, mfnox, mfnh3, mfso2, tro3, voc, ta, hur	stuttgartcity	
FZJiek8	Zeppelin	10 components TDL (MIRO)	mfco2, mfh2o, mfco, mfco, mfno2, mfno, mfnox, mfnh3, tro3	stuttgartcity	
USIfk	Fahrrad	Optical Particle Counter (Grimm 1.108), NO2/NO/NOx Sensor (2B Technologies 405nm), O3 Sensor (2B Technologies OM202), Aethalometer (Aethlabs MA200)	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1, mfno2, mfno, mfnox, mfo3, mbcda	cityusgfw	trajectory
14.06.2021 und 17.06.2021					
TUDDmeteo	Rucksack	Thermoelement FW3, SKS 1110 (Skye Instruments), LI-190SZ (Li-Cor, Inc), IR120 (Campbell Scientific), WXT520 (Vaisala)	ta, hur, rsd, pard, paru, ts, t_mrt, t_perceived, t_pet, t_utci	dresden_strehlen	trajectory
06.08.2020 4 UTC - 07.08.2020 4 UTC					
LUHimuk	Multikopter	Messsystem (2x): DJI Flamewheel F550 + GRAW-Radiosonde DFM-06	ta, hur, plev, wspeed, wdir	maschsee und altenbdamm	Trajectory
LUHimuk	Messstation	Theodor-Friedrichs-Station (1x)	ta, hur, plev, rad_net, wspeed, wspeed_max, wdir	maschsee000	time series
LUHimuk	Messstation	Thies-Stationen (4x)	ta, hur, u, v, w, wspeed, wdir, t_va	maschsee060, maschsee150, maschsee250, maschsee400	time series

<b>SOP02</b>					
<b>27.07.-01.08.2020</b>					
<b>FZJiek8</b>	Kfz	Decati ELPI,TSI CPC-3788,Picarro G2401 CRD,AeroLaser AL5002,Aerodyne CAPS,EcoPhysics CLD770 AL ppt,Picarro G2103 CRD,Los Gatos Off-axis ICOS,Thermo Scientific 43i-TLE,Ansyco O342M,Agilent GC/MS/FID, Visala WXT520	mcaa, ncaa, psa,mfco2, mfch4, mfh2o, mfco,mfno2,mfno, mfnox,mfnh3,mfso2,tro3, voc,ta,hur	stuttgartcity	
<b>USifk</b>	Fahrrad	Optical Particle Counter (Grimm 1.108), NO2/NO/NOx Sensor (2B Technologies 405nm), O3 Sensor (2B Technologies OM202), Aethalometer (Aethlabs MA200)	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1, mfno2, mfno, mfnox, mco3, mcbcd	cityusgfw	trajectory
<b>SOP03</b>					
<b>10.08.-21.08.2021</b>					
<b>FZJiek8</b>	Kfz	Decati ELPI,TSI CPC-3788,Picarro G2401 CRD,AeroLaser AL5002,Aerodyne CAPS,EcoPhysics CLD770 AL ppt,Picarro G2103 CRD,Los Gatos Off-axis ICOS,Thermo Scientific 43i-TLE,Ansyco O342M,Agilent GC/MS/FID, Visala WXT520	mcaa, ncaa, psa,mfco2, mfch4, mfh2o, mfco,mfno2,mfno, mfnox,mfnh3,mfso2,tro3, voc,ta,hur	stuttgartcity	
<b>USifk</b>	Fahrrad	Optical Particle Counter (Grimm 1.108), NO2/NO/NOx Sensor (2B Technologies 405nm), O3 Sensor (2B Technologies OM202), CO2 sensor (LI-830 CO2 analyser), Aethalometer (Aethlabs MA200), Diffusion Charger (Testo Disc-Mini)	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1, mfno2, mfno, mfnox, mfo3, mfco2, mcbcd, ncaa	Möhringen	trajectory
<b>USifk</b>	Drohne	Optical Particle Counter (Alphasense OPC-N3), Aethalometer (Aethlabs MA200), Diffusion Charger (Testo Disc-Mini)	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1, mcbcd, ncaa	suedheimerpl, nesenbachtal	trajectory
<b>SOP04</b>					
<b>HUBgeo</b>	Fahrrad	ClimVUE, PALAS Frog	ta, hur, wspeed, wdir, mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	hasenheide	trajectory
<b>HUBgeo</b>	Hebebühne	Vaisala HMP155, RM-Young-05103-5, Hukseflux-RA01-05, Grimm 1.109	ta, hur, wspeed, wdir, mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	hasenheidetal	trajectory

<b>HUBgeo</b>	Messstation 1_Tempelhof erfeld	Vaisala HMP155 (x2), RM-Young-05103-5, Hukseflux-RA01-05, Grimm 107	ta, hur, wspeed, wdir, mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	tempelhoferfel d	time series
<b>HUBgeo</b>	Messstation 2_Tal	Grimm 1.108	mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	hasenheidetal nord	time series
<b>HUBgeo</b>	Messstation 3_Hasenhei de_50cm	Grimm 1.108, Ultrasonic Anemometer 3D, Hobo Temperatur- und Feuchtestation	ta, hur, u, v, w, wspeed, wdir, mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	hasenheidebo den50	time series
<b>HUBgeo</b>	Messstation 4_Hasenhei de_200cm	Grimm 107D, METEK Ultrasonic Anemometer 3D, Driesen+Kern	ta, hur, u, v, w, wspeed, wdir, mcpm10, mcpm2p5, mcpm1	hasenheidebo den200	time series