



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



FONA
Forschung für Nachhaltige
Entwicklung
BMBF

DREIDIMENSIONALE OBSERVIERUNG ATMOSPHERISCHER PROZESSE IN STÄDTEN – 3DO



01.06.20

Schlussbericht des Verbundvorhabens 3DO

<http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-11314>

Autorenschaft: Projektpartner der 14 Teilprojekte des Verbunds 3DO

Der Verbund 3DO hat im Rahmen der Fördermaßnahme „Stadtklima im Wandel“ die Aufgaben von Modul B „Beobachtungsdaten und Modell-evaluierung“ übernommen. Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01LP1602 als Maßnahme zur Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA; www.fona.de) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren. Die Fördermaßnahme wird vom Deutschen Luft- und Raumfahrt Projektträger betreut.

Autoren

Dieter Scherer¹, Ute Fehrenbach¹, Tom Grassmann¹, Achim Holtmann¹, Andreas Kerschbaumer^{1a}, Alexander Krug¹, Fred Meier¹, Erik Petersen^{1b}, Andreas Philipp^{1b}, Katharina Scherber¹, Jörn Welsch^{1c}, Christoph Schneider², Janani Venkatraman Jagatha², Sabine Fritz², Sahar Sodoudi³, Ines Langer³, Joe Werner³, Uwe Ulbrich³, Stephan Weber⁴, Lars Gerling⁴, Agnes Meyer-Kornblum⁴, Erika von Schneidemesser⁵, Guillermo Villena⁵, Dieter Klemp⁶, René Dubus⁶, Umar Javed⁶, Robert Wegener⁶, Bianca Adler⁷, Stefan Emeis^{7a}, Christopher Holst^{7a}, Norbert Kalthoff⁷, Olga Kiseleva⁷, Martin Kohler⁷, Andreas Wieser⁷, Matthias Zeeman^{7a}, Ulrich Vogt⁸, Abdul Samad⁸, Valeri Goldberg⁹, Ronald Queck⁹, Felix Ament¹⁰, Bernd Leitzl¹⁰, Kerstin Surm¹⁰, Sarah Wiesner¹⁰, Meinolf Koßmann¹¹, Ralf Becker^{11a}, Vera Heene¹¹, Christina Hodan¹¹, Peter Stanislawsky^{11b}, Günter Groß¹², Gregor Meusel¹², Peter Trute¹³, Björn Büter¹³, Dirk Pavlik¹³, Thilo Erbertseder¹⁴, Anke Roiger¹⁴, Theresa Klausner¹⁴, Magdalena Pühl¹⁴

¹ Institut für Ökologie, Fachgebiet Klimatologie, Technische Universität Berlin, Deutschland

^{1a} Referat Immissionsschutz, Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, Berlin, Deutschland

^{1b} Institut für Geographie, Universität Augsburg, Deutschland

^{1c} Referat Geodateninfrastruktur, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen, Berlin, Deutschland

² Geographisches Institut, Humboldt-Universität zu Berlin, Deutschland

³ Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin, Deutschland

⁴ Institut für Geoökologie, Technische Universität Braunschweig, Deutschland

⁵ Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung, Potsdam, Deutschland

⁶ Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK), IEK-8: Troposphäre, Forschungszentrum Jülich, Deutschland

⁷ Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland

^{7a} Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie, Garmisch-Partenkirchen, Deutschland

⁸ Institut für Feuerungs- und Kraftwerktechnik, Universität Stuttgart, Deutschland

⁹ Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden, Deutschland

¹⁰ Meteorologisches Institut, Universität Hamburg, Deutschland

¹¹ Deutscher Wetterdienst, Offenbach, Deutschland

^{11a} Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Lindenberg, Deutschland

^{11b} Deutscher Wetterdienst, Klima- und Umweltberatung, Potsdam, Deutschland

¹² Institut für Meteorologie und Klimatologie, Leibniz Universität Hannover, Deutschland

¹³ GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover, Dresden, Deutschland

¹⁴ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, Deutschland

INHALT

TEIL I – EINLEITUNG UND ÜBERBLICK	1
STADTKLIMA IM WANDEL	1
DER VERBUND 3DO	4
TEIL II – DREIDIMENSIONALE OBSERVIERUNGEN IN STÄDTEN	7
BERLIN – DIE IDEALE MODELLSTADT	9
<i>Die dreidimensionale Struktur der Stadtatmosphäre</i>	11
<i>Die atmosphärische Grenzschicht in Berlin und im Umland</i>	15
<i>Die atmosphärische Grenzschicht an einem heißen Tag</i>	17
<i>Spurenstoffverteilung innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht</i>	20
<i>Räumliche Unterschiede von Partikelanzahlkonzentrationen</i>	22
<i>Tages- und Jahreszeitabhängigkeiten von Spurenstoffkonzentrationen</i>	25
<i>Luftqualitätsunterschiede zwischen Werk- und Wochenendtag</i>	28
<i>Jahres- und Tagesgang des latenten Wärmestroms</i>	30
<i>Kühlwirkung einer städtischen Grünfläche bei anhaltender Trockenheit</i>	31
<i>Mobile Messungen der thermischen Belastung von Stadtbewohnern</i>	32
<i>Gebäudeformen und thermisches Empfinden</i>	34
HAMBURG – MARITIMES STADTKLIMA GEPRÄGT DURCH WIND	35
<i>Messkonzept</i>	38
<i>Qualitätssicherung der Windmessdaten</i>	40
<i>Lokale Veränderung des Windfelds</i>	41
<i>Stadt im Wandel</i>	42
<i>Beispiel für eine winterliche Inversion</i>	43
STUTTGART – DIE STADT MIT DEN GRÖßTEN LUFTGÜTEPROBLEMEN	44
<i>Nächtliche Temperaturinversionen und die Kühlwirkung des Nesenbachtalwindes in Stuttgart</i>	47
<i>Vertikalprofilmessungen im Kaltental westlich des Stadtzentrums</i>	53
<i>Horizontalverteilung der Luftverunreinigungen im Stadtgebiet</i>	55
<i>Überprüfung aktueller Kraftfahrzeug-Emissionsfaktoren</i>	64
<i>Vertikalverteilung von Luftverunreinigungen und meteorologischen Größen</i>	67
<i>Flugzeugmessungen</i>	72
<i>Messvergleiche zur Datenharmonisierung</i>	75
TEIL III – VERBUNDÜBERGREIFENDE AUFGABEN	79
DATENMANAGEMENT	79
<i>[UC]² Datennutzungsrichtlinien</i>	79
<i>[UC]² Datenstandard</i>	81
<i>[UC]² Datenmanagementsystem</i>	82
MODELLEVALUIERUNG	84
KNOWLEDGE BASE	90
TEIL IV – ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	91
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	93
GLOSSAR	95
LITERATUR	103
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	109
TABELLENVERZEICHNIS	114

Hinweis:

In diesem Bericht wird aus Gründen der Lesbarkeit für Funktionen das generische Maskulinum verwendet, sofern die Aufgabenbeschreibung im Vordergrund steht. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich ebenfalls angesprochen, soweit es für die Aussage erforderlich ist. Sofern die Person hinter der Funktion (aufgrund von Motivation oder anderer individueller Eigenschaften) relevant ist, wird entsprechend darauf geachtet, die Diversität der Geschlechter(-identitäten) abzubilden.

Dreidimensionale Observierung atmosphärischer Prozesse in Städten – 3DO

SCHLUSSBERICHT DES VERBUNDVORHABENS 3DO

TEIL I – EINLEITUNG UND ÜBERBLICK

Stadtklima im Wandel

Bereits heute verursachen Starkniederschläge und Stürme, Hitze- und Kältewellen, Trockenperioden und Dürren sowie Episoden mit erhöhter Luftbelastung gravierende Gesundheitsbelastungen bis hin zu Todesfällen und wirtschaftliche Schäden. In Großstädten und Stadtregionen besteht durch die Konzentration der Bevölkerung einerseits sowie die von urbanen Strukturen verursachten Modifikationen der atmosphärischen Prozesse andererseits ein besonders hoher diesbezüglicher Handlungsbedarf. Durch die regionalen Folgen des globalen Klimawandels sowie einer zunehmenden Urbanisierung werden sich die genannten Probleme in den nächsten Jahrzehnten weiter verstärken und neue Strategien in der Stadtplanung erforderlich machen.

Die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) am 04.03.2015 ausgeschriebene Fördermaßnahme „Stadtklima im Wandel“¹ (engl. „Urban Climate Under Change – [UC]²“, im Folgenden Programm genannt) stellt sich der Herausforderung, Großstädten und Stadtregionen ein wissenschaftlich fundiertes, praxistaugliches Instrumentarium zur Bewältigung der mit heutigen und zukünftigen Klimabedingungen und Luftbelastungen einher gehenden Probleme an die Hand zu geben. Die erste Phase des Programms startete am 01.06.2016 und hatte eine Laufzeit von drei Jahren. Einige der Teilprojekte beantragten eine kostenneutrale Verlängerung mit unterschiedlicher Laufzeit.

Städte brauchen praxistaugliche Lösungen, um den regionalen Folgen des globalen Klimawandels und den Herausforderungen der zunehmenden Urbanisierung zu begegnen.

Ein zentrales Ziel des Programms ist die Entwicklung, Validierung und Anwendung eines gebäudeauflösenden Stadtklimamodells für ganze Großstädte wie z.B. Stuttgart, Hamburg oder Berlin. Dieses Stadtklimamodell soll eine praxistaugliche Lösung sein für die Planung von Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung des Stadtklimas und der Luftqualität, zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel. Bisher verfügbare

¹ www.uc2-program.org

Stadtklimamodelle sind entweder zu grobmaschig, um für die Planung äußerst wichtige mikroskalige Prozesse (z.B. an Gebäuden oder in Straßenschluchten) und lokalskalige Prozesse (z.B. in Stadtquartieren) 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 (Scherer et al., 2019b).

Die Entwicklung eines gebäudeauflösenden Stadtklimamodells ist eine Voraussetzung für die Lösung der zuvor genannten Probleme. Vor der Nutzung in der planerischen Praxis steht allerdings die Überprüfung und Beurteilung der Leistungsfähigkeit des neuen Stadtklimamodells, wie z.B., welche planerische Fragestellungen tatsächlich in Abhängigkeit von den atmosphärischen Bedingungen damit beantwortet werden können. 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 sollen im Rahmen des Programms bereits verfügbare Daten aufbereitet und fehlende Daten über Langzeitmessungen und Intensivmesskampagnen neu erhoben werden. Hierfür sind auch verbesserte Konzepte und Analysewerkzeuge erforderlich, wie z.B. zur Überprüfung des Modells oder zur Qualitätssicherung der Daten, deren Erarbeitung ein weiteres wichtiges Ziel des Programms darstellt. Darüber hinaus sollen die Beobachtungsdaten auch einer eigenständigen Verwertung für spezifische Anwendungen zugeführt werden können.

Eine weitere unabdingbare Anforderung an ein neues Stadtklimamodell ist 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 sind. Ausgewählte Anwendungsbeispiele und Nutzerkreise sollen daher direkt in die Modellentwicklung und Messdatenerhebung integriert werden, um die Praxistauglichkeit des Stadtklimamodells und der Messkonzepte und Analysewerkzeuge sicherzustellen.

Drei Module verfolgen sowohl mit jeweils eigenständigen wissenschaftlichen Arbeiten als auch in enger Verzahnung und Kooperation an den Schnittstellen der Module die Zielsetzungen des Programms (Abb. 1).

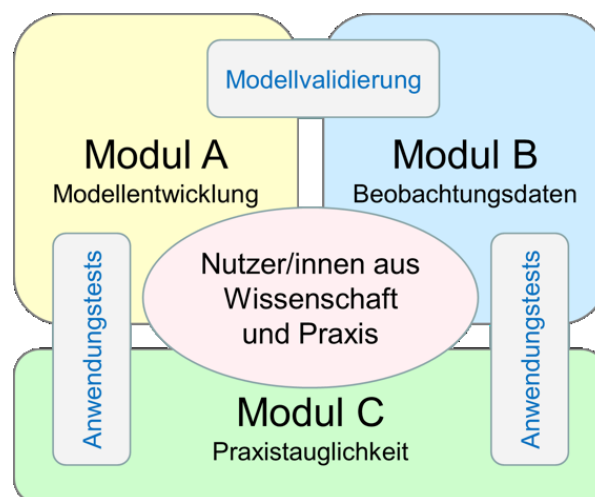


ABBILDUNG 1: Struktur des Programms „Stadtklima im Wandel“.

Die zentrale Aufgabe im Modul A „Entwicklung eines leistungsstarken Stadtklimamodells“ bestand darin, ein neues Stadtklimamodell zu entwickeln, das den übergeordneten Zielen des Programms gerecht wird. Das

Verbundvorhaben MOSAIK „Modellbasierte Stadtplanung und Anwendung im Klimawandel“² (engl. Model-based city planning and application in climate change) übernahm die Aufgaben des Moduls A (siehe auch Maronga et al., 2018) und entwickelte das neue Stadtklimamodell PALM-4U (PALM for urban application: *sprich PALM for you*).

In Modul B „Beobachtungsdaten und Modellevaluierung“ standen die Aufbereitung existierender und Erhebung neuer Beobachtungsdaten, die Evaluierung von PALM-4U sowie das Datenmanagement im Fokus (siehe auch Scherer et al., 2019a). Die Aufgaben des Moduls B wurden vom Verbundvorhaben „Dreidimensionale Observierung atmosphärischer Prozesse in Städten – 3DO“³ (engl. Three-Dimensional Observation of Atmospheric Processes in Cities) wahrgenommen.

Im Modul C „Überprüfung der Praxis- und Nutzertauglichkeit von Stadtklimamodellen“ wurden konkrete Anwendungen identifiziert, welche mit PALM-4U sowie den im Modul B erhobenen Beobachtungsdaten umgesetzt werden können. Die Verbundvorhaben KliMoPrax „Klimamodelle für die Praxis“ (engl. Climate Models for Practice) sowie UseUCLim „Beurteilung der praktischen Anwendbarkeit und der Nutzerfreundlichkeit eines Stadtklimamodells zur Förderung einer klimagerechten Stadtentwicklung“ (engl. Review of Practical and User Serviceability of an Urban Climate Model to Foster Climate Proof Urban Development) bedienten gemeinsam das Modul C⁴ (siehe auch Halbig et al., 2019).

² www.uc2-mosaik.org

³ www.uc2-3do.org

⁴ www.uc2-klimoprax-useuclim.org

Der Verbund 3DO

Der Klimawandel, eine zunehmende Urbanisierung und Umweltbelastungen sind in den vergangenen Jahren zu den wichtigsten Herausforderungen für Städte geworden. Atmosphärische Prozesse finden zwar in der Stadtplanung und Luftreinhaltung bereits Berücksichtigung, sind jedoch noch längst nicht ausreichend verstanden. Die Entwicklung klimaangepasster Stadtquartiere sowie die Transformation zu nachhaltigen Stadtteilen erfordern Beobachtungsdaten in Kombination mit Szenario-basierten numerischen Simulationen mit Stadtklimamodellen.

Städte zeichnen sich durch hochkomplexe Muster von Umweltbedingungen aus, deren räumliche und zeitliche Skalen über eine breite Palette reichen (Stewart & Oke, 2012; Barlow et al., 2017). Atmosphärische Prozesse, die an Gebäuden, Bäumen und in Straßenschluchten stattfinden, sind insbesondere in Bezug auf die Umgebungsbedingungen des Menschen von Bedeutung. Die Berücksichtigung atmosphärischer Prozesse, die sich räumlich über Hunderte von Metern bis Kilometern und zeitlich über Jahre erstrecken ist notwendig, wenn es um die Untersuchung der Umgebungsbedingungen in Stadtvierteln oder Bezirken geht. Großstädte werden zusätzlich durch atmosphärische Prozesse beeinflusst, die sich bis zu Hunderten Kilometern erstrecken können. Auch Wettersituationen und Klimabedingungen sowie der Ferntransport von Luftschadstoffen müssen bei der Untersuchung des Stadtklimas berücksichtigt werden. Und schließlich beeinflussen auch die globale atmosphärische Zirkulation, die Klimavariabilität und der Klimawandel die Stadtatmosphäre.

Trotz der großen Anzahl von Studien über Stadtklima und Luftqualität, sind Daten aus der Langzeitbeobachtung von atmosphärischen Prozessen in Städten spärlich (siehe z.B. Grimmond, 2006; Grimmond et al., 2010; Muller et al., 2013). Nur an wenigen Klimastationen in städtischen Regionen wurden Daten über mehrere Jahrzehnte oder sogar über 100 Jahre gemessen. In Deutschland halten Städte, wie z.B. Frankfurt, Freiburg, Stuttgart, Berlin oder Aachen, zwar solche Datensätze durch langfristige meteorologische Messungen an einzelnen Wetterstationen bereit, jedoch erlauben einzelne Wetterstationen noch keine Untersuchungen der städtischen Atmosphäre über alle räumlichen und zeitlichen Skalen.

Das Stadtklima, wie es von Menschen wahrgenommen und von Wetterstationen aufgezeichnet wird, ist stark durch dreidimensionale Prozesse in der untersten Schicht der Atmosphäre geprägt. Diese Schicht wird atmosphärische (oder auch planetare) Grenzschicht genannt (engl. Planetary boundary layer, PBL). Sie reicht vom Erdboden bis zu einer Höhe von ca. 500 bis 2000 m, wobei die Höhe der Schicht von der Rauigkeit des Untergrundes, der vertikalen Temperaturschichtung und der Windgeschwindigkeit abhängt. Die Höhe der PBL ist für die Luftqualität in Städten von größter Bedeutung, da sie die Ausbreitung von Luftschadstoffen stark beeinflusst (Stull, 1988; Angevine et al., 1998). Im Vergleich zum Umland sind über Städten beispielsweise die latenten und sensiblen Wärmeströme in der PBL aufgrund mechanisch und thermisch induzierter Turbulenz stark verändert. Diese Änderungen wirken sich u.a. auf den Energie- und Wasserhaushalt, aber auch auf die Bildung von Wärmeinseln in der Stadt aus (Arnfield, 2003; U.S. Environmental Protection Agency, 2008).

Bis heute sind die atmosphärischen Prozesse über Städten nicht ausreichend untersucht, da Daten aus der Langzeitbeobachtung verschiedener Höhen der PBL kaum verfügbar sind. Überwiegend wurden Daten während kurzfristiger Intensivmesskampagnen gewonnen, wie z.B. im Basler Stadtgrenzschicht-Experiment („Basel UrBan Boundary Layer Experiment“ – BUBBLE; Rotach et al., 2005). In den vergangenen Jahren wurden neue Messtechnologien, insbesondere für die bodenbasierte Fernerkundung von atmosphärischen Größen in der PBL und darüber hinaus, entwickelt (z.B. Emeis, 2015). Hohe Anschaffungs- und Betriebskosten dieser Messinstrumente sind der Hauptgrund dafür, dass dreidimensionale atmosphärische Beobachtungsdaten kaum vorhanden sind bzw. nur über kurze Beobachtungszeiträume vorliegen.

Die atmosphärische Grenzschicht ist für die Luftqualität in Städten von größter Bedeutung, da sie die Ausbreitung von Luftschadstoffen stark beeinflusst. Prozesse in dieser Schicht sind bis heute noch nicht ausreichend untersucht.

Der in Projektphase 1 (2016-2019) in 14 Teilprojekten (Tab. 1) organisierte Verbund realisierte sowohl Langzeitbeobachtungen (engl. Long-time Observations, LTOs) als auch Intensivmesskampagnen (engl. Intense Observation Periods, IOPs) mit einer hochauflösenden, hochgenauen Instrumentierung, um eine Vielzahl dreidimensionaler atmosphärischer Datensätze zu erheben. Diese Datensätze dienen als Grundlage für stadtklimatische Untersuchungen, ermöglichen eine Modellvalidierung und können auch direkt für Anwendungen, z.B. in der Stadtplanung und der Luftqualitätskontrolle, genutzt werden.

TABELLE 1: Übersicht der Teilprojekte Im 3DO Verbund.

Teilprojekt	Titel	Wissenschaftliche Leitung	Institution
TP1	Dreidimensionales Monitoring atmosphärischer Prozesse in Berlin	Prof. Dr. Dieter Scherer	Technische Universität Berlin
TP2	Urbane Mobile Messsysteme und GIS-Integration (URBMOBI-GIS)	Prof. Dr. Christoph Schneider	Humboldt-Universität zu Berlin
TP3	Überwachung, Messung und Erstellung einer räumlich-zeitlich hochaufgelösten 2 m Temperatur- und relativen Feuchtigkeitsanalyse für Berlin	Prof. Dr. Sahar Sodoudi Prof. Dr. Uwe Ulbrich	Freie Universität Berlin
TP4	Quantifizierung des turbulenten Oberfläche-Atmosphäre Austauschs von größenklassifizierten Partikelanzahlkonzentrationen, Wärme, Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid	Prof. Dr. Stephan Weber	Technische Universität Braunschweig
TP5	Mikrosensoren für hochaufgelöste Luftqualitätsmessungen	Dr. Erika von Schneidemesser	Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung (IASS)
TP6	Aufnahme zeitlich und räumlich hochaufgelöster Datensätze relevanter Spurenstoffe für Modellentwicklungs- und Evaluierungszwecke mit Hilfe eines mobilen Messlabors (MOBILAB)	Dr. Dieter Klemp	Forschungszentrum Jülich
TP7	Hochaufgelöste städtische Windfelder und Stadt-Umland-Wechselwirkungen	Prof. Dr. Stefan Emeis, Dr. Norbert Kalthoff	Karlsruher Institut für Technologie

Teilprojekt	Titel	Wissenschaftliche Leitung	Institution
TP8	Stadtklima und Luftreinhaltung in Stuttgart unter besonderer Berücksichtigung von thermischen Windsystemen	Dr. Ulrich Vogt	Universität Stuttgart
TP9	Kumulative Exposition von Fußgängern und Radfahrern in städtischer Umgebung	Dr. Valeri Goldberg	Technische Universität Dresden
TP10	Meteorologische Charakterisierung von Antrieb und städtischer Modifikation für die Beurteilung von Klimamodellen	Prof. Dr. Bernd Leidl, Prof. Dr. Felix Ament	Universität Hamburg
TP11	Messung und Evaluierung von thermischen Windsystemen und ihre Wirkung auf die Durchlüftung und die Hitzeinseln in Städten	Dr. Meinolf Koßmann	Deutscher Wetterdienst
TP12	Vertikalsondierung von meteorologischen Parametern mittels eines Octo-copter-Systems	Prof. Dr. Günter Groß	Leibniz Universität Hannover
TP13	Entwicklung eines Datenverwaltungssystems und Überprüfung eines Messkonzepts mittels numerischer Simulationen durch vorhandene Modelle	Peter Trute	GEO-NET
TP14	Evaluierung durch satelliten- und flugzeuggestützte Messungen	Thilo Erbertseder, Dr. Anke Roiger	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

TEIL II – DREIDIMENSIONALE OBSERVIERUNGEN IN STÄDTEN

Ein Hauptziel des Verbundprojekts 3DO ist die Erforschung der Auswirkungen der dritten, vertikalen Dimension auf Strömungseigenschaften, Energieaustausch und Luftqualitätsprozesse in der Stadtatmosphäre. Viele Prozesse können nur verstanden werden, wenn ihr vertikaler Aufbau bekannt ist, z.B. die Auswirkungen von Lufttemperaturinversionen einige hundert Meter über der Erde auf die oberflächennahen Luftschadstoffkonzentrationen. Erst in den vergangenen Jahren sind mobile Fernerkundungsgeräte (z.B. SODAR, Wind-LIDAR-Systeme) oder auch Luftfahrzeuge ohne Besatzung (engl. Uncrewed aerial vehicle, UAV) entwickelt worden, welche die Möglichkeit bieten, Daten über die vertikale Struktur der Atmosphäre an verschiedenen innerstädtischen Standorten zu erfassen. Eine wichtige Voraussetzung für die Untersuchung dreidimensionaler atmosphärischer Prozesse in Städten.

Im Weiteren verfolgt 3DO, maßstabskonsistente Daten eines breiten Spektrums von atmosphärischen Variablen zur Evaluierung des neuen Stadtklimamodells PALM-4U zu erheben. PALM-4U ist ein Large-Eddy Simulationsmodell, welches eine räumliche Auflösung bis zu einem Meter zulässt und so in der Lage ist, sehr kleinräumige Eigenschaften des Stadtklimas zu simulieren. Daher sind für die Evaluierung des Modells hochaufgelöste Beobachtungsdaten, sowohl in Zeit als auch Raum, an vielen Standorten und für unterschiedliche vertikale Erstreckungen nötig.

Dreidimensionale atmosphärische Datensätze liefern relevante Informationen für verschiedene Anwendungen in der Stadtplanung und Luftreinhaltung sowie für Maßnahmen zur Minderung und Anpassung an den Klimawandel.

Die 3DO-Partner haben im Laufe der Projektphase 1 bereits existierende atmosphärische Datensätze aufbereitet und Beobachtungsdaten mittels neuer Messinstrumente für Langzeitbeobachtungen (LTOs) und während Intensivmesskampagnen (IOPs) in den Städten Berlin, Hamburg und Stuttgart erhoben. Die Messungen wurden in sehr hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung über ausreichend lange Zeiträume zur Verbesserung der Datenbestände durchgeführt, die für die drei Städte und die umliegenden Regionen zur Verfügung stehen. Daten aus Windkanal-Experimenten ergänzen die Beobachtungsdaten und erlauben eine Charakterisierung von räumlichen und zeitlichen Ausprägungen der bodennahen Strömung und Ausbreitungsmessungen, z.B. von Luftschadstoffen. Zusätzlich bieten diese Daten eine weitere Möglichkeit für die Evaluierung von PALM-4U.

Aus den LTO- und IOP-Daten wurden Referenzdatensätze mit bekannter Genauigkeit und unter strenger Qualitätskontrolle für die Modelltests und die Modellevaluierung abgeleitet. Zu diesem Zweck wurden neue Messkonzepte und Analysewerkzeuge für eine effektive und effiziente Datenerfassung, -analyse und -verwaltung, für die Modellevaluierung sowie für die Verteilung der Daten und Ergebnisse an Endnutzer in verschiedenen Anwendungsbereichen entwickelt. Die Referenzdatensätze decken nicht nur die bodennahe Atmosphäre in den drei Modellstädten und ihre Umgebungen ab, sondern erstrecken sich auch vertikal über die PBL und teilweise darüber hinaus.

Die Winter-IOPs fanden in allen drei Städten 2017 und 2018 in den Monaten Januar und Februar statt, während die Sommer-IOPs von Juli bis August dauerten. Einige IOP-Messungen wurden über den Zeitraum der Hauptperioden hinaus durchgeführt (Tab. 2).

TABELLE 2: Zeiträume der IOP Messungen (Hauptperioden) und beteiligte Partner (TP).

	IOP 1	IOP 2	IOP 3	IOP 4
Berlin	17.01.-19.01.2017	30.07.-01.08.2017	26.01.-28.01.2018	16.07.-18.07.2018
TP	1-6, 12	1-6, 9, 11, 12	1-6, 12	1-6, 9, 11, 12, 14
Hamburg	21.01.-03.02.2017	15.08.-19.09.2017	15.01.-15.02.2018	13.08.-12.09.2018
TP	9, 10	10	9, 10	10
Stuttgart	09.02.-16.03.2017	05.07.-15.08.2017	08.02.-24.03.2018	14.06.-13.07.2018
TP	6-8, 12	6-8, 11, 12	6-8, 11, 12	6-8, 11, 12, 14

Die LTO- und IOP-Datensätze umfassen Wetter- und Klimadaten, Daten zu Turbulenz sowie Wind-, Energie- und Wasserhaushaltskomponenten, Impuls- und Massenströmen, sowie Daten zur Luftqualität. Atmosphärische Größen nahe der Erdoberfläche wurden hauptsächlich durch automatische Wetterstationen, Eddy-Kovarianz-Stationen und Luftgüte-Stationen erhoben. Darüber hinaus standen Datensätze von Fernerkundungssystemen für die drei Stadtregionen zur Verfügung. Die 3DO-Partner entwickelten sehr ausgeklügelte Forschungs-Setups, von Messgeräten auf Fahrrädern, Rucksäcken und Autos, über Gebäude und Masten, bis hin zu Messtechnik auf UAV, an Ballonen und einem Flugzeug. Für eine detaillierte Übersicht zu den Messgeräten, -größen und -höhen sowie weiteren Details siehe auch Scherer et al. (2019a).

Bereits bestehende Datensätze umfassen Geodaten (z.B. digitale Geländehöhen, Gebäude- und Vegetationshöhen) und administrative Daten (z.B. Verwaltungsgrenzen), die aus Geographischen Informations- sowie Fernerkundungssystemen verfügbar sind. Zeitreihendaten atmosphärischer Größen über Jahrzehnte oder längere Zeiträume sind aus verschiedenen Quellen erhältlich, z.B. von Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD), von offiziellen Luftgütemessnetzen oder institutionellen Messnetzen, wie z.B. den Stadtklima-Messnetzen der Technischen Universität Berlin (betrieben vom Fachgebiet Klimatologie⁵) und der Freien Universität Berlin (betrieben vom Institut für Meteorologie⁶). Die vorhandenen und durchaus umfassenden Datensätze, die bislang existieren, sind für das Verbundvorhaben nicht ausreichend. Eine unvollständige räumliche Abdeckung in allen drei Dimensionen (3D) sowie fehlende Größen erfordern zusätzliche Beobachtungen. Daher haben 3DO-Partner die Messungen an bestehenden LTO-Standorten durch neue Sensoren und Messinstrumente, die auch 3D-Daten erfassen können, und neue LTO-Stationen an Standorten in städtischen Gebieten, die bisher nicht ausreichend vertreten sind, installiert. Zusätzlich ergänzten mobile LTOs mit einer Vielzahl von Sensoren und Plattformen die stationären LTO-Standorte.

Die an der Universität Hamburg durchgeführten Windkanal-Simulationen ermöglichten es, ausgewählte Gebiete in den Städten Berlin, Hamburg und Stuttgart umfassend zu charakterisieren. Diese Gebiete werden auch Intense Observation Locations (IOLs) genannt, da dort vorrangig die umfassenden IOP-Beobachtungen stattfanden. Für jede IOL wurde ein Windkanalmodell im Maßstab 1:500 und mit einem Durchmesser von ca. 1.8 km gebaut (siehe dazu auch Teil II). Die IOLs wurden in einer sehr hohen räumlichen Detaillierung untersucht, um eine umfassende Bewertung des Stadtklimamodells PALM-4U zu gewährleisten.

⁵ https://www.klima.tu-berlin.de/index.php?show=forschung_dch_messnetz

⁶ <https://www.geo.fu-berlin.de/met/service/wetterdaten/index.html>

Berlin – die ideale Modellstadt

Berlin, die Hauptstadt und größte Stadt in Deutschland (890 km², 3'750'000 Einwohner in 2018) wurde für das Vorhaben gewählt, da die Stadt eine ideale Testumgebung für die Validierung von Stadtklimamodellen bietet. Das Stadtklima und die Luftqualität werden in Berlin weder durch topographisch induzierte atmosphärische Prozesse noch durch ein Land-See-Windsystem oder eine Küste nennenswert beeinflusst.

Die Daten der LTO-Standorte, welche verschiedene städtische Strukturen repräsentieren, dienen der Charakterisierung innerstädtischer Unterschiede der atmosphärischen Bedingungen, sowohl in Bodennähe als auch in der PBL (Abb. 2). Daher ermöglichen diese Daten die Analyse und Auswertung räumlicher Muster atmosphärischer Größen, wie z.B. der Lufttemperatur, Luftfeuchte oder Konzentrationen von Luftschadstoffen. Einige der LTO-Zeitreihen umfassen Zeiträume von mehr als 20 Jahren. Die längste Zeitreihe in Berlin liegt von der DWD-Wetterstation auf dem Tempelhofer Feld ab 1948 vor. Das von der TU Berlin betriebene Stadtklimamessnetz (UCON) bietet sogar eine der längsten Stadtklima-Zeitreihen in der Welt, mit Messungen seit 1990. Einige wenige Messungen haben sogar bereits 1986 begonnen. Die IOP-Messungen fanden hauptsächlich innerhalb der beiden IOLs Ernst-Reuter-Platz und Rothenburgstraße statt (Abb. 3). In den IOLs wurde gleichzeitig an einer Vielzahl von Orten mit modernster Instrumentierung gemessen. Da sich auch viele LTO-Standorte innerhalb der beiden IOLs befinden, decken die resultierenden Datensätze ein breites Spektrum atmosphärischer Größen in verschiedenen vertikalen Ebenen ab. Die LTOs sollen zudem über das Projektende hinaus weiterbetrieben werden. So wurden auch die Stadtklimamessnetze der FU und TU Berlin im Rahmen des Verbundvorhabens mit zusätzlichen Messstandorten und -instrumenten ausgestattet. Für detaillierte Beschreibungen der IOPs und LTOs in Berlin siehe Scherer et al. (2019a).

In der Klimakammer des Fachgebiets Klimatologie der TU Berlin wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten Vergleichsmessungen der Lufttemperatur und der relativen Feuchte für eine Vielzahl von TPs durchgeführt, um die Vergleichbarkeit der Messungen zu gewährleisten. Als Referenzgerät diente ein Vaisala HMP 155. In der Klimakammer wurden hierbei die Lufttemperatur in sieben Stufen und die relative Feuchte in vier Stufen variiert. Neben dem Laborvergleich wurde während der IOP 4 vor dem Hauptgebäude der TU Berlin ein Feldvergleich der Sensoren verschiedener TPs durchgeführt. Darüber hinaus fanden weitere Kalibrationsmessungen, z.B. im Windkanal des TP10 in Hamburg oder die Interkalibrationen mit dem Mobilab des TP6 in Berlin und Stuttgart, statt und ergänzten die Vergleichsmessungen zur Qualitätssicherung der Beobachtungsdaten.

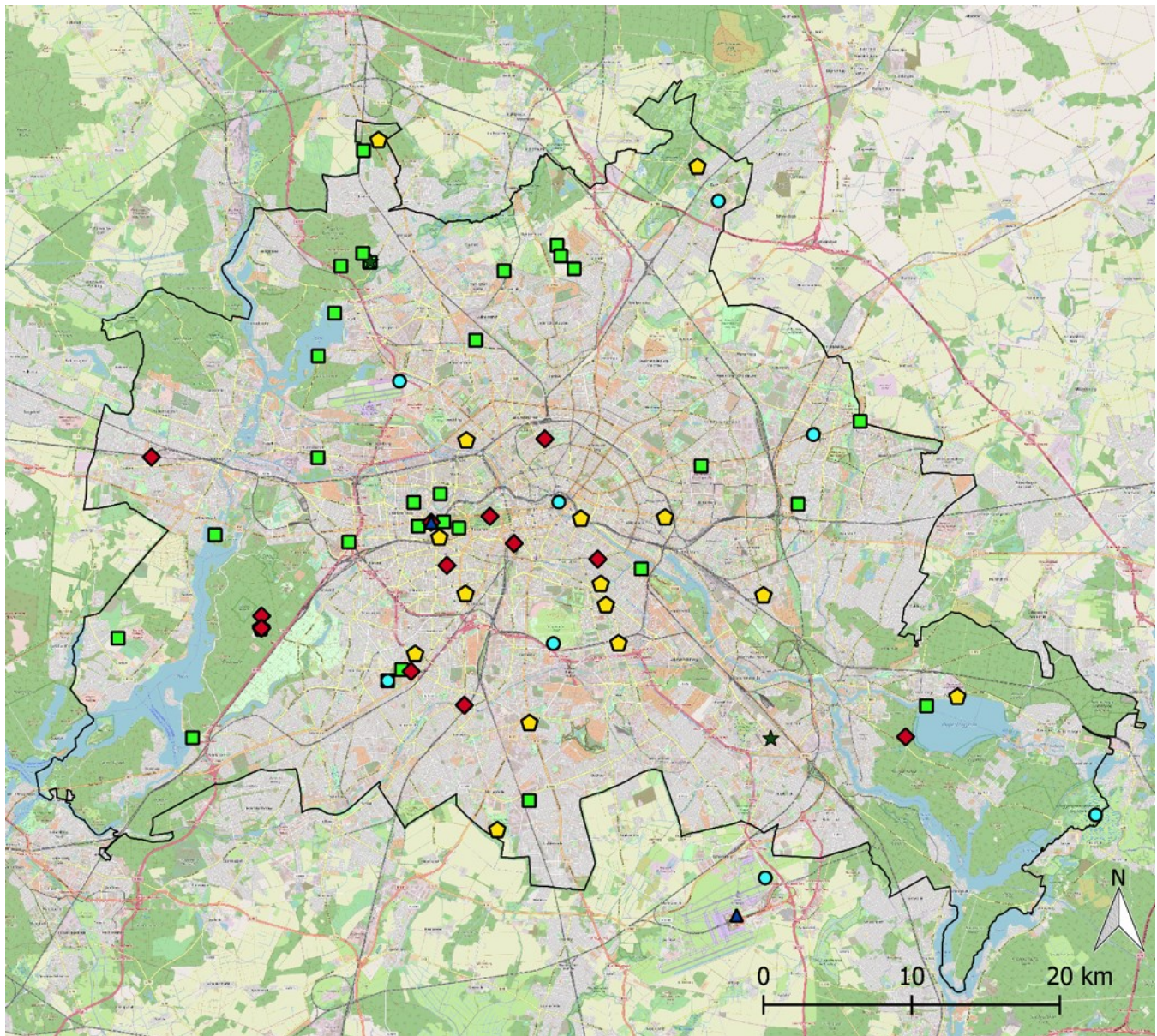


ABBILDUNG 2: LTO-Standorte in Berlin. Die LTO-Daten werden durch folgende Institutionen erhoben: Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, Berliner Luftgüte Messnetz – BLUME (gelbes Pentagon), Deutscher Wetterdienst (türkiser Kreis), Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie (hellgrünes Rechteck), Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut (Stern), Technische Universität Braunschweig, Institut für Geoökologie (dunkelblaues Dreieck), Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie, Fachgebiet Klimatologie (rote Raute). Die schwarze Linie markiert die Stadtgrenze. Kartengrundlage: Openstreetmap – veröffentlicht unter OdbI 1.0. Quelle: Scherer et al. (2019a).

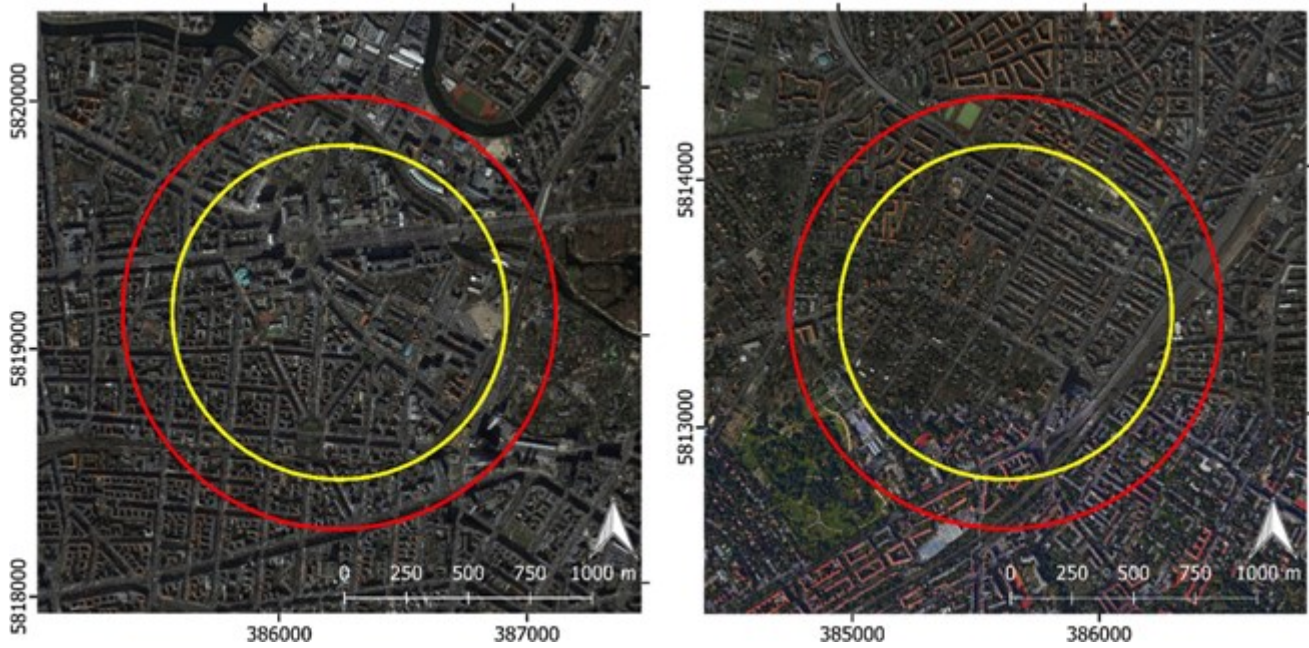


ABBILDUNG 3: IOLs in Berlin. Links: Technische Universität Berlin, Campus Charlottenburg, Rechts: Rothenburgstrasse, Steglitz. Rote Kreise: Ausschnitt für Windkanalmodell (Maßstab 1:500; Radius 875 m), Gelbe Kreise: Ausschnitt für die Analyse (Radius 675 m). Bilder in WGS84/Pseudo-Mercator Projektion. Koordinaten in UTM33. Kartengrundlage: © 2017 GeoBasis-DE/BKG (© 2009), Google. Quelle: Scherer et al. (2019a).

Die dreidimensionale Struktur der Stadtatmosphäre

Die im Rahmen von 3DO neu installierten Instrumentierungen zur Untersuchung der Stadtatmosphäre bieten einen wertvollen Einblick in deren dreidimensionale Struktur. Seit 2018 ist durch die neu beschafften Messgeräte ein vollständiges dreidimensionales Monitoring atmosphärischer Prozesse durch TP1 und weitere Verbundpartner möglich. Mit einem sogenannten Ceilometer lässt sich die Wolkenuntergrenze und die Höhenlage von Aerosolen (feste oder flüssige, in der Atmosphäre schwebende Partikel) bestimmen. Der Messbereich reicht bei modernen Geräten bis in rund 12'500 m Höhe. Abb. 4 zeigt die Ergebnisse der Ceilometermessungen für den Zeitraum 16.-18.07.2018 in Abhängigkeit von der Messhöhe.

Sowohl am 16.07.2018 als auch am 17.07.2018 ist die Ausbildung einer Mischungsschicht (gelb) in den Morgenstunden sichtbar. Diese wächst im Laufe des Tages aufgrund konvektiver Prozesse in der Atmosphäre auf bis ca. 2 km Höhe über Grund an und entwickelt sich im Laufe der Nacht zu einer Residualschicht. Am 17.07.2018 weisen starke Signale (rot) auf eine stärkere Bewölkung hin. Die Bestimmung der Wolkenbedeckung aus den Ceilometerdaten (CHM, mittlere Graphik) bestätigt den anfangs noch ungestörten Tagesgang am 16.07.2018 in Übereinstimmung mit der gemessenen Globalstrahlung (rsd; untere Graphik), bevor zunehmende Bewölkung sich auch in stark schwankenden Werten der Globalstrahlung zeigt. Am 17.07.2018 treten bei geringer Wolkenbedeckung (CHM) erneut hohe Globalstrahlungswerte auf, bevor in der zweiten Tageshälfte bis in den 18.07.2018 der Grad der Wolkenbedeckung hoch bleibt. Im Vergleich zu den Werten der Wolkenbedeckung des DWD, die auf einem anderen Verfahren basieren, werden durch das Ceilometer zusätzliche, differenziertere Aussagen zur Bewölkung und über Aerosolrückstreuung zu Grenzschichtprozessen möglich.

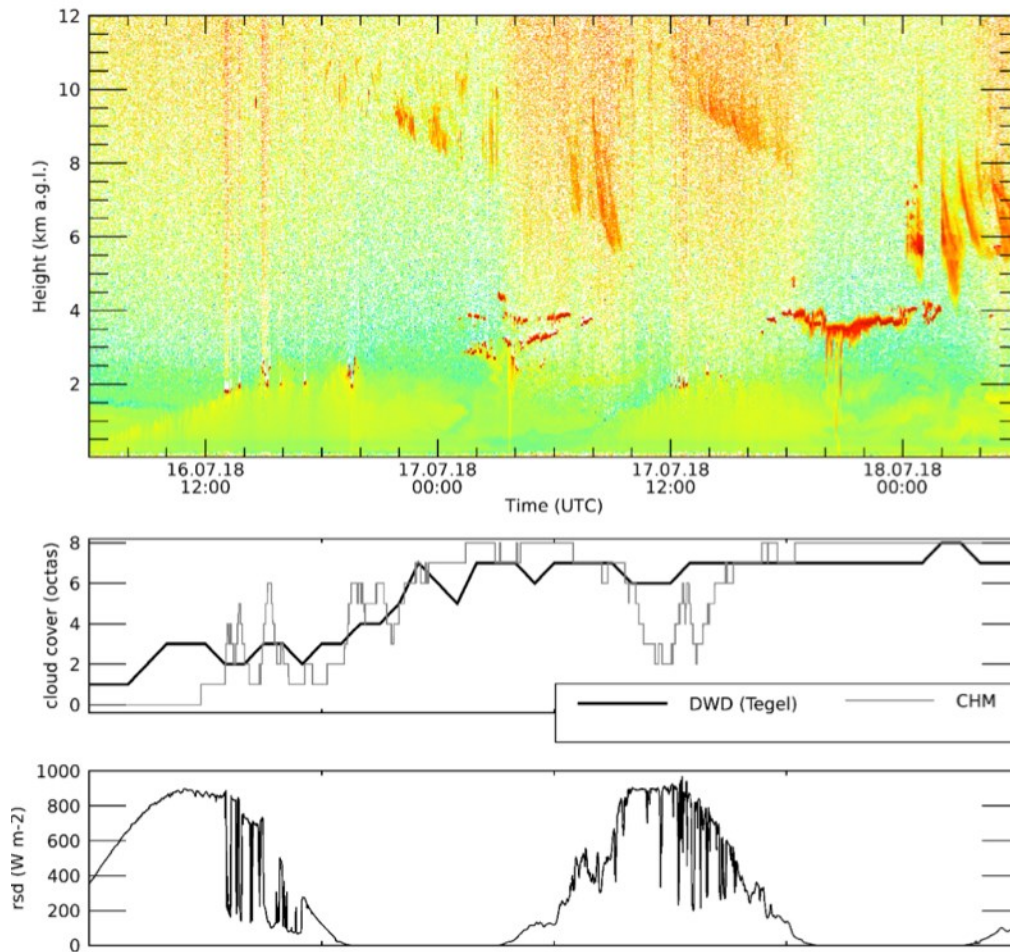


ABBILDUNG 4: Aerosolrückstreuprofile aus Ceilometermessungen am Standort TU Berlin Campus Berlin-Charlottenburg während der IOP 4 (oben), vom Ceilometer (CHM) prozessierte sowie vom DWD öffentlich verfügbare Wolkenbedeckungsgrade (Mitte) und von der TU Berlin durchgeführte Messung der Globalstrahlung (unten). Quelle: Scherer et al. (2020).

Eine weitere Möglichkeit zur dreidimensionalen Beobachtung der Stadtatmosphäre bieten Luftfahrtsysteme ohne Besatzung, ausgestattet mit entsprechender Instrumentierung. Die Partner der Universität Augsburg setzten diese für Messflüge in Berlin in allen vier IOPs ein. Gemessen wurden Lufttemperatur und -feuchte, während die Bestimmung von Windgeschwindigkeit und -richtung durch Fluggeschwindigkeitsunterschiede bei Rücken- und Gegenwind im Falle der Nurflügler bzw. Neigungswinkel und -richtung bei Einsatz der Multikopter erfolgte. Die Aufstiegshöhe betrug 250 bis 300 m über Grund. Wie in Abb. 5 dargestellt, wurden jeweils zwei Auf- und Abstiege realisiert, welche die kurzfristige zeitliche Veränderung der Schichtung bzw. die zeitliche Repräsentativität erkennen lassen. So ist z.B. die Untergrenze der Temperaturinversion am 17.07.2018 um 02:00 UTC am Standort Gutmuths bei etwas geringerer Höhe deutlich konstanter ausgeprägt als in der 900 m südöstlich gelegenen Hertzallee.

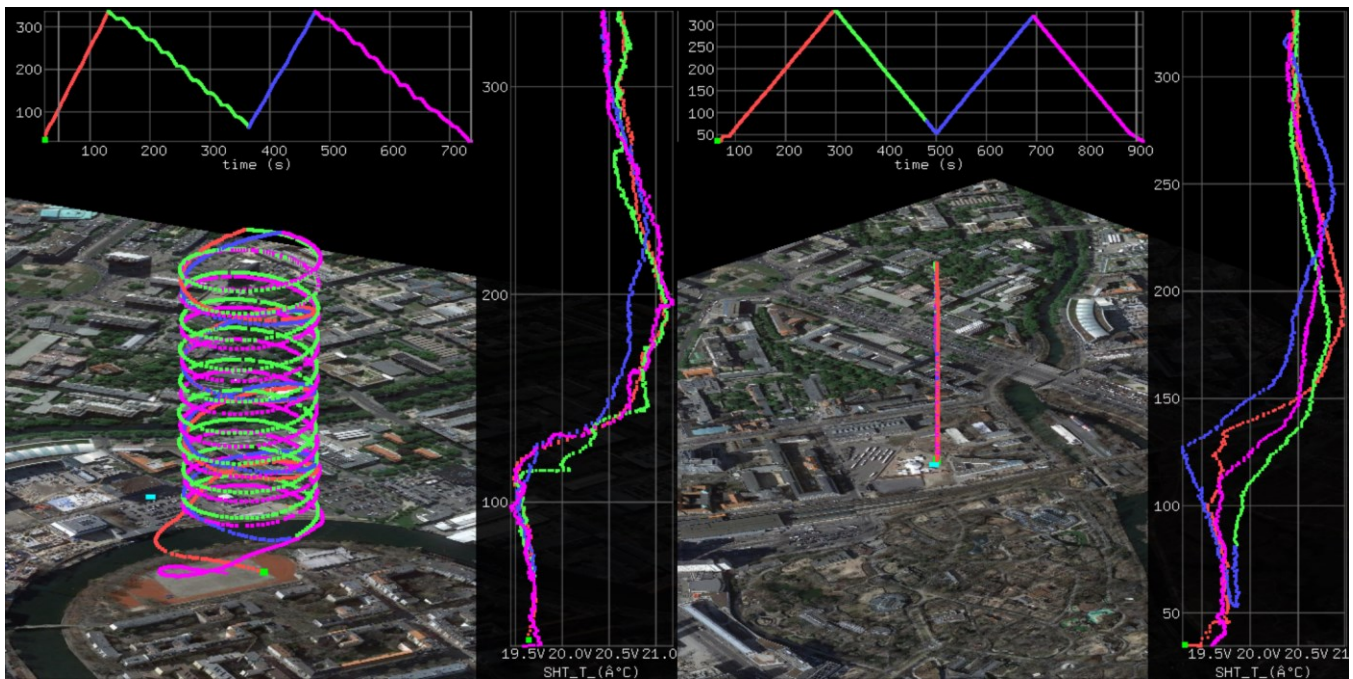


ABBILDUNG 5: Positionspunkte und Messwerte zweier zeitgleicher Befliegungen beispielhaft am 17.07.2018 um 02:00 UTC am Standort Gutsmuths (Berlin-Moabit mit Nurflügler, links) und Hertzallee (Berlin-Charlottenburg mit Multicopter, rechts). Im Zentrum ist jeweils die 3D-Ansicht des Flugpfades zu sehen und oben jeweils die Flughöhe versus Zeit; rechts jeweils die Lufttemperatur versus Höhe. Quelle: Scherer et al. (2020).

Ein weiteres Phänomen konnte am 16.07.2018 um 10:00 UTC an drei Standorten synchron beobachtet werden (Abb. 6): eine einsetzende turbulente Durchmischung der Grenzschicht bis zum Boden mit einhergehendem vertikalem Feuchtefluss. Um 14:00 und 18:00 UTC erfolgt die Durchmischung in Schüben zeitgleich an allen drei Standorten, während um 16:00 UTC nur die beiden nahe beieinander und zentral im stark bebauten Bereich gelegenen Standorte Gutsmuths und Hertzallee synchronisiert sind. In den ruhigeren Zwischenphasen um 14:00 und 17:00 UTC reichert sich Wasserdampf in Bodennähe verstärkt im Bereich der bebauten Standorte an (grüne Farben), was insbesondere für die nächtliche Stabilisierung zwischen 23:00 und 01:00 UTC gilt (gelbe Farben). Hier scheint sich die Stagnation im Canopy-Layer (Teil der Grenzschicht zwischen Boden und Gebäudehöhen), der am Tempelhofer Feld fehlt, deutlich auszuwirken. Weiterhin für die Interpretation vor dem Hintergrund der Modellvalidierung interessant sind Prozesse der Entkopplung der sogenannten Stadthindernis- und Übergangsschicht zur darüber liegenden städtischen Grenzschicht (engl. Urban Boundary Layer, UBL). Diese ist in Form der niedrigen Feuchtwerte zwischen 02:00 und 06:00 UTC am 17.07.2018 bei Ausbildung einer starken Temperaturinversion (nicht gezeigt) gegeben. Tatsächlich kann jedoch in dieser Situation der inversionsbedingte verminderte vertikale Feuchtefluss die Anomalie in der Höhe nicht allein erklären. Das relativ abrupte Einsetzen in Verbindung mit einer Windbeschleunigung und -drehung auf nördliche Richtungen (nicht gezeigt) weist hier auf das Eindringen trockener Luft, eventuell durch einen Low-Level-Jet bedingt, hin. Dies kann auch den Nord-Süd-Gradienten erklären, der auf Durchmischung entlang des ca. 6 km langen Transportweges von Gutsmuths über Hertzallee bis Tempelhof zurückgeführt werden kann. Neutrale bis gering stabile Verhältnisse in der Nacht vom 17.07.2018 auf den 18.07.2018 erlauben hingegen die Anreicherung von Wasserdampf, jedoch bei schon stärker ausgeprägtem Vertikaltransport. Dagegen führt auflebender Wind in der Nacht auf den 19.07.2018 zur vollständigen Durchmischung und homogenen Verteilung des Wasserdampfs. Derartig kontrastierende Verhältnisse sowie die zugehörigen Übergangsphasen bieten die Möglichkeit, sowohl die Ausprägung als auch den zeitlichen Verlauf in PALM-4U zu evaluieren.

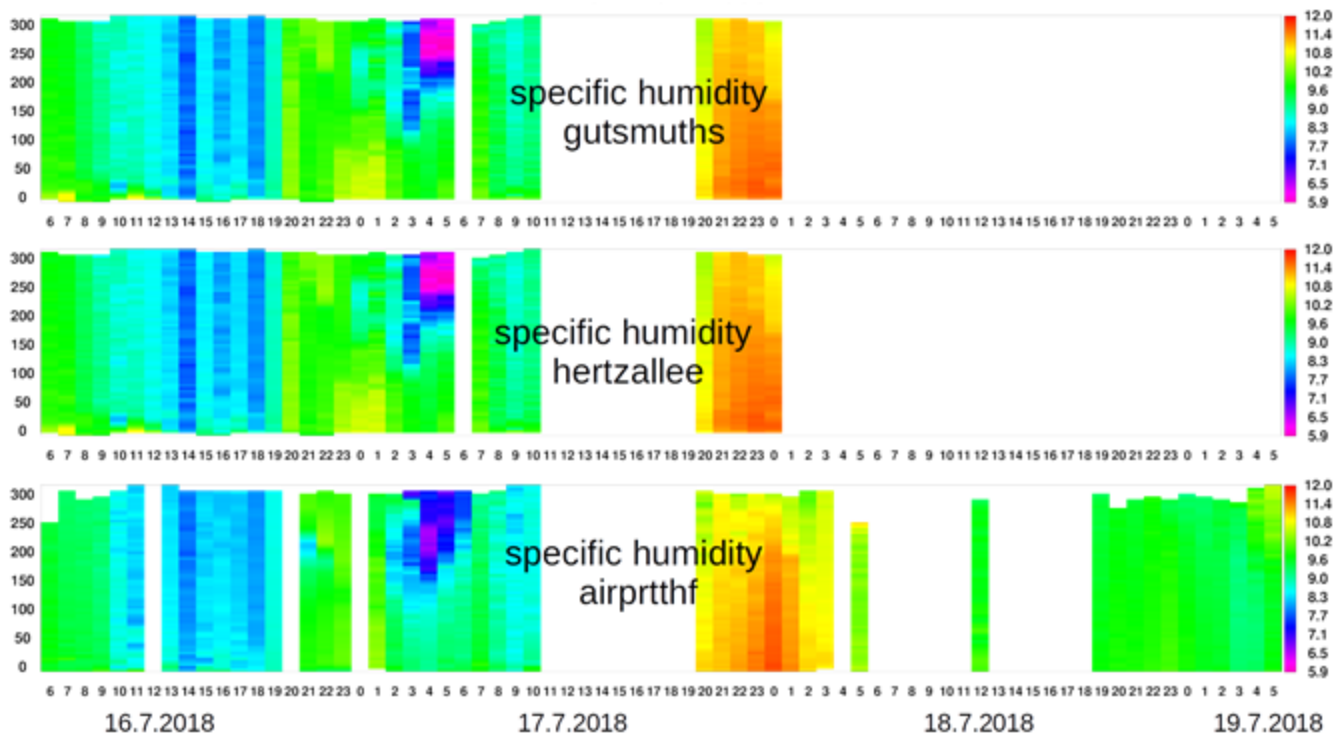


ABBILDUNG 6: Zeit-Höhen-Diagramm der Befliegungsergebnisse für die spezifische Luftfeuchte in IOP 4 vom 16.-19.07.2018 an den Berliner Standorten Gutsmuths (Moabit), Hertzallee (Charlottenburg) und Flughafen Tempelhof. Der Zeitraum zwischen Sonnenuntergang und -aufgang ist dunkel hinterlegt. Am 17. und 18.07.2018 musste der Flugbetrieb wegen stärkerer Böen unterbrochen werden. Quelle: Scherer et al. (2020).

Ein Fokus der IOP 1 im Winter 2017 lag auf den Themen Wind und Turbulenz. Dazu wurde in der IOL Ernst-Reuter-Platz ein 10 m hoher Messmast mit Ultraschallanemometern bestückt. In 4, 7 und 10 m über Grund wurden das 3D-Windfeld und die Lufttemperatur und -feuchte gemessen. Die Verteilungen der Windgeschwindigkeit und der Varianz der w-Komponente des Windes (Vertikalkomponente) weisen eine Höhenabhängigkeit auf (nicht gezeigt), die sich in der Validierung mit Ergebnissen von PALM-4U vergleichen lässt. Abb. 7 zeigt Ergebnisse von Wind- und Turbulenzmessungen während der IOP 2 am Standort TU Berlin Campus Charlottenburg. In der Straße des 17. Juni zeigt sich eine deutliche Kanalisierung des Windes (häufige Windrichtung aus West) sowie deutlich höhere Windgeschwindigkeiten als im Gebäude- und Vegetationsbestand. Diese Modifikationen der Strömung gehören zu den Eigenschaften des Stadtklimas, die PALM-4U reproduzieren soll.



ABBILDUNG 7: Messstandorte und aus hochfrequenten Messungen abgeleitete Windrosen am TU Berlin Campus Charlottenburg während der IOP 2. Quelle: Scherer et al. (2020).

Die atmosphärische Grenzschicht in Berlin und im Umland

Wie bereits in Teil I beschrieben, ist die atmosphärische Grenzschicht (PBL) für die Luftqualität in der Stadt und das Stadtklima entscheidend. Um den Einfluss einer Stadt auf die Ausbildung von Wärmeinseln und die Ausbreitung von Luftverunreinigungen zu bestimmen, ist es erforderlich die Vertikalstruktur der PBL in der Stadt und ihrem Umland zu untersuchen (Christen, 2019). Während der IOP 4 in Berlin wurden am 16.07.2018 an der DWD Klimastation auf dem Tempelhofer Feld (57 m ü. NN) Radiosondenaufstiege durchgeführt, die in sechsständigem Abstand quasi zeitgleich zu den operationellen Radionsondenaufstiegen am Meteorologischen Observatorium des DWD in Lindenberg (112 m ü. NN, ca. 60 km südwestlich des Tempelhofer Feldes) erfolgten. Die Vertikalprofile der potenziellen Temperatur und der spezifischen Feuchte sind für beide Standorte in Abb. 8 dargestellt.

Um ca. 05:00 UTC wurde an beiden Standorten eine bodengebundene Temperaturinversion von ca. 500 m Dicke und oberhalb 1500 m über Grund eine abgehobene Temperaturinversion erfasst. Bis ca. 11:00 UTC hat sich jeweils eine sogenannte konvektive PBL entwickelt, die bis ca. 1500 m über Grund reicht, d.h. bis zur Basis der abgehobenen Inversion. Bis um ca. 17:00 UTC wuchs die konvektive PBL jeweils bis ca. 2000 m Dicke an. Charakteristisch für die sich tagsüber ausbildende konvektive PBL ist das Aufsteigen von bodennah durch Sonneneinstrahlung erwärmter Luft (Konvektion/Thermik) und der damit verbunden starken vertikalen Durchmischung von Luftverunreinigungen. Da der dicht besiedelte Bereich von Berlin etwa eine Ausdehnung von ca. 15 km aufweist, bestätigen die geringen räumlichen Unterschiede der konvektiven PBL Höhen die Skalenüberlegungen von Shuttleworth (1988). Diese lassen räumliche Unterschiede der konvektiven PBL Höhe nur erwarten, wenn das Verhältnis von PBL Höhe zur Längenskala der Landnutzungsflächen $\leq 0,1$ ist, d.h. für Berlin für PBL Höhen bis maximal 1500 m (Abb. 9). Bei hochreichender konvektiver PBL ergibt sich somit in Berlin trotz stärkerer Oberflächenrauigkeit und Versiegelung keine höhere Mischungsschicht für emittierte Luftverunreinigungen als im Umland. Für die Fälle kann daher in guter Näherung die operationell aus Vertikalsondierungen in Lindenberg vorliegende PBL Höhe als Maß für die nachmittägliche Mischungsschichthöhe in Berlin verwendet werden.

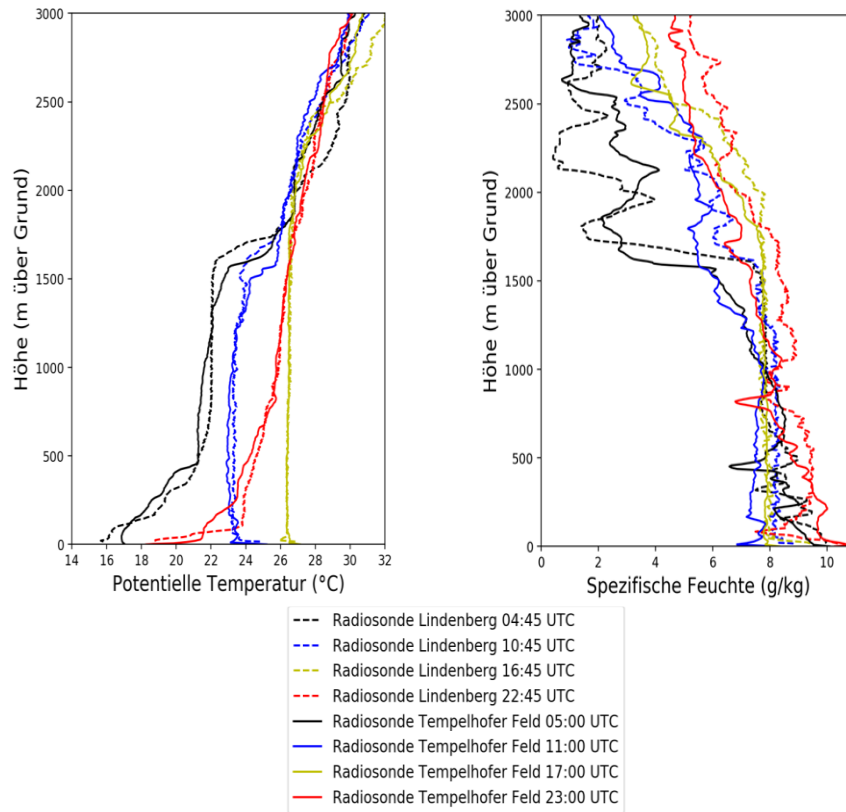


ABBILDUNG 8: Vertikalprofile der potenziellen Temperatur (links) und der spezifischen Feuchte (rechts) vom 16.07.2018 in Lindenberg und auf dem Tempelhofer Feld. Quelle: Hodan et al. (2020).

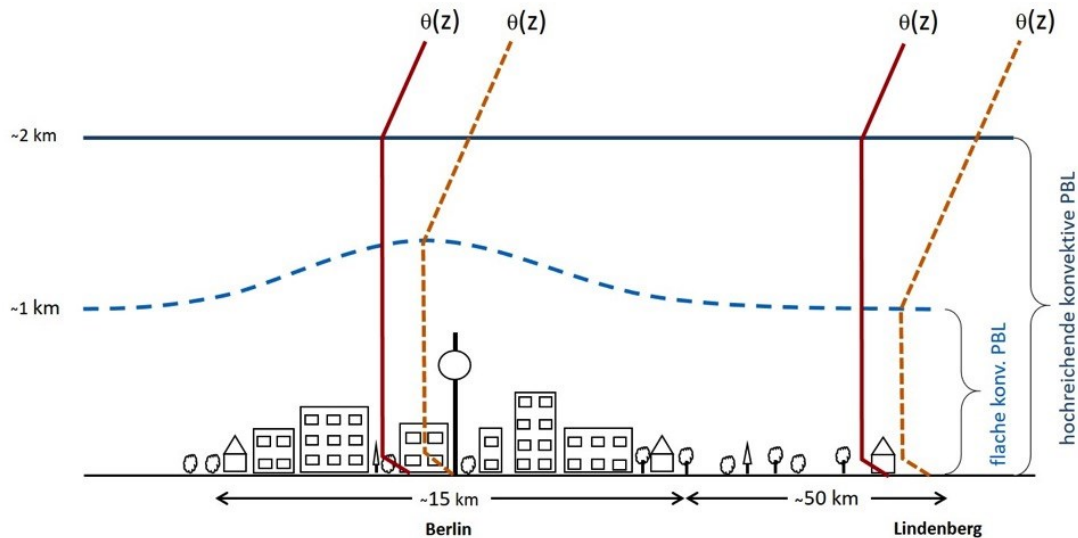


ABBILDUNG 9: Schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung der nachmittäglichen konvektiven PBL in Berlin und Umland (blaue Linien) und Vertikalprofile der potenziellen Temperatur $\theta(z)$ für den Fall der hochreichenden PBL am 16.07.2018 mit horizontalem Verlauf der Grenzschichtobergrenze (durchgezogene Linien) und für einen hypothetischen Fall mit insgesamt flacher, aber im Stadtgebiet mächtigerer PBL (gestrichelte Linien), nach Shuttleworth 1988, adaptiert für die städtische Grenzschicht. Quelle: Hodan et al. (2020).

Der auf Radiosondierungen basierende Tagesgang der konvektiven PBL lässt sich auch durch operationelle Auswertungen der Grenzschichthöhe aus Ceilometerdaten im Stadtgebiet und im Umland belegen (Abb. 10). Tagsüber sind die räumlichen Unterschiede der Grenzschichthöhe nicht größer als die zeitlichen Fluktuationen, die an den jeweiligen Standorten durch Entrainmentprozesse (Zumischung von Umgebungsluft) auftreten. Beim abendlichen Übergang von labiler zu stabiler Grenzschicht und teilweise auch nachts weisen die Grenzschichthöhen aus den Ceilometerdaten extreme Fluktuationen auf. Dies ist dadurch bedingt, dass die nächtliche Grenzschichthöhe unterhalb des niedrigsten Messniveaus liegt. Dies weist aber auch auf den Bedarf weiterer Verbesserung der operationellen Algorithmen zur Grenzschichthöhenbestimmung aus Ceilometerdaten hin.

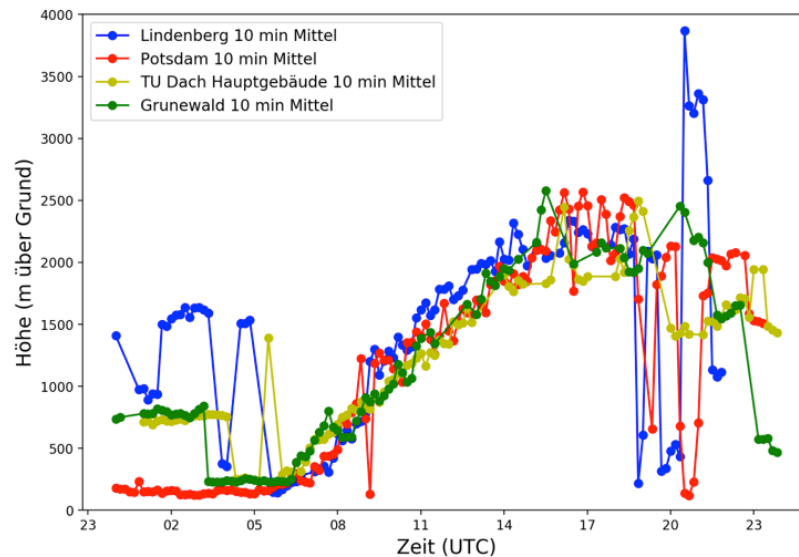


ABBILDUNG 10: Tagesgang der Grenzschichthöhe aus Ceilometerdaten vom 16.07.2018. Die Ceilometermessungen in Lindenberg und in Potsdam wurden vom DWD, die Ceilometermessungen im Grunewald und am TU Hauptgebäude wurden von der TU Berlin durchgeführt. Quelle: Hodan et al. (2020).

Die atmosphärische Grenzschicht an einem heißen Tag

Die Verbundpartner der Leibniz Universität Hannover (TP12) unternahmen während der Sommer IOP 4 Vertikalsondierungen mit einem Hexakopter-Radiosonden-Messsystem auf dem Ernst-Reuter-Platz in Berlin-Charlottenburg. Die Messungen fanden unter autochthonen Bedingungen statt, bei einem tagsüber geringen Bedeckungsgrad von 2/8 bis 3/8 Gesamtbedeckung, vornehmlich aus Cumulus, und einer nahezu ungehinderten solaren Einstrahlung auf die Stadtoberflächen. Dies führte dazu, dass das gemessene bodennahe Tagesmaximum um 16:00 UTC bei knapp über 30 °C lag, was einem „Heißen Tag“ entspricht (Abb. 11). Mit Minima knapp über 19 °C wird in der Nacht beinahe eine Tropennacht erreicht. Anders als es an einem ländlichen Standort der Fall gewesen wäre, bildet sich über dem stark versiegelten Ernst-Reuter-Platz keine Bodeninversionsschicht aus. Die hohe Wärmekapazität der städtischen Materialien führt dazu, dass tagsüber viel solare Einstrahlung aufgenommen, in Wärme umgewandelt und nachts nur allmählich an die Atmosphäre zurückgegeben wird. Eine nächtliche Höheninversion ab ca. 100 m Höhe ist allerdings erkennbar, die restlichen Tagesstunden herrscht eher eine gute Durchmischung, inklusive neutraler Schichtung vor, was aus der potenziellen Temperatur zu schlussfolgern ist (Abb. 12). Die den Messtag prägende gute Durchmischung geht auch mit den überwiegend mäßigen Windgeschwindigkeiten einher (Abb. 13). Die bodennah im Mittel 1 m/s erreichende Windgeschwindigkeit unterstreicht allerdings nochmals den autochthonen Charakter der Wetterlage während der Messperiode.

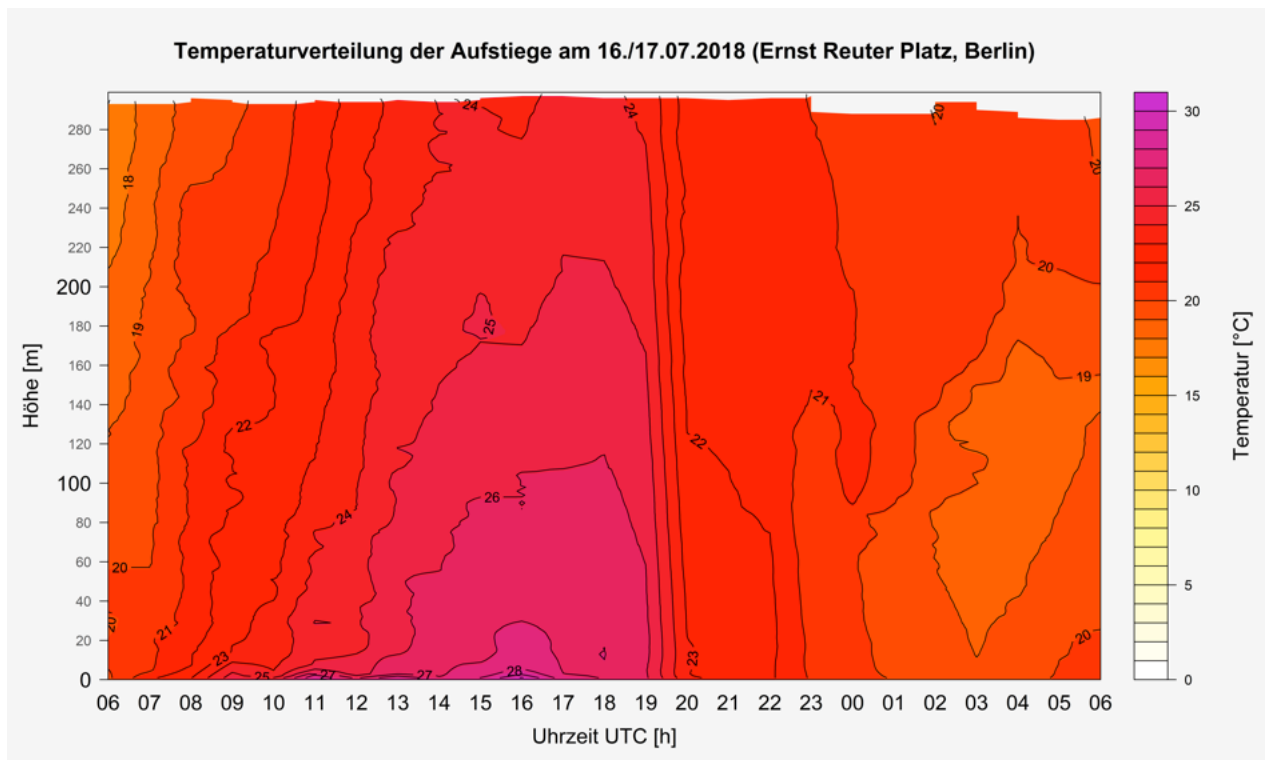


ABBILDUNG 11: Stündliche Lufttemperatur, gemessen vom Hexakopter-Radiosonden-Messsystem vom 16.-17.07.2018 (IOP 4) auf dem Ernst-Reuter-Platz in Berlin-Charlottenburg. Quelle: Meusel (2020).

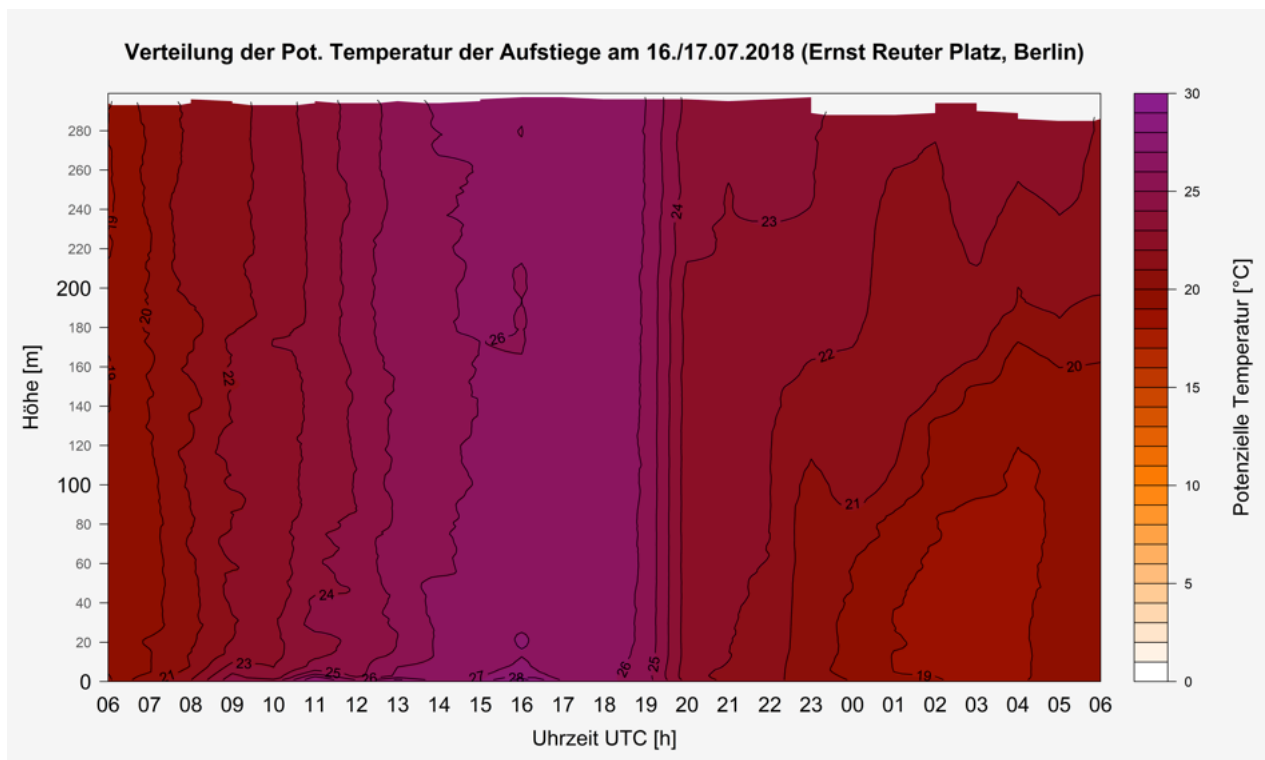


ABBILDUNG 12: Stündliche potenzielle Temperatur, gemessen vom Hexakopter-Radiosonden-Messsystem vom 16.-17.07.2018 (IOP 4) auf dem Ernst-Reuter-Platz in Berlin-Charlottenburg. Quelle: Meusel (2020).

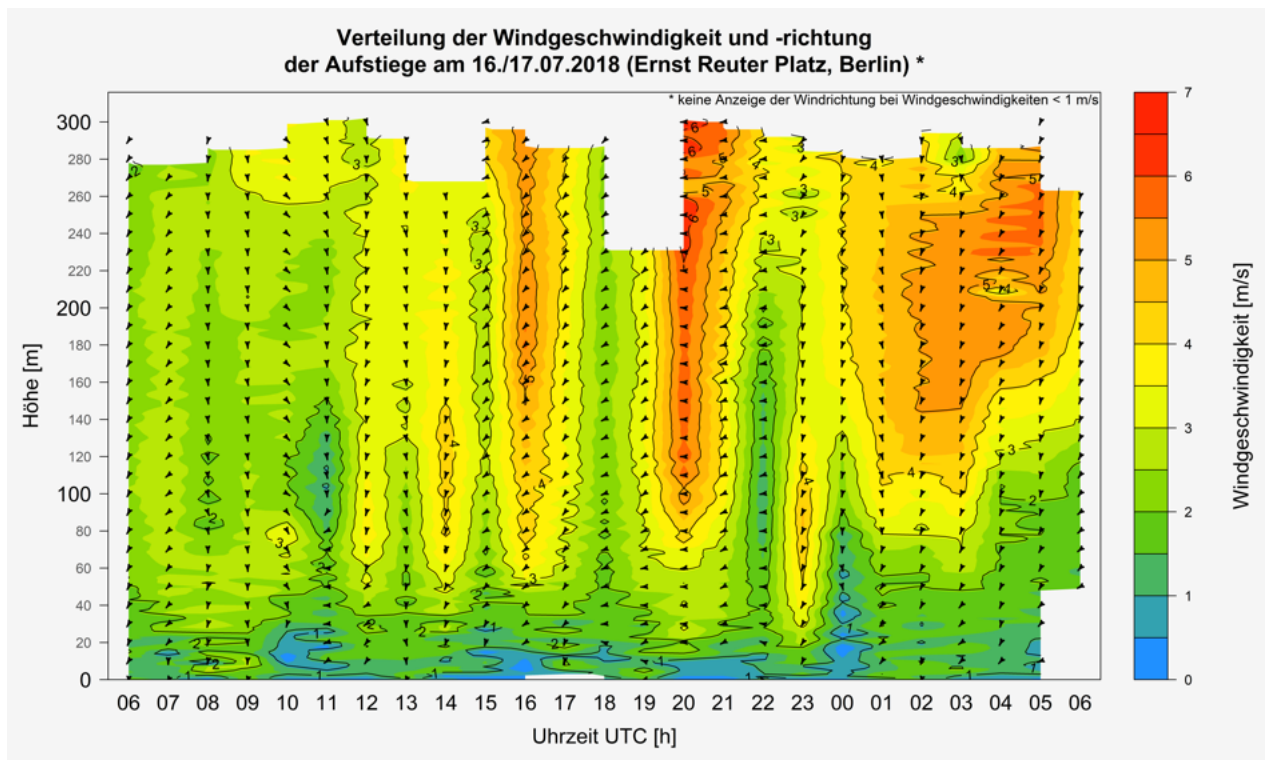


ABBILDUNG 13: Stündliche Horizontalwinde, gemessen vom Hexakopter-Radiosonden-Messsystem vom 16.-17.07.2018 (IOP 4) auf dem Ernst-Reuter-Platz in Berlin-Charlottenburg. Quelle: Meusel (2020).

Die aus Luftdruck, Lufttemperatur und relativer Feuchte berechnete spezifische Feuchte zeigt einen typischen Tagesgang mit hohen Werten von jeweils ca. 9 g/kg am Morgen und am Abend und einem bodennahen Minimum von ca. 6 g/kg am Tage (Abb. 14). Erstaunlich ist jedoch, dass das Maximum der Messreihe zwischen 23 UTC und 2 UTC mit einem Wert von über 10 g/kg eintritt und der Wassergehalt dieser Menge bis in eine Höhe von knapp 120 m getragen wird. Diese Beobachtung hat mit der auf dem Ernst-Reuter-Platz installierten Brunnenanlage zu tun, die von ca. 07:00 UTC morgens bis etwa 02:00 UTC nachts mit einer 15 m hohen Fontäne betrieben wird. Am betrachteten heißen Tag im Sommer wird das in die Luft gewirbelte Wasser tagsüber noch gut verdunstet, nach Sonnenuntergang scheiden diese Prozesse jedoch aus, wodurch die spezifische Feuchte schnell auf ein Niveau von 9 g/kg und höher ansteigt. Nach Abschaltung der Fontäne ist ein geringer Abfall der spezifischen Feuchte zu beobachten.

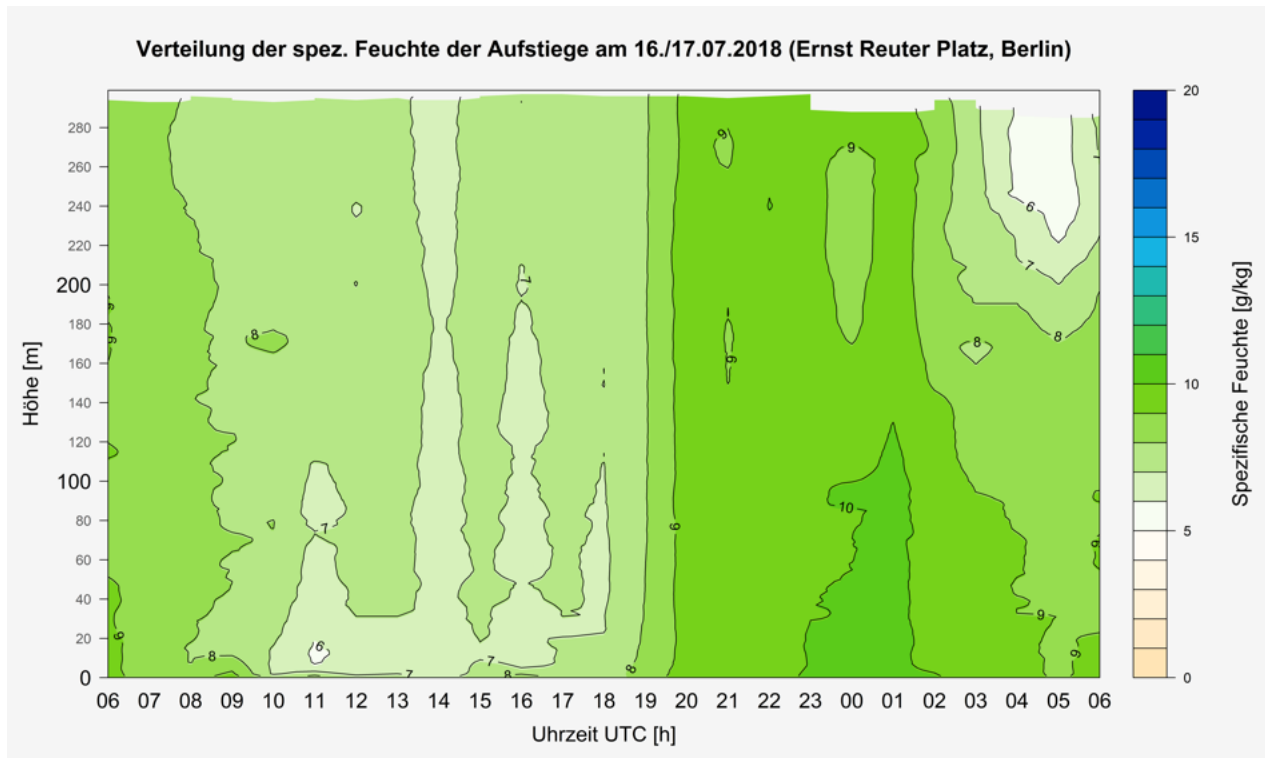


ABBILDUNG 14: Stündliche spezifische Feuchte, berechnet aus Messungen des Luftdrucks, der Lufttemperatur und der relative Feuchte mit dem Hexakopter-Radiosonden-Messsystem vom 16.-17.07.2018 (IOP 4) auf dem Ernst-Reuter-Platz in Berlin-Charlottenburg. Quelle: Meusel (2020).

Spurenstoffverteilung innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht

Im Rahmen der IOP 4 führte das DLR (TP14) eine Flugzeugmesskampagne mit der DLR Cessna in Berlin durch. Das Ziel bestand in der Massenbilanzierung von Spurenstoffen. Hierzu wurden im Luv und im Lee der Stadt Berlin Messungen in verschiedenen Höhen senkrecht zur vorherrschenden Windrichtung durchgeführt. Somit kann die Spurenstoffverteilung innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht bestimmt und daraus die Emissionsstärke der Stadt abgeleitet werden (siehe auch Klausner et al., 2020).

Für jeden wissenschaftlichen Messflug wurde in enger Abstimmung mit den TP1 (UAV) und TP11 (Radiosonden- und Fesselondensysteme) mindestens ein Vertikalprofil am Tempelhofer Feld in Höhen von ~ 300 m bis ~ 3 km durchgeführt. Die hochaufgelösten (1 Hz) und präzisen meteorologischen Messungen an Bord der DLR Cessna können ideal mit den bodengebundenen Messungen zu einem lückenlosen Vertikalprofil der gesamten unteren Troposphäre kombiniert werden (Abb. 15). Diese Messdaten liefern einen wertvollen Beitrag zur Evaluation der horizontalen und vertikalen Variabilität in PALM-4U Referenzsimulationen.

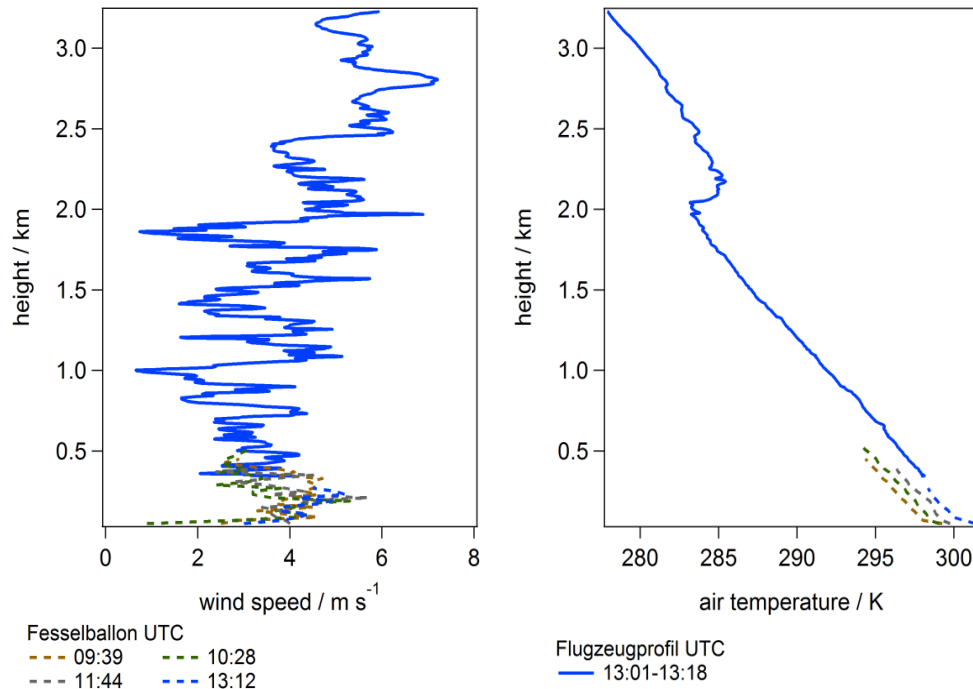
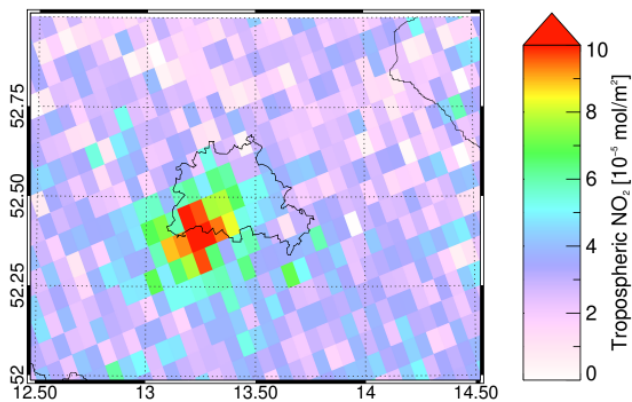


ABBILDUNG 15: Vertikalprofil von Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur der DLR Cessna am 24.07.2018 über dem Tempelhofer Feld (durchgezogene Linie), sowie von Messungen aus TP11 (gestrichelte Linien). Quelle: Ebertseder et al. (2020).

Flugzeug- und satellitengestützte Daten stimmen beim Nachweis und der Charakterisierung der gesamtstädtischen Abgasfahne von Berlin gut überein und erlauben eine dreidimensionale Erfassung der städtischen Ablufffahne. Am 24.07.2018 bestätigen die Stickstoffdioxid-Beobachtungen des Satelliten Sentinel-5P/TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) die erhöhten Stickstoffdioxid-Mischungsverhältnisse, welche an Bord der Cessna im Lee der Stadt gemessen wurden (Abb. 16; Pühl, 2019). Durch die synoptischen Messungen per Satellit und Flugzeug konnte auch die vertikale Sensitivität von TROPOMI für die städtische Grenzschicht nachgewiesen werden. Ebenfalls erlauben koordinierte Messungen mit TP6 (MOBILAB) sowie ein Prüfungsvergleich, die Verteilung von Spurenstoffen am Boden und in der Luft zu untersuchen.

Sentinel-5P NO₂, Berlin, 20180724T103602



DLR_Cessna_CAPS NO₂, Berlin, 20180724

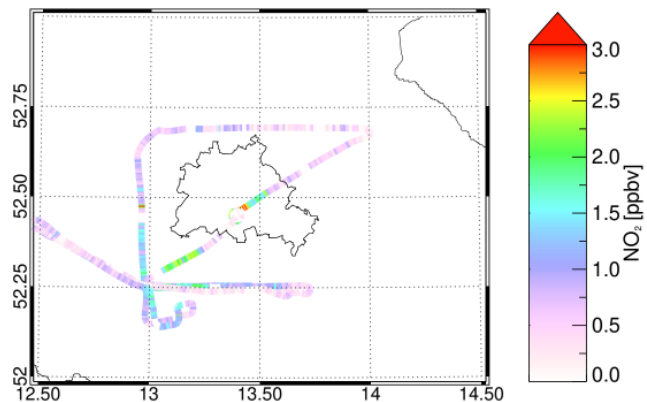


ABBILDUNG 16: Stickstoffdioxid (NO₂) Verteilung über Berlin am 24.07.2018, beobachtet von Sentinel-5P/TROPOMI (links) und in-situ gemessene Stickstoffdioxid-Mischungsverhältnisse an Bord der DLR Cessna (rechts). Deutlich ist die städtische Abgasfahne im Lee der Stadt zu erkennen. Quelle: Pühl (2019).

Räumliche Unterschiede von Partikelanzahlkonzentrationen

Während aller IOPs wurden von der TU Braunschweig (TP4) zwei Mal täglich (09:30 und 13:30 MEZ) Messfahrten entlang einer ca. 22 km langen Messroute durchgeführt. Ziel der mobilen Messungen war es, die zeitliche und räumliche Variation von Partikelanzahlkonzentrationen in Berlin zu erfassen, um diese unter anderem mit den Messergebnissen der Partikelflussmessung in Beziehung setzen und einen geeigneten Datensatz für die Modellvalidierung von PALM-4U zur Verfügung stellen zu können. Als Messgeräteträger kam ein Fahrrad zum Einsatz. Gemessen wurde in einer Höhe von 1.30 m über Grund mit einem Kondensationspartikelzähler und einem Infrarot-Gasanalysator, welche auf dem Gepäckträger des Messfahrrades befestigt waren. In Summe wurden 29 Messfahrten an 17 Messtagen durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen starke räumliche Unterschiede in der Partikelkonzentration, welche sich je nach Tageszeit unterschiedlich abbilden. Generell zeigen sich in den Einflussbereichen von Grün- und Wasserflächen geringere Konzentrationen als in engen, stark befahrenen Straßenschluchten. Die räumlichen Muster können somit plausibel abgebildet werden. Neben den sekundlich aufgelösten Messpunkten wurden Mittelwerte für 50 m x 50 m Rasterzellen im Projektgebiet berechnet (Abb. 17), welche ebenso für Analysen und zur Modellvalidierung von PALM-4U zur Verfügung stehen.

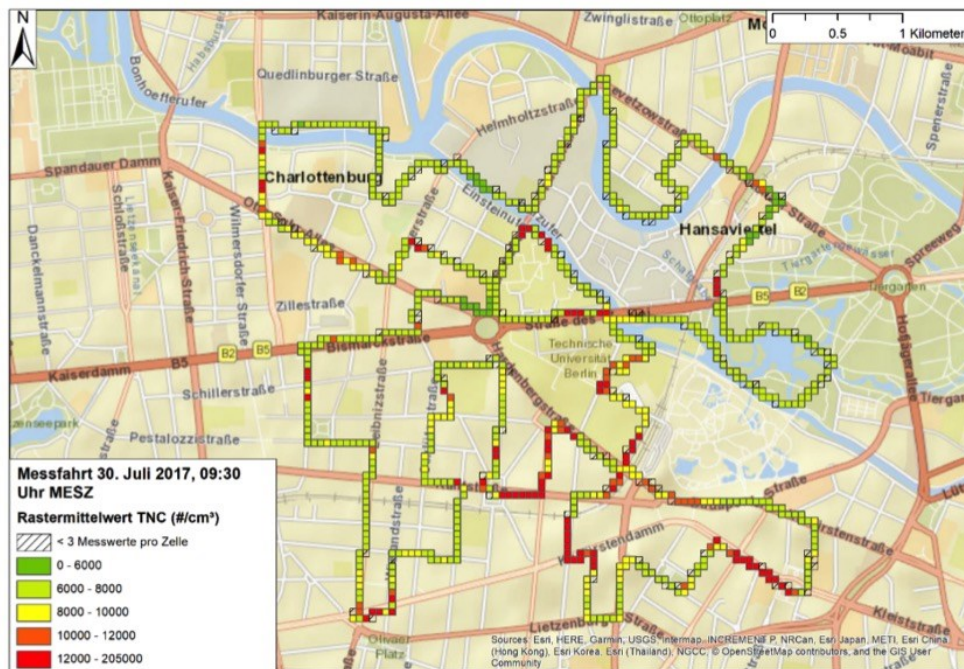


ABBILDUNG 17: Gemessene Partikelanzahlkonzentrationen entlang der Messroute am 30.07.2017, gemittelt für ein 50 m x 50 m Raster in der IOL Ernst-Reuter-Platz. Gemessen wurde in der Zeit von 09:30 bis ca. 11:30 MESZ. Quelle: Weber et al. (2020).

Im Rahmen der IOPs wurden ebenso mobile Messungen entlang von Transekten (Linien von Messpunkten) nahe des Ernst-Reuter-Platzes in Berlin-Charlottenburg durchgeführt, um die räumliche Veränderung von Partikelimmissionen (Einwirken von Partikeln) von Hauptstraßen in den städtischen Hintergrund zu überprüfen. Entlang der Transekte wurde im Mittel eine leichte Verringerung der Partikelanzahlkonzentration und der Konzentration an schwarzen Kohlenstoff mit Abstand zu Hauptstraßen gemessen. Dieser Trend ist jedoch stark abhängig von meteorologischen Gegebenheiten. Unter stark turbulenten atmosphärischen Bedingungen traten insgesamt niedrigere Partikelkonzentrationen auf und die Verringerung der Konzentration entlang der Transekte war insgesamt geringer. Unter Bedingungen mit schwachem Austausch hingegen wurden insgesamt

hohe Partikelkonzentrationen und stärkere räumliche Unterschiede beobachtet. Auch dieser Datensatz, welcher aus 39 Messungen an 15 Messtagen besteht, kann zur Validierung von PALM-4U herangezogen werden.

Die Partner der HU Berlin (TP2) befassten sich mit der Entwicklung einer mobilen Messplattform „Urbane Mobile Messsysteme“ – URBMOBI 3.0, die zu langfristigen Messungen in urbanen Gebieten eingesetzt werden soll. Daten dieses und anderer mobiler Messkonzepte sollen zur Entwicklung von Methoden zur räumlichen Modellierung von Feinstaub eingesetzt werden. Die räumliche Modellierung soll mittels auf der Landnutzung basierender Regressionsmodelle und Neuronaler Netzwerke erfolgen. Diese geostatistischen Modellierungen bieten eine Vergleichsmöglichkeit mit den Ergebnissen der physikalisch-numerischen Modellierung mit PALM-4U.

Während der IOPs 3 und 4 wurden Messfahrten mit einer auf dem Fahrrad montierten URBMOBI Sensorbox, einem Kondensationspartikelzähler und weiterer Sensorik zur Bestimmung von Feinstaub- und Partikelanzahlkonzentration im Umfeld der LTO Berlin-Adlershof durchgeführt, um die dortigen Quellen zu charakterisieren sowie die räumliche und zeitliche Variabilität besser voneinander abgrenzen zu können. Die mobilen Messungen fanden auf einer 27 km langen Fahrradstrecke entlang verschiedener Straßentypen und Landnutzungsklassen statt. Messzeiträume waren für IOP 3 im Winter der 16.01.-17.04.2018 und für die IOP 4 im Sommer der 07.06.-01.08.2018. Die Messungen wurden meist außerhalb der Stoßverkehrszeiten während unterschiedlicher niederschlagsfreier Wetterbedingungen und Tageszeiten durchgeführt. Insgesamt fanden im Winter 16 und im Sommer 27 Messfahrten statt.

Sowohl die stationären als auch die mobilen Messungen zeigen, dass die Variabilität der Partikelanzahlkonzentration aufgrund von Schwankungen der Partikelquellen – sowohl während des Tages als auch während der Woche – und wechselnden Hintergrundkonzentrationen weitgehend vom Faktor Zeit abhängt. Der Vergleich der Partikelanzahlkonzentration am LTO-Standort Adlershof zeigt dies besonders deutlich im Vergleich der Winter- und Sommer-Messkampagnen (Abb. 18). Die Winterdaten weisen deutliche Spitzen während der für Berlin typischen Stoßverkehrszeiten auf. Im Sommer sind diese deutlich weniger stark ausgeprägt, was möglicherweise auf eine veränderte atmosphärische Mischungsschichthöhe zurückzuführen ist.

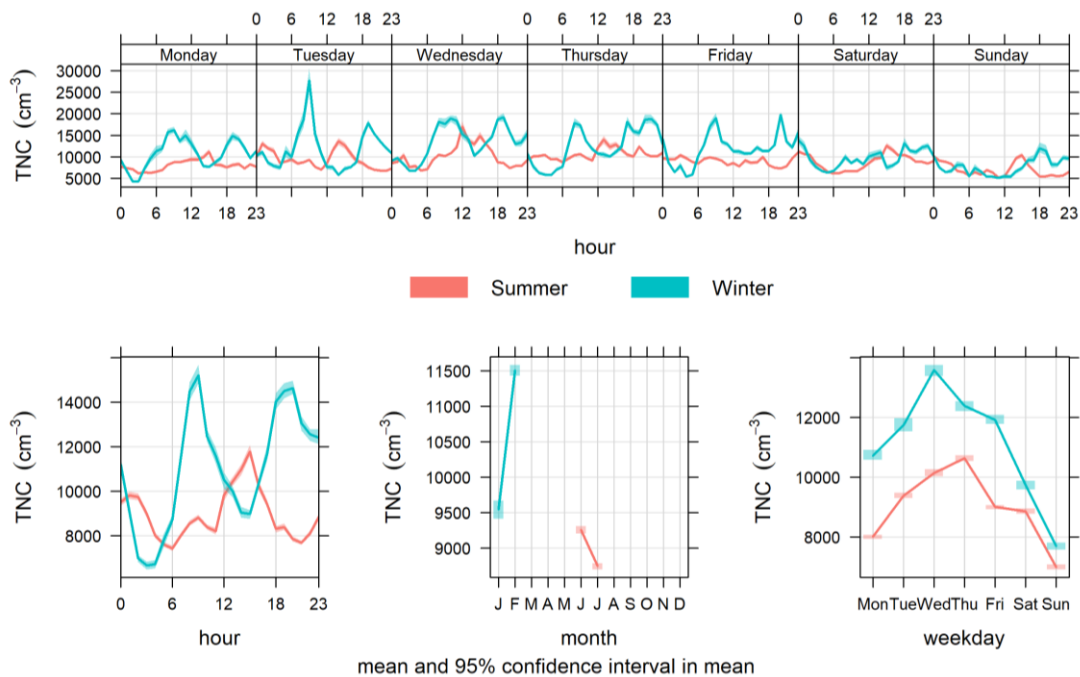


ABBILDUNG 18: Zeitliche Variabilität (Lokalzeit) der Partikelanzahlkonzentration (in Totalpartikelanzahlkonzentration – TNC) an der LTO-Messstation Berlin-Adlershof während der IOPs 3 und 4 (Winter und Sommer) in den Zeiträumen 16.01.-17.04.2018 und 07.06.-01.08.2018. Quelle: Schneider et al. (in Vorb.).

Räumliche Muster im Umfeld der Messstation werden erst dann klar erkennbar, wenn nicht absolute, sondern lokale Partikelanzahlkonzentrationen dargestellt werden, um die Variabilität zwischen den Messgängen und Messrunden zu korrigieren (hier nicht gezeigt, siehe dazu Schneider et al., *in Vorb.*). Räumliche Muster können nur analysiert und erklärt werden, wenn der Einfluss der zeitlichen Variabilität (Hintergrundkonzentration) abgezogen wird oder die Messwerte relativ berechnet werden. Für die Modellierung von räumlichen Mustern muss entsprechend entweder die gegebene Hintergrundkonzentration einbezogen oder es sollte nur die lokale Zusatzbelastung berücksichtigt werden. Die LTO Station Berlin-Adlershof stellt damit eine wichtige Datenbasis dar, um für Modellierungen der Partikelanzahlkonzentration in Berlin Daten für Hintergrundwerte und zeitliche Verläufe zu liefern. Durch die Mittelung aller Punkte pro Kampagne kann der Fokus mehr auf das räumliche Muster gerückt werden (Abb. 19). Dies gibt einen ersten Hinweis auf Parameter, zur Erklärung von Konzentrationsunterschieden im räumlichen Kontext. So liegen viele der höheren Konzentrationen in Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen. Niedrigere Konzentrationen treten in Gebieten mit einem größeren Anteil an grüner Infrastruktur auf. Dies ist sowohl in IOP 3 (Winter) als auch IOP 4 (Sommer) zu erkennen.

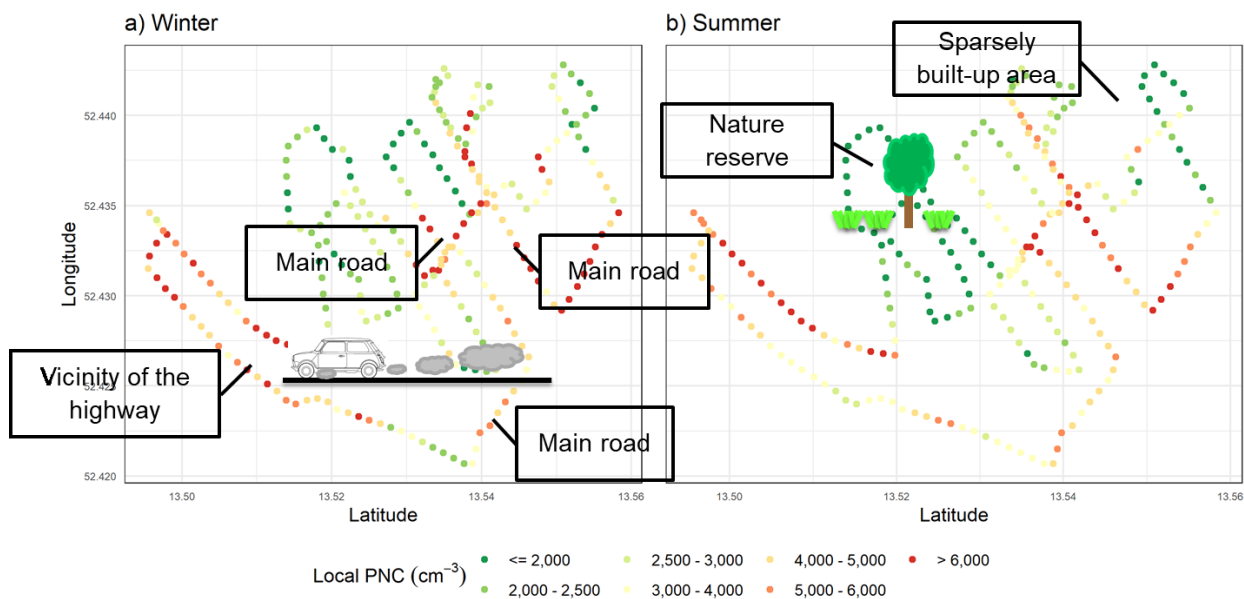


ABBILDUNG 19: Median der lokalen Partikelanzahlkonzentration (PNC) aller Messfahrten gemittelt pro 100 m und IOP. Die lokale PNC wurde pro Messfahrt als Differenz der Gesamtpartikelanzahl am Messpunkt und der minimalen PNC pro Messfahrt (Hintergrundkonzentration) berechnet. Quelle: Schneider et al. (*in Vorb.*).

Die TP2-Partner der HU Berlin unternahmen zudem mobile Ultrafeinstaubmessungen (Partikeldurchmesser 10 nm - 1 µm), welche einen Schwerpunkt der Messungen am TU Berlin Campus in Berlin-Charlottenburg bildeten, eng abgestimmt mit den Transekt-Messungen der TU Braunschweig. Während der IOP 2 wurden mobile Messungen entlang eines Fußwegs orthogonal zur Hauptstraße „Straße des 17. Juni“ durchgeführt, um das kleinräumige Muster der Partikelanzahlkonzentration mit zunehmendem Abstand zur Straße im urbanen Umfeld zu charakterisieren. Der Vergleich der IOP- und LTO-Messstationen zeigt, dass die Partikelanzahlkonzentrationen am TU Berlin Campus erwartungsgemäß generell höher lagen als am LTO-Standort Berlin-Adlershof. Dennoch sind die zeitlichen Muster im Stadtzentrum und in Stadtrandlage durchaus vergleichbar. Bezüglich der mobilen IOP-Messungen wurde beobachtet, dass Partikelanzahlkonzentration und Streuung der Partikelanzahlkonzentration entlang des Fußwegs bis zu einer Entfernung von 100 m von der Straße des 17. Juni exponentiell abnehmen. Dies ist ein klarer Hinweis auf die Auswirkungen der Straße als Hauptquelle der Partikel.

Im Gegensatz zur Untersuchung von Zhu et al. (2009) ist sowohl für parallele (Süden) als auch für senkrechte (Osten, Westen) Windrichtungen ein Sinken der Partikelanzahlkonzentration mit zunehmendem Abstand von der Straße festzustellen. Bei Wind parallel zum Fußweg aus der Richtung der Straße (Süden) wurden jedoch ein geringeres Abklingen und insgesamt kleinere Partikelanzahlkonzentration-Variationen innerhalb des Fußweges ermittelt. Betrachtet man den Wind und die Schadstoffrosen für den Fußweg wird klar (Abb. 20), dass der vorherrschende Wind einen deutlichen Einfluss auf die Partikelanzahlkonzentration hat, dass auf der Mikroskala jedoch die lokalen Gegebenheiten die Partikelanzahlkonzentration dominieren. Geringe Windgeschwindigkeiten in Bodennähe und die ablenkende Wirkung der umliegenden Gebäude führen zu einer Ablenkung des Windes in den Fußweg und damit zu einer Verteilung der Emissionen entlang der Messroute.

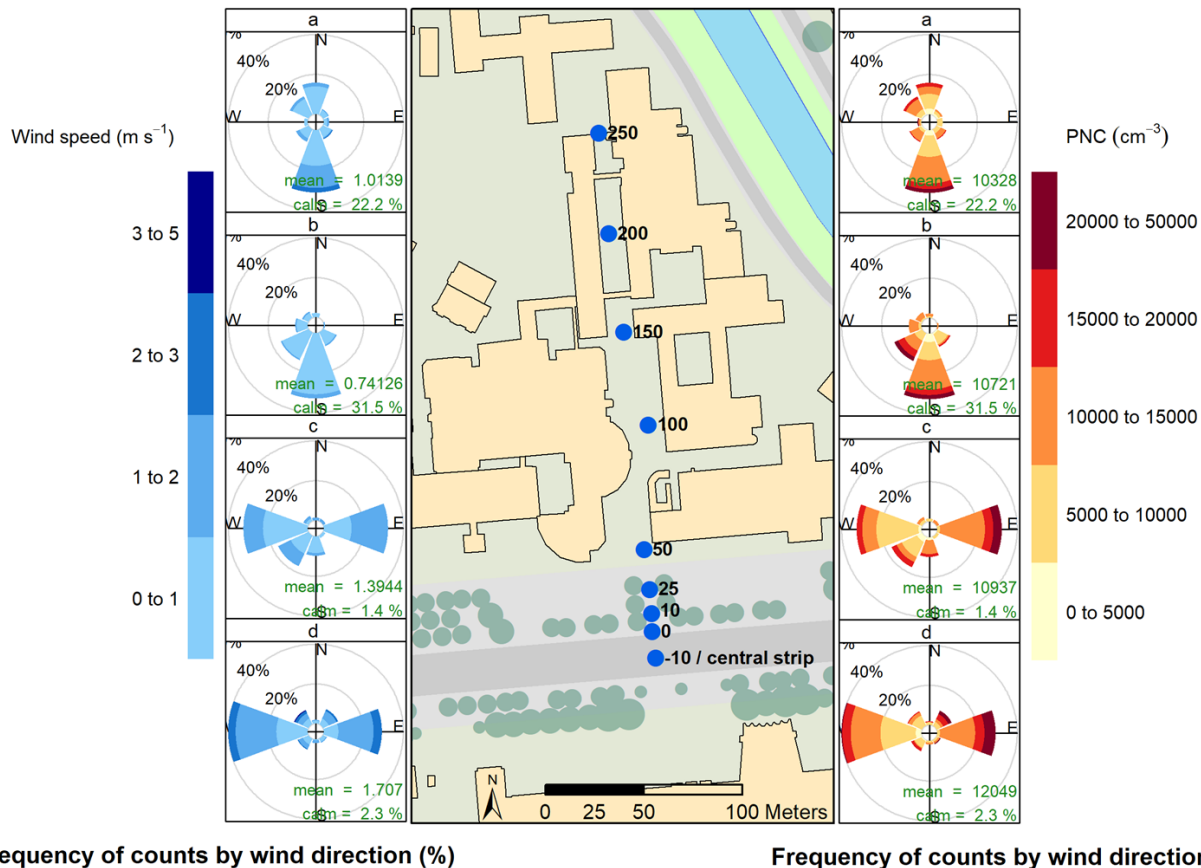


ABBILDUNG 20: Wind- (links) und Schadstoffrosen (rechts) entlang des Fußweges für jeweils a) den hinteren Teil des Fußweges auf 150 bis 250 m, b) den vorderen Teil des Fußweges auf 50 bis 100 m, c) den Eingang zum Fußweg auf 25 m, d) -10 bis 10 m in der Nähe der Straße des 17. Juni in Berlin-Charlottenburg. Mitte: Karte der Messpunkte entlang des Fußweges. Kartengrundlage: Umweltatlas Berlin. Quelle: Schneider et al. (in Vorb.).

Tages- und Jahreszeitabhängigkeiten von Spurenstoffkonzentrationen

Die Verbundpartner vom FZ Jülich (TP6) haben während aller IOPs zeitlich und räumlich hochaufgelöste Datensätze von Spurenstoffkonzentrationen in Berlin und Umland mit der MOBILAB-Analytik ermittelt (Klemp et al., 2020). Dafür waren im Vorfeld der IOPs Interkalibrationen der Gas- und Partikelphase der Spurenstoffe mit der MOBILAB-Analytik als Referenzsystem nötig. Ziel war dabei die Harmonisierung der Resultate verschiedener Messsysteme zur Sicherstellung eines Gesamtdatensatzes bekannter Datenqualität für Modellevaluierungszwecke von PALM-4U. Teilnehmer an den Interkalibrationen waren alle Projektpartner, welche im Rahmen von 3DO während der IOPs Spurenstoffmessungen durchgeführt haben.

Für die Untersuchung der Tages- und Jahreszeitabhängigkeit der gemessenen Spurenstoffkonzentrationen als Basis für PALM-4U-Modellierungen wurden feste Messrouten in Berlin bis ins Umland in enger Abstimmung mit den übrigen Spurenstoffmessgruppen (TP2, 4, 5 und 14) festgelegt und befahren. Eine Messroute des MOBILAB verlief im Bereich des Ernst-Reuter-Platzes in Berlin-Charlottenburg. Die Route wurde während aller vier IOPs täglich ca. fünf bis sechsmal durchfahren. Je nach Verkehrsaufkommen wurden für eine Messfahrt etwa 45 min bis 90 min benötigt.

Das beobachtete Stickstoffdioxid-Mischungsverhältnis zeigt eine starke Variabilität zwischen Maximalwerten auf den Magistralen (Otto-Suhr-Allee, Hardenbergstraße) und städtischen Hintergrundwerten, wie sie am Spreeufer (Am Spreebord) beobachtet wurden. Besonders hohe Werte für Stickstoffdioxid wurden im innerstädtischen Bereich für die Budapester Straße und den befahrenen Bereich des Kurfürstendamms gemessen, d.h. auf Straßen mit hoher Verkehrsdichte und hoher Straßenrandbebauung. Mehrspurige Straßen mit vergleichbarer Verkehrsdichte (Straße des 17. Juni) weisen dagegen allenfalls an Kreuzungspunkten mit Ampelregelung vergleichbare Konzentrationsspitzen auf (Fasanenstraße bzw. Salzufer). Niedrige Stickstoffdioxid-Werte wurden in den Nebenstraßen und/oder Wohngebieten beobachtet. Die erfassten Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen liegen zwischen 439 ppm (nahe dem atmosphärischen Hintergrundwert) und weisen Spitzenwerte von über 700 ppm auf. Die hohe zeitliche Variabilität der Kohlenstoffdioxid-Werte spiegelt direkt das Emissionsverhalten des umgebenden Verkehrs wider, da der Kohlenstoffdioxid-Ausstoß auf der Straße unmittelbar mit dem Kraftstoffverbrauch korreliert.

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 Innenstadtwerte. Zum anderen wird deutlich, dass eine Modellierung mit PALM-4U unbedingt die Einspeisung realer Startwerte durch ein regionales Modell erfordert, da nur auf diesem Wege der additive Effekt der luvseitigen Hintergrundkonzentrationen adäquat berücksichtigt werden kann. Abb. 21 stellt die gemessenen Stickstoffdioxid-Konzentrationen unter winterlichen Bedingungen dar. Die winterlichen Stickstoffdioxid-Hintergrundwerte im Vorfeld der Stadt Berlin sind um eine Größenordnung höher (> 21 ppb) als der sommerlichen Stickstoffdioxid-Hintergrundwerte von etwa 2 ppb. Denkbare Gründe sind der vorangegangene Aufbau hoher Stickstoffoxidkonzentrationen während einer austauscharmen Hochdrucklage, verbunden mit dem im Winter langsameren Abbau über Hydroxyl-Radikale. Zudem führt im Winter die verlangsamte photochemische Spaltung des Stickstoffdioxids infolge geringerer Strahlungsintensität zu einem erhöhten Stickstoffdioxid/Stickstoffmonoxid-Verhältnis.

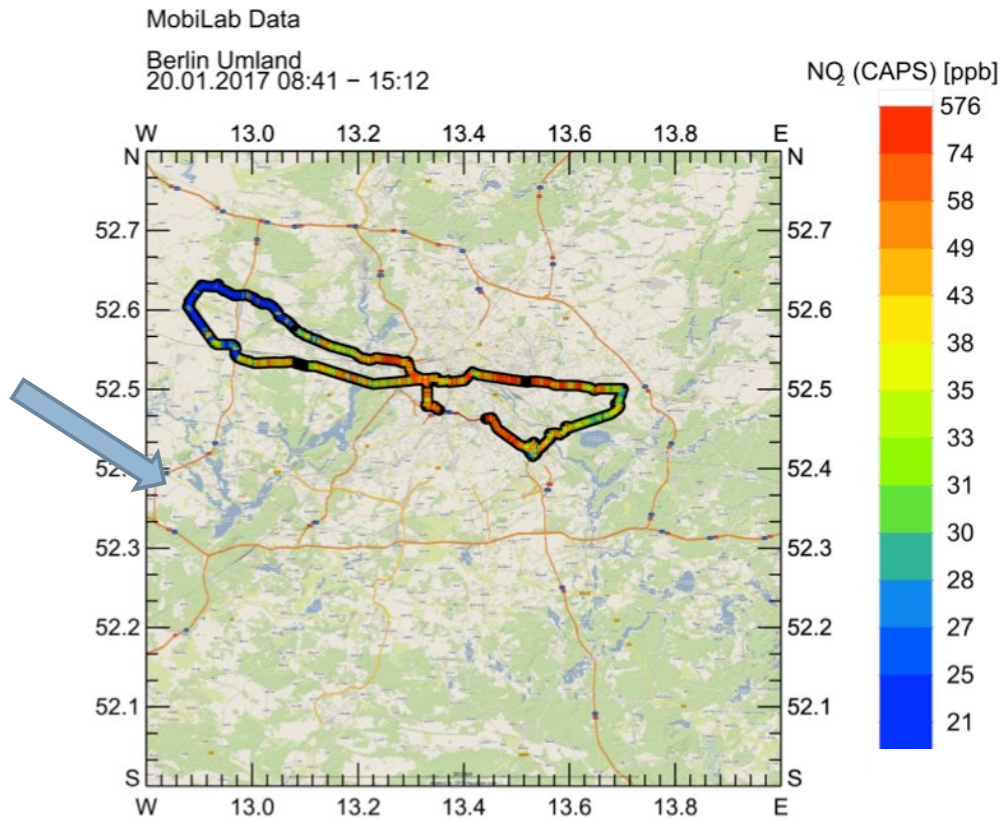


ABBILDUNG 21: Ergebnisse der Stickstoffdioxid-Messungen bei der Durchquerung der Stadt Berlin in Ost-West-Richtung und Untersuchungen im Luv- und Leebereich Berlins unter winterlichen Bedingungen und nordwestlicher Windrichtung (siehe blauer Windpfeil). Die hier vorgestellten Messungen mit MOBILAB fanden an einem Wochentag während der IOP 1 statt (20.01.2017 zwischen 09:00 und 12:30 UTC). Quelle: Klemp et al. (2020).

Die Projektpartner am IASS (TP5) haben in einer Straßenschlucht die Verbreitung von Spurenstoffen erfasst, wobei die Höhe und Distanz zur größten Schadstoffquelle vor Ort (Verkehr) besonders berücksichtigt wurde. Abb. 22 stellt die Ergebnisse der vertikalen Profilmessungen nach Tageszeit dar. Es ist zu sehen, dass die Tagesprofile für alle Höhen noch erhalten und relevant sind. Es ist zu erwarten, dass die Stickstoffdioxid-Werte mit erhöhtem Verkehrsaufkommen morgens und abends steigen, während die Ozon-Werte gleichzeitig sinken. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Ozon-Konzentrationen zum Nachmittag steigen, was deutlich die photochemischen Reaktionen mit den Stickstoffoxiden zeigt. In den Abbildungen ist auch zu sehen, dass die Ozon-Konzentrationen in der Straßenmitte durch die höheren Stickstoffoxiddkonzentrationen gesenkt werden. Diese Beziehung zwischen den Spurenstoffen ist im Winter deutlicher als im Sommer zu sehen.

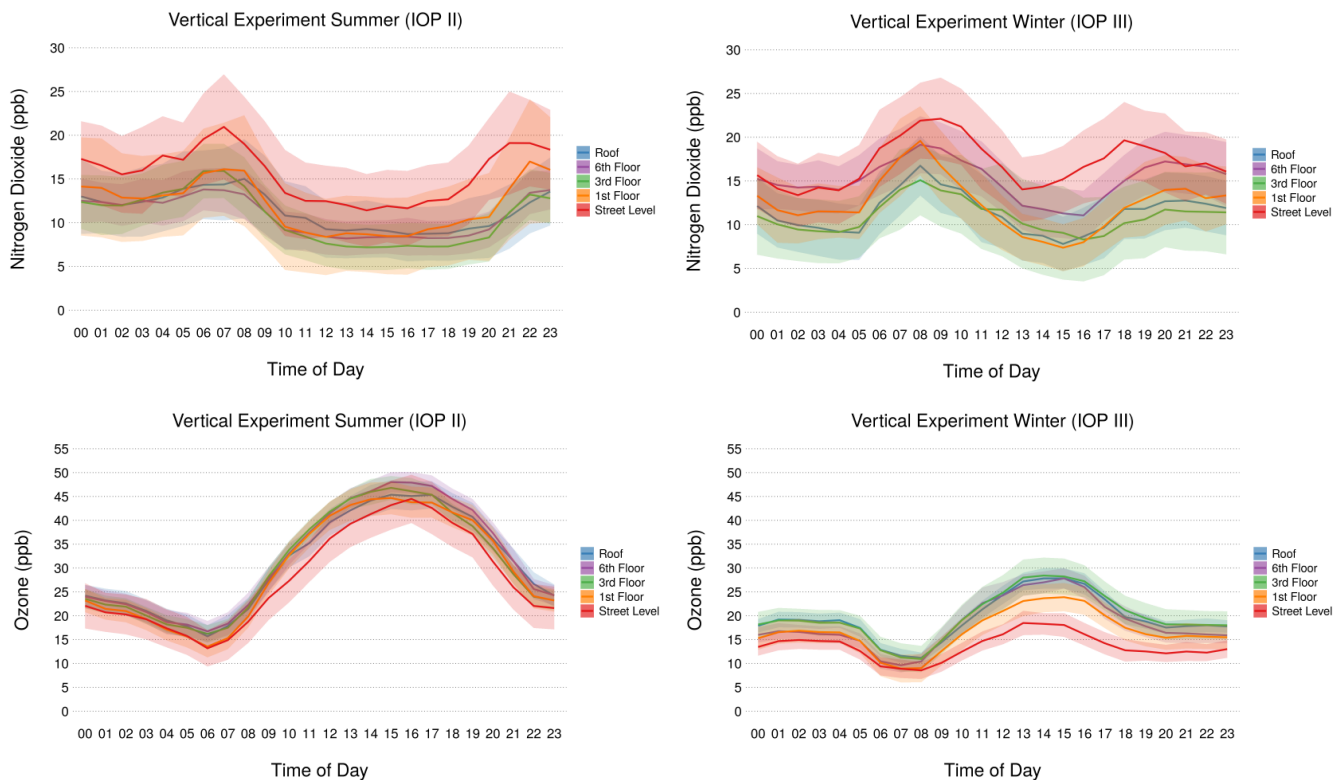


ABBILDUNG 22: Vorläufige Ergebnisse der vertikalen Profilmessungen von Stickstoffdioxid (Nitrogen Dioxide) und Ozon (Ozone) während IOP 2 (29.07.-28.08.2017) und IOP 3 (27.01.-23.02.2018) als Tagesprofil dargestellt. Fehlerbalken geben die 95 % Konfidenzintervalle der Daten wieder. Quelle: von Schneidmesser et al. (2020).

Luftqualitätsunterschiede zwischen Werk- und Wochenendtag

Die TU Braunschweig (TP4) hat in Berlin-Charlottenburg auf dem Dach des Hauptgebäudes der TU Berlin am nahe gelegenen Ernst-Reuter-Platz Partikelflüsse gemessen. Die Datenanalyse wurde für einen Zeitraum von zwei Jahren von Mitte März 2017 bis Mitte März 2019 durchgeführt.

Ein Vergleich zwischen Werktag (Mo-Fr) und Wochenende (Sa-So) für den mittleren Tagesgang des Flusses von Ultrafeinen Partikeln (UFP) zeigt, dass die Flüsse am Werktag tagsüber deutlich höher liegen als am Wochenende und am Werktag besonders der Einfluss der morgendlichen Rush-Hour sichtbar wird (Abb. 23). In den Abendstunden hingegen gleichen sich beide Verläufe wieder an. Im Mittel sind die Flüsse positiv, d.h. dass UFP während des gesamten Tages in der städtischen Hindernisschicht ausgestoßen werden. Wie durch die Standardabweichung deutlich wird, können vor allem in der Nacht bzw. am Wochenende Depositionsflüsse (sog. Ablagerung) auftreten.

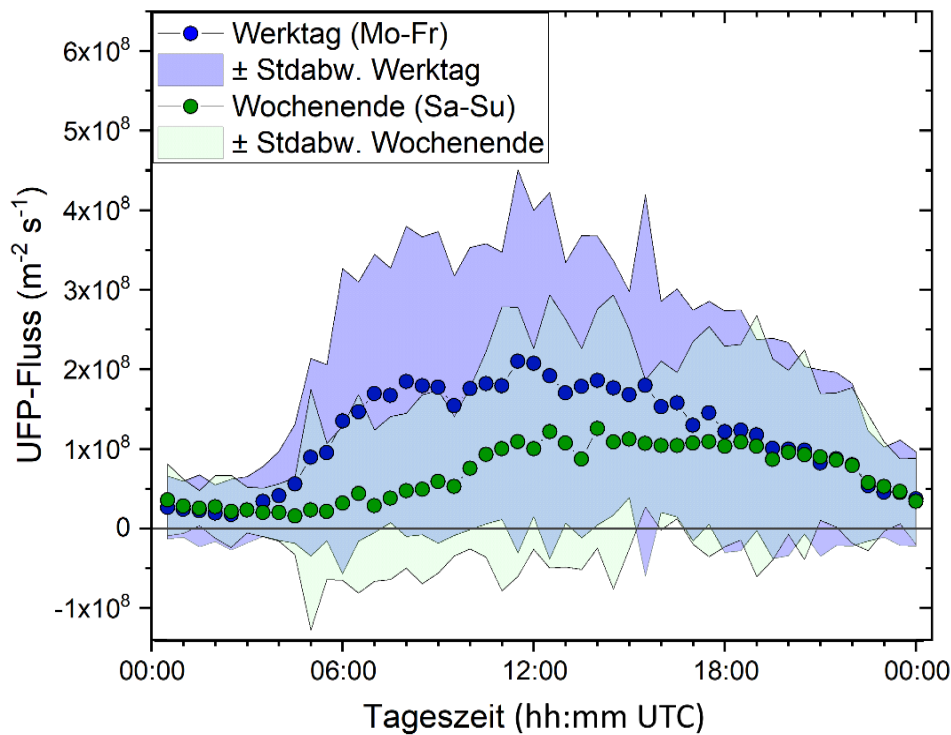


ABBILDUNG 23: Mittlere Tagesgänge des Austauschflusses Ultrafeiner Partikel (UFP) für einen Werktag (Mo-Fr) und einen Wochenendtag (Sa-Su). Ein positiver Fluss kennzeichnet Emission, während ein negativer Fluss Deposition charakterisiert. Quelle: Weber et al. (2020).

Die Messungen in TP4 bieten aufgrund der größenklassifizierten Auflösung der Partikelflüsse die Möglichkeit der genaueren Untersuchungen der Emissions- und Depositionsdynamik im Partikelgrößenspektrum (Abb. 24). Es wird deutlich, dass für Partikel in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers im Tagesverlauf unterschiedliche Transportrichtungen auftreten. Während in den kleinen Partikelfractionen tagsüber vor allem Emissionsflüsse dominieren, können bei größeren Partikeln zum Teil zeitgleich Depositionsflüsse beobachtet werden. Es können somit bidirektionale Flüsse in verschiedenen Bereichen des Größenspektrums auftreten. Vergleichbare Beobachtungen liegen ebenfalls von Untersuchungen an anderen Standorten mit hoher Rauigkeit vor, wie an anderen Stadtstandorten oder über hoher Vegetation/Wald (Held & Klemm, 2006; Schmidt & Klemm, 2008; Damay et al., 2009; Deventer et al., 2015, 2018; Petroff et al., 2018). Die Transportrichtung der Partikel kann über hoher Vegetation jedoch umgekehrt sein (Held & Klemm, 2006; Damay et al., 2009).

An Werktagen tritt Deposition nur in den gröberen Partikelfractionen (Partikeldurchmesser > 100 nm) im Nachtverlauf auf, während am Wochenende ganztägig Depositionsflüsse im Größenbereich > 100 nm auftreten können. Zum Ende der zweiten Nachthälfte des Wochenendes schwächen sich die Emissionsflüsse auch im UFP-Bereich ab. Die maximalen Emissionsflüsse treten werktags im Bereich der kleinsten Partikeldurchmesser auf (Partikeldurchmesser < 12 nm).

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 Despositions- bzw. Transportgeschwindigkeiten zur Überprüfung des angegliederten, sektionalen Aerosolmodells SALSA abgeleitet werden können.

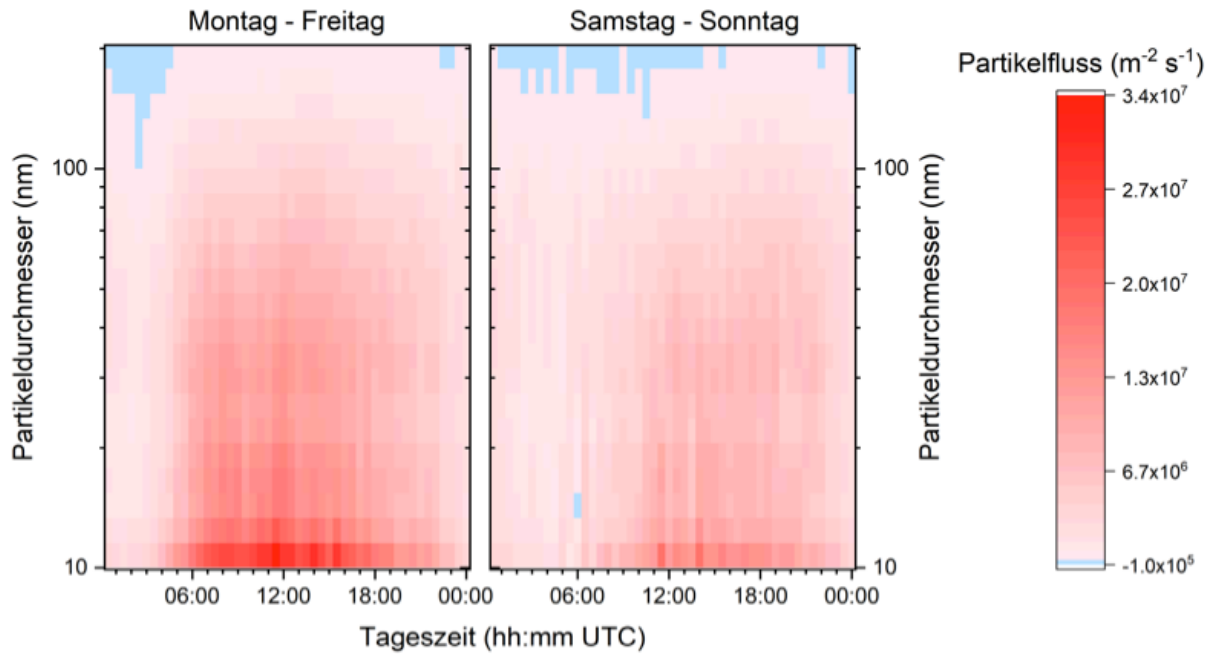


ABBILDUNG 24: Mittlere Tagesgänge der größenklassifizierten Partikelflüsse für einen typischen Werktag (Mo-Fr) und einen Tag des Wochenendes (Sa-So). Rote Farbe symbolisiert Emission, während blaue Farbe Deposition deutlich macht. Quelle: Weber et al. (2020).

Jahres- und Tagesgang des latenten Wärmestroms

Ein Beispiel für die Ergebnisse aus den LTO ist die Bestimmung des latenten Wärmestroms. Der latente Wärmestrom transportiert Wärme durch Wasserdampf. Dabei nimmt er Energie durch Verdunstung auf, setzt sie durch Kondensation frei und führt damit zur Wärme- bzw. Energieübertragung innerhalb der Atmosphäre. Der latente Wärmestrom ist, wie die kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse, der sensible Wärmefluss (Wärmetransport in einem Medium aufgrund eines Temperaturgradienten) und die Energieabgabe von Niederschlag, Teil der Energiebilanz der Erde. Abb. 25 zeigt Unterschiede im Jahres- und Tagesgang des latenten Wärmestroms zwischen dem Standort TU Berlin Campus Charlottenburg (stark versiegelt, rechts) und dem Standort Rothenburgstraße in Berlin Steglitz (hoher Vegetationsanteil, links). Durch die von TP1 (TU Berlin) neu installierte Instrumentierung können solche Unterschiede in der Energiebilanz langfristig nach aktuellem Stand der Technik erfasst werden.

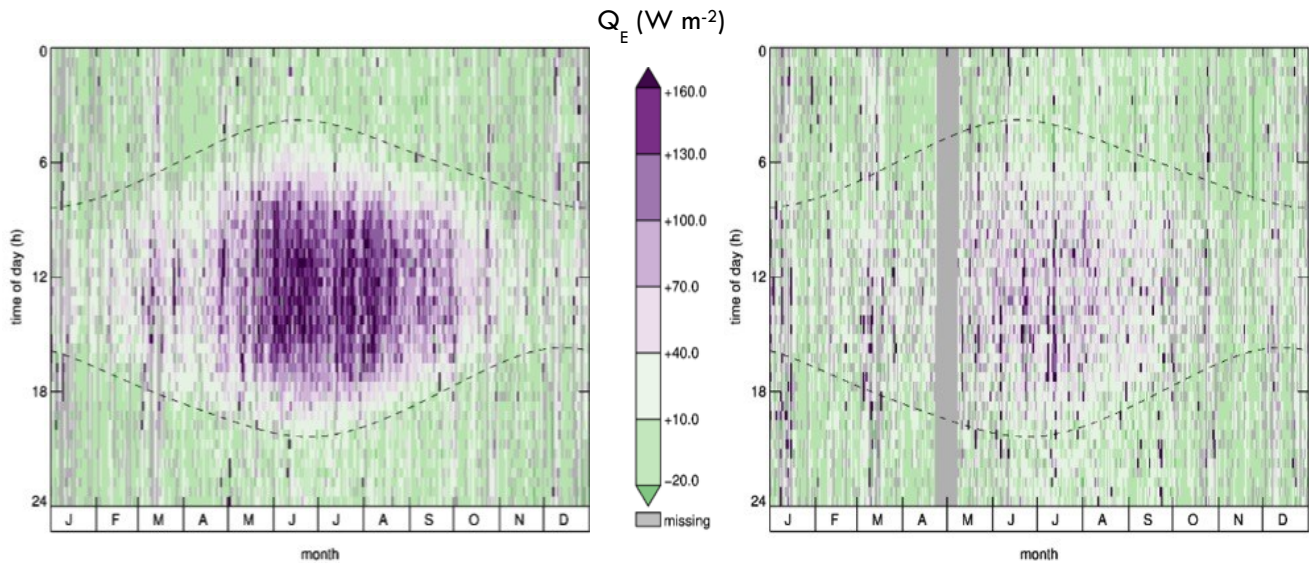


ABBILDUNG 25: Jahres- und Tagesgang des latenten Wärmestroms an den Standorten TU Berlin Campus Charlottenburg (rechts, gemessen in 56 m ü. G.) und in der Rothenburgstraße in Berlin Steglitz (links, gemessen in 40 m ü. G.) für den Zeitraum Juni 2018 bis September 2019. Quelle: Scherer et al. (2020).

Kühlwirkung einer städtischen Grünfläche bei anhaltender Trockenheit

Der Erhalt und die Erweiterung städtischer Grünflächen sind ein wichtiges Element der klimaangepassten Stadtentwicklung. Aufgrund rezenter und zukünftig erwarteter Klimaerwärmung wird die entlastende Kühlwirkung von Grünflächen während Hitzewellen an Bedeutung zunehmen. Da die Verdunstung ein essentieller Prozess der Kühlwirkung von Grünflächen ist, wurde in 3DO durch Auswertung von LTO-Daten untersucht, ob auch bei langanhaltender Trockenheit noch eine Kühlwirkung der Grünflächen gegeben ist. Hierzu wurden Messungen an den Berliner LTO-Stationen Alexanderplatz (DWD), Tempelhofer Feld (DWD) und Tiergarten (TU Berlin) für die Jahre 2017 und 2018 miteinander verglichen. 2018 war ein sehr trockenes Jahr und 2017 ein eher feuchtes Jahr. Die Jahresniederschlagssumme auf dem Tempelhofer Feld betrug 796 mm im Jahr 2017 und 371 mm im Jahr 2018. Das 30-jährige Niederschlagsmittel in Berlin liegt bei 591 mm (Dahlem 1981-2010). Während im bewässerten und mit Bäumen bestandenen Tiergarten die Vegetation im Jahr 2018 grün und somit die Verdunstungskühlung erhalten blieb, vertrocknete der nicht bewässerte Grasbewuchs auf dem Tempelhofer Feld. Das Tempelhofer Feld ähnelte in 2018 einer Steppenlandschaft mit vernachlässigbarer Verdunstungskühlung durch die Vegetation (Abb. 26).

Im Sommerhalbjahr ist es vormittags auf dem sonnenexponierten Tempelhofer Feld wärmer als am noch beschatteten Alexanderplatz. Im Jahr 2018 ist dieser Effekt durch die große Trockenheit deutlich stärker ausgeprägt als in 2017. Bei Nacht ist es auf dem freien Tempelhofer Feld kühler als an der Stadtstation Alexanderplatz. Dieser Effekt ist im trockenen Jahr 2018 und im feuchteren Jahr 2017 ähnlich stark ausgeprägt, wobei im Jahr 2018 mehr Nächte mit ausgeprägter Überwärmung am Alexanderplatz auftraten. Die Differenz der spezifischen Feuchte zeigt im Sommerhalbjahr 2017 auf dem Tempelhofer Feld höhere Luftfeuchtwerte als am stark versiegelten Alexanderplatz. Das Sommerhalbjahr 2018 beginnt mit ähnlichen Feuchtedifferenzen wie 2017. Ab der zweiten Jahreshälfte in 2018 wird das Tempelhofer Feld jedoch immer trockener im Vergleich zum Alexanderplatz und es ist ab September kein signifikanter Feuchteüberschuss mehr auf dem Tempelhofer Feld nachweisbar (Hodan et al. 2020).



ABBILDUNG 26: Juli 2018; links: Tiergarten bewässert, rechts: Tempelhofer Feld unbewässert. Fotos: Roland Winkler DWD Potsdam (Tiergarten) und Ralf Becker, DWD Lindenberg (Tempelhofer Feld).

Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass in niederschlagsarmen Sommern mit vertrockneter Vegetation, baumlose Parks wie das Tempelhofer Feld einerseits vormittags erhöhte Lufttemperaturen aufweisen, andererseits aber nachts sich in ihrer Kühlwirkung nicht signifikant von feuchteren Sommern unterscheiden und somit auch in einem zukünftig möglicherweise trockeneren Sommerklima als kühlere Refugien und Ausgleichsräume ihre stadtklimatische Bedeutung haben.

Mobile Messungen der thermischen Belastung von Stadtbewohnern

Die Verbundpartner der TU Dresden (TP9) haben die biometeorologische Exposition von Stadtbewohnern direkt aus Messungen bestimmt und diese Ergebnisse mit Berechnungen numerischer Modelle verglichen. Der Wärmehaushalt des Menschen bildet die Grundlage für die Bestimmung der thermischen Belastung. Er wird bestimmt durch thermophysiologische Regulationsmechanismen des menschlichen Organismus, die Bekleidung und die äußeren Umweltbedingungen (Strahlung, Temperatur, Feuchte und Wind). Im Fokus standen klimatische Extreme, die vor allem während autochthoner Wetterlagen (z.B. sommerliche Hochdruckwetterlage) in Großstädten auftreten.

Zur Bestimmung der thermischen Belastung wurden im Sommer 2017 und 2018 mobile Messungen um den Ernst-Reuter-Platz in Berlin-Charlottenburg durchgeführt. Eingesetzt wurden ein Messrucksack (Abb. 27) und ein Messfahrrad (nicht gezeigt). Sie erfassen die Strahlungskomponenten aus bis zu vier Raumrichtungen, die Temperatur und Feuchte sowie Wind, so dass eine unabhängige Berechnung sogenannter thermischer Indizes auf Basis der Energiebilanz möglich ist. In komplexen Umgebungen bilden mobile Messplattformen die ideale Methode zur direkten Erfassung der variablen Umweltbedingungen. Ergänzt durch stationäre Messungen anderer Teilprojekte konnten damit repräsentative Datensätze für städtische Lebensräume erstellt werden.

Während die Messungen am Tag eine hohe Variabilität der Lufttemperatur zeigen, die hauptsächlich durch die momentane Einstrahlung in den einzelnen Abschnitten der Messroute hervorgerufen wird, bildet sich in der Nacht eine deutliche Gliederung des Stadtgebietes heraus. Unter dem Einfluss von Grünflächen und Wasserläufen kühlen sich die umliegenden Bereiche deutlich stärker ab. Die Temperatur um die Wohnblocks in der Nähe des Tiergartens liegt um 4 °C unter denen auf der Leibnizstraße, einem dicht bebauten Bereich. An der Spree liegende Wohnblocks, die am Abend aufgrund der westlichen Exposition sehr hohe Temperaturen zeigen, kühlen sich nachts schnell auf moderate Temperaturen ab. Dagegen wurden auf der Leibnizstraße, Temperaturen bis zu 25 °C um Mitternacht gemessen, obwohl dort am Tag geringere Strahlungsbelastungen in Bodennähe zu verzeichnen waren. Problematisch für die thermische Belastung der Stadtbewohner ist möglicherweise nicht der Wärmeinseleffekt der Gesamtstadt von 1-3 K, sondern die kleinräumigen Unterschiede in den Stadtgebieten von bis zu 10 K (Queck & Goldberg 2020).



ABBILDUNG 27: Messrucksack im Einsatz vor dem Hauptgebäude der TU Berlin.
Foto: Ronald Queck, TU Dresden.

Die TP9 Partner unternahmen zudem einen Vergleich der numerischen Simulationen mit den mobilen Messungen. Auswirkungen dieser Unterschiede wurden am Beispiel des mikroskaligen Modells ENVI-met untersucht. Zu diesem Zweck erfolgten Modellsimulationen für das Gebiet um das Hauptgebäude der TU Berlin. Abb. 28 (links) zeigt den UTCI, einen thermischen Index, für das Gebiet um das Hauptgebäude der TU Berlin. Er wurde berechnet aus den Simulationsdaten und aus Daten der mobilen Plattform „Rucksack“. Beide Berechnungen weisen eine hohe räumliche Variabilität auf. Die genauere Untersuchung zeigt, dass diese Variabilität ein Vielfaches der zeitlichen Schwankungen an einem Ort ist. Daraus kann geschlossen werden, dass mobile Messungen in windschwachen Situationen repräsentative Ergebnisse für die thermischen Indizes liefern. Um die statistische Sicherheit zu erhöhen wird aber empfohlen, räumliche Bereiche mit ähnlichen Umweltbedingungen zu mitteln. In Abb. 28 (rechts) ist die Differenz zwischen beiden UTCI Bestimmungen dargestellt. 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 gut simuliert.

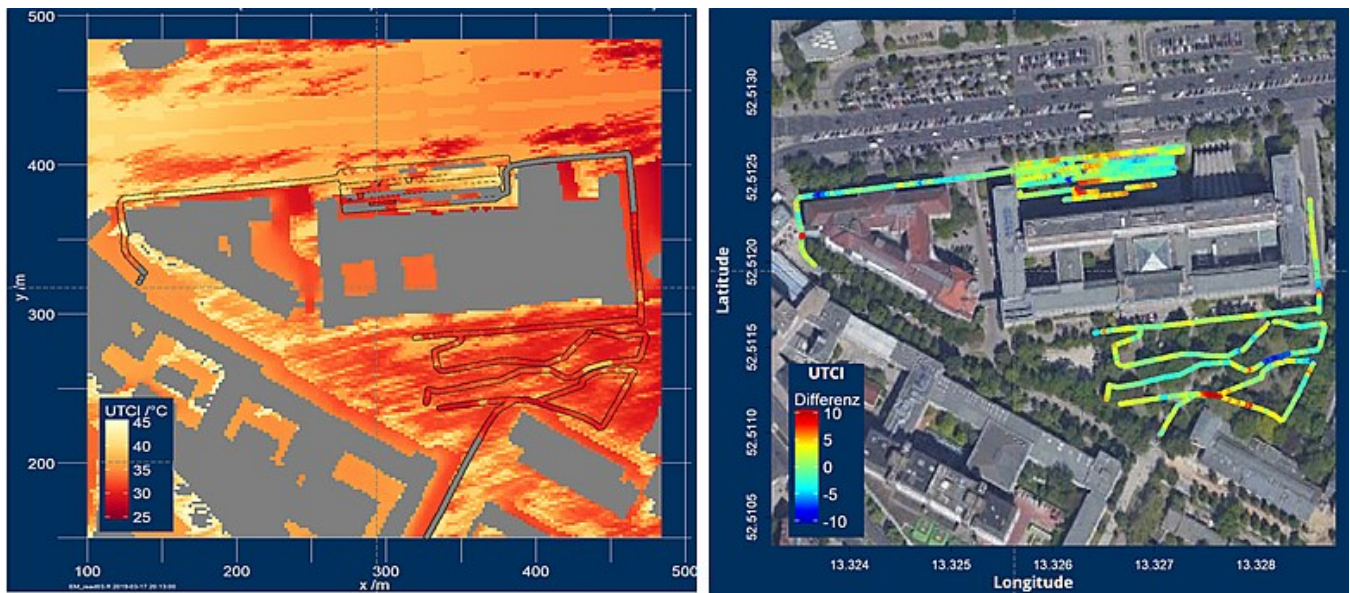


ABBILDUNG 28: Links: UTCI am 31.07.2017 gegen 16:00 MEZ, berechnet aus einer ENVI-met Simulation (Fläche) und aus Messdaten (Band), graue Flächen symbolisieren Gebäude. Rechts: UTCI Differenz zwischen ENVI-met Simulation und mobiler Plattform. Quelle: Queck & Goldberg (2020).

Gebäudeformen und thermisches Empfinden

Die Verbundpartner der FU Berlin (TP3) haben im Rahmen der IOP 1 meteorologische Größen zur Bestimmung der sogenannten Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET), einem thermischen Index, an sechs Standorten auf dem Gelände der TU Berlin und der Universität der Künste (UdK) um den Ernst-Reuter-Platz erhoben. Die Messungen fanden unter dem Gesichtspunkt der unterschiedlichen Gebäudeausrichtung und dessen Einfluss auf die PET sowie der späteren Modellvalidierung mit PALM-4U statt.

Abb. 29 zeigt ein Beispiel der PET aller Messpunkte als Tagesmittel, -maximum und -minimum vom 17.01.2017 (Tag 1) und 18.01.2017 (Tag 2). Tag 1 und Tag 2 zeigen eine PET, die sich im thermischen Bereich des „extremen Kältestress“ befindet. Der Innenhof (Punkt 6) der UdK zeigt am ersten Tag eine Differenz bis zu 5 K zum Messpunkt 5 (dem Vorplatz des Hauptgebäudes der TU Berlin). Dieses Ergebnis zeigt, dass der Innenhof wärmer ist als die anderen fünf Gebäudekonfigurationen; allerdings befindet sich auch dieser Messstandort laut der Definition der PET noch im thermischen Bereich des „extremen Kältestress“. Gebäudeformen und Gebäudeausrichtungen haben einen wesentlichen Einfluss auf das thermische Empfinden des Menschen.

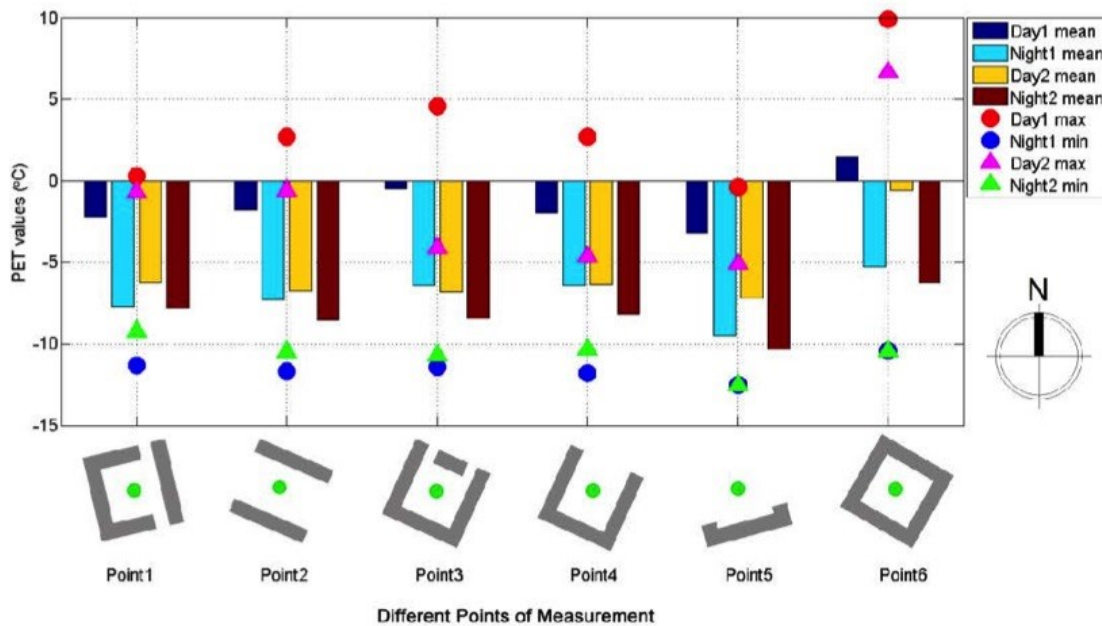


ABBILDUNG 29: Mittlere Tages- und Nacht-PET in °C am 17. und 18.01.2017 an den einzelnen Gebäudeformen. Quelle: Langer et al. (2020).

Berlin bietet ideale Bedingungen für die Erhebung von Messdaten zur Evaluierung von Stadtklimamodellen wie PALM-4U, da weder das Stadtklima noch die Luftqualität durch topographisch induzierte atmosphärische Prozesse oder maritim beeinflusst ist. Die Konzeption der Intensivmesskampagnen umfasste daher umfangreiche dreidimensionale Messungen meteorologischer und luftchemischer Größen. Zusammen mit einer hohen Zahl an Langzeitbeobachtungen wurden Erkenntnisse zur Struktur der atmosphärischen Grenzschicht sowie der Ausprägung verschiedener meteorologischer Größen und deren Einfluss auf das thermische Empfinden des Menschen gewonnen. Zeitliche und räumliche Verteilungen von Spurenstoffen und verschiedenen Partikeln wurden erfasst und in Beziehung zu meteorologischen Größen und dem Verkehrsgeschehen gesetzt. Die umfassenden Datensätze ermöglichen sowohl eine Evaluierung von PALM-4U als auch die Bearbeitung wissenschaftlicher und praktischer Fragestellungen im Kontext von Stadtklima, Klimaschutz und Lufthygiene.

Hamburg – Maritimes Stadtklima geprägt durch Wind

In der Hansestadt Hamburg (760 km², 1'820'000 Einwohner in 2016) sind die maritimen Einflüsse und ihre Auswirkungen auf die städtischen atmosphärischen Prozesse sowie die atmosphärischen Veränderungen durch die städtische Umwelt von großem Interesse. Wind ist ein prägendes Element des Stadtklimas in Hamburg und steuert dessen grundlegende physikalische Prozesse. Wind reguliert über Turbulenz und Transport die räumliche Verteilung von Wärme, Feuchte und Schadstoffen in der Atmosphäre. Eine realistische Simulation des urbanen Windfelds ist deshalb eine Grundvoraussetzung für jede erfolgreiche Stadtklimamodellierung. Jeder Stadt wird Wind in erster Linie durch die allgemeine Wettersituation aufgeprägt, während die Stadtstrukturen nur lokal

das Windfeld modifizieren. Der langfristigen Erfassung der regionalen und lokalen Wetterbedingungen innerhalb Hamburgs dienen LTO, deren räumliche Verteilung in Abb. 30 dargestellt ist. Der Fokus der Messaktivitäten lag jedoch mit vier zusätzlichen Intensivmesskampagnen (IOP) in der Hamburger HafenCity auf der Erstellung von Referenzdaten zur Beschreibung der städtischen Windmodifikationen und zur Evaluierung des neuen Stadtklimamodells PALM-4U. Die Umgebung der HafenCity Universität wurde für die IOPs ausgewählt, da dort vergleichsweise einfache Anströmungsbedingungen von der Elbseite aus vorliegen (siehe Abb. 30). Die HafenCity unterliegt zudem ständigen baulichen Veränderungen, so dass während der Projektlaufzeit auch Veränderungen des Windfeldes durch Neubauten erfasst werden konnten. Aus den gewonnenen Datensätzen können klar definierte Testfälle für die Simulation von Wind und Turbulenz rund um das Universitätsgebäude generiert werden. In den beiden Winter-IOPs untersuchten die Partner der TU Dresden zusätzlich den thermischen Komfort in den vom Wind geprägten winterlichen Kälteperioden. Für eine detaillierte Beschreibung der LTO- und IOP-Messungen in Hamburg siehe auch Scherer et al. (2019a).

Am Meteorologischen Institut der Universität Hamburg steht dem Verbundvorhaben ein Windkanallabor zur Verfügung, in dem in einem sogenannten Grenzschichtwindkanal die Windströmung in den bodennahen Luftschichten der Atmosphäre nachgebildet und systematisch untersucht wurde. Hierzu wurden die Intensivbeobachtungsstandorte (IOL) der drei Modellstädte Berlin, Hamburg und Stuttgart im Maßstab 1:500 nachgebaut und jeweils im Windkanal zu Versuchszwecken aufgebaut (siehe Abb. 3, 31 und 39).

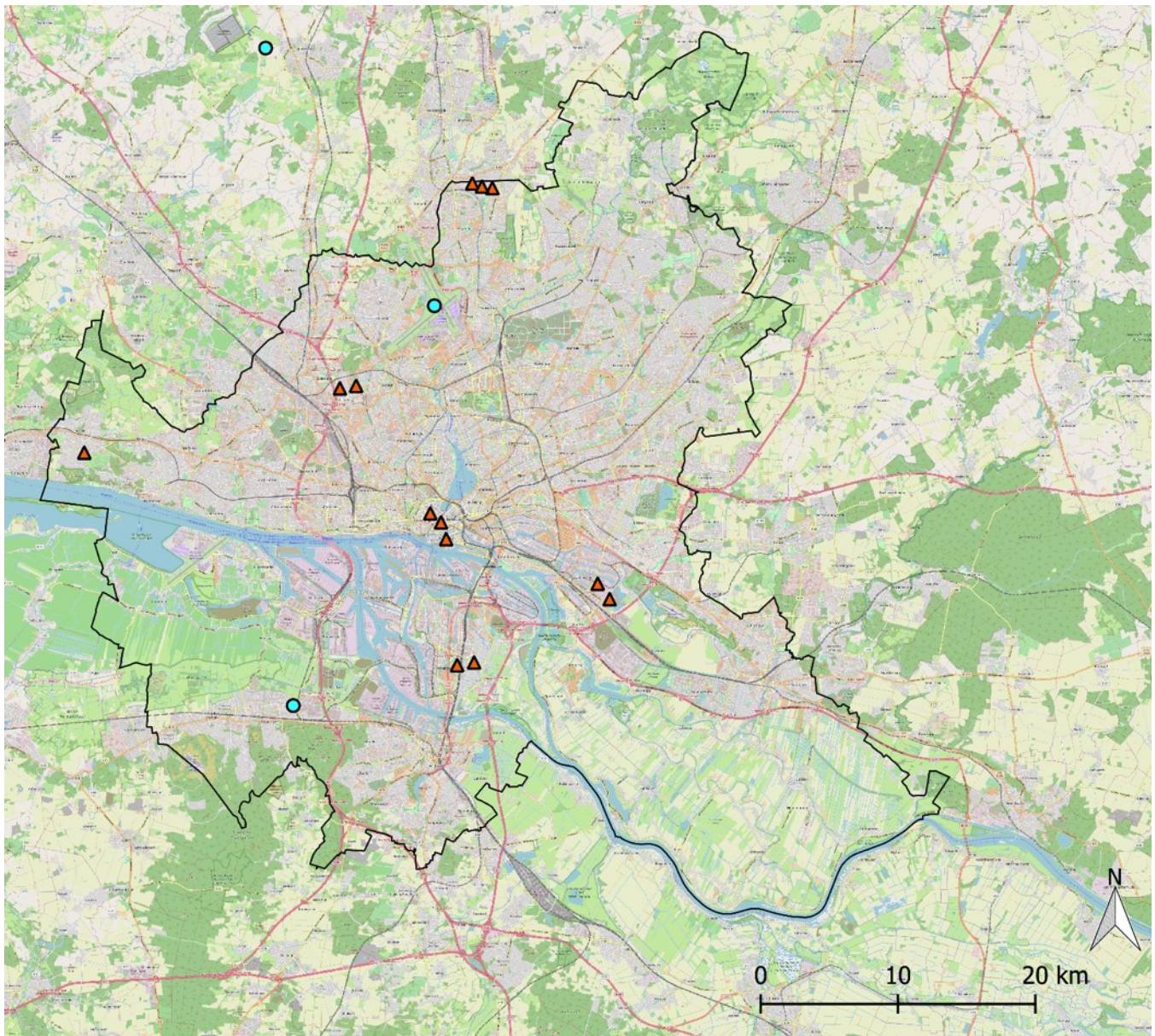


ABBILDUNG 30: LTO-Standorte in Hamburg. Die LTO-Daten werden durch folgende Institutionen erhoben: Deutscher Wetterdienst (türkiser Kreis), Universität Hamburg, Institut für Meteorologie; HUSCO-Net und Wettermast Hamburg (oranges Dreieck). Die schwarze Linie markiert die Stadtgrenze. Kartengrundlage: Openstreetmap – veröffentlicht unter OdbL 1.0. Quelle: Scherer et al. (2019a).

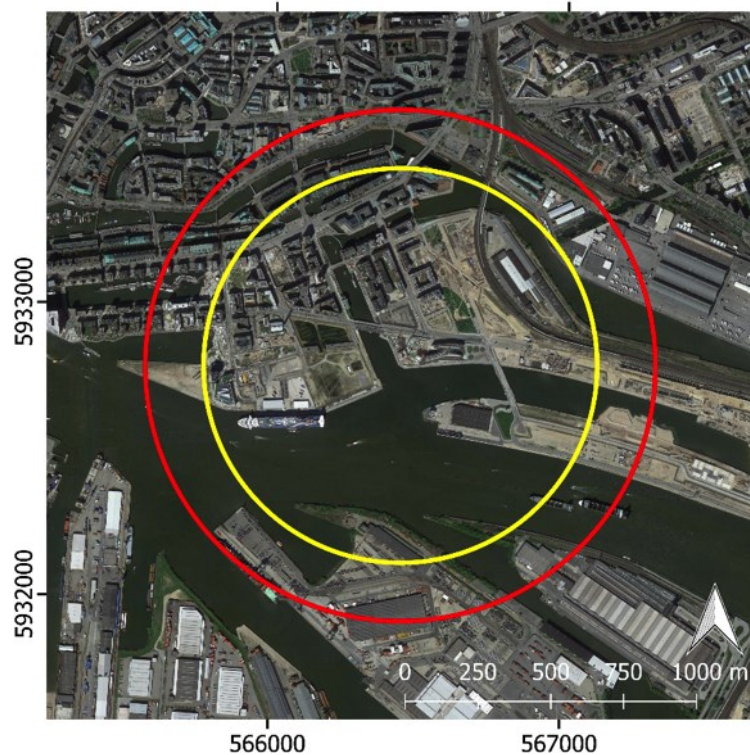


ABBILDUNG 31: IOL in der Hamburger HafenCity. Roter Kreis: Ausschnitt für Windkanalmodell (Maßstab 1:500; Radius 875 m), Gelber Kreis: Ausschnitt für die Analyse (Radius 675 m). Bild in WGS84/Pseudo-Mercator Projektion. Koordinaten in UTM32. Kartengrundlage: © 2017 GeoBasis-DE/BKG (© 2009), Google. Quelle: Scherer et al. (2019a).

Messkonzept

Im Hamburger Messkonzept dienen die LTOs am Grenzsichtmast „Wettermast Hamburg“⁷ als Ankerpunkt zur Charakterisierung des übergeordneten Wetterantriebs (Abb. 32 links). Der Wettermast befindet sich am südöstlichen Stadtrand und ist auf sechs Plattformen bis in 280 m Höhe mit umfassenden meteorologischen Sensoren, einschließlich turbulenz erfassenden Ultraschallanemometern, ausgerüstet. Eine zusätzliche räumliche und zeitliche Einordnung von lokalen Messungen erlaubt das Stadtklimamessnetz HUSCO-Net⁸ (Hamburg Urban Soil and Climate Observatory, Abb. 32 rechts), das aus zwölf autonomen Klimastationen besteht, die überwiegend auch mit Messungen der Bodenfeuchte und -temperatur ausgestattet sind.

⁷ <https://wettermast.uni-hamburg.de>

⁸ <https://www.clisap.de/de/forschung/b:-auspraegungen-und-auswirkungen-des-klimas/b5:-urbane-systeme-versuchsgebiet-hamburg/husco-hamburg-urban-soil-climate-observatory/>



ABBILDUNG 32: Wettermast Hamburg (links) und HUSCO-Net Messstation in der HafenCity (rechts). Quelle: Ament et al. (2020).

An den IOPs in Hamburg beteiligten sich TP10 (Universität Hamburg) und TP9 (TU Dresden). Während TP10 an allen vier IOPs, die jeweils im Sommer und Winter 2017 und 2018 für einen Zeitraum von rund vier Wochen stattfanden, teilnahm, beteiligte sich TP9 jeweils an den Winter-IOPs in Hamburg. Hierzu wurde von beiden TP ein Konzept entwickelt, das es ermöglichte, detailliert das Stadtklima und die Windmodifikation durch die Bebauung auf Skalen von etwa 10 bis 500 m in der HafenCity im Zentrum von Hamburg zu vermessen (Abb. 33). Die HafenCity ist Europas größtes innerstädtisches Stadtentwicklungsprojekt, mit massiven Umbauten und neuen Gebäuden. Auf dem ehemals rein wirtschaftlich genutzten „Innerstädtischen Hafenrandgelände“ entstand ein exklusives Wohn-, Büro-, und Kulturzentrum von Hamburg (z.B. die Elbphilharmonie). Das Stadtgebiet ist geprägt durch hohe Gebäude mit erheblicher Windbeeinflussung, wie z.B. das Gebäude der HafenCity Universität. Stationäre Windmessungen wurden an insgesamt 18 Positionen um die HafenCity Universität aufgebaut. TP9 übernahm hierbei die Aufgabe, die möglichst „ungestörte“ Anströmung über die Elbe auf den Gebäudekomplex zu bestimmen. Parallel zur nördlichen Gebäudefront, entlang eines Grünstreifens, wurde durch TP10 ein Transekt aus sechs Windmasten mit detaillierten Turbulenzmessungen von bis zu 20 Hz durch Ultraschallanemometer installiert (Abb. 33 Mitte und unten). In den Winter-IOPs wurde gleichzeitig durch TP9 an einem 30 m hohen Mast auf der gegenüberliegenden Fläche (Baakenhoeft) der HafenCity Universität sowie mit einem Fesselballon auf dem Dach der HafenCity Universität die Windprofile vermessen. Mit dem Fesselballon konnten zudem auch Profile von Temperatur und Luftfeuchte bis in 400 m Höhe aufgenommen werden (Abb. 33 rechts oben). Mit einem kleinen mobilen Messmast wurden bodennahe Profile zur Untersuchung der Wechselwirkung mit dem Untergrund und der Überprüfung der unteren Randbedingungen von PALM-4U gemessen sowie die Belastung im Niveau von Fußgängern bestimmt. Mobile Messungen aller für die Berechnung der gefühlten Temperatur erforderlichen Größen zur Untersuchung des thermischen Komforts im Fußgängerniveau komplettierten das Messkonzept.



ABBILDUNG 33: Messaufbauten während der IOPs in der Hamburger HafenCity: Referenzwindprofile an einem 30 m Mast (oben links). Standort des Mastes: blaues Rechteck rot umrandet im mittleren Bild. Fesselballon auf dem Dach der HafenCity Universität (oben rechts und Startpunkt des Ballons durch blauen Kreis, rot umrandet im mittleren Bild angezeigt). Gelber Pfeil zeigt auf Gebäude der HafenCity Universität (HCU). Transekt mit sechs Windmasten vor der HafenCity Universität (rote Pfeile im mittleren Bild, Stationen A-F im Bild unten). Entlang der punktierten Linien (mittleres Bild) wurden mobile Messungen des thermischen Komforts durchgeführt. Quelle: Ament et al. (2020).

Qualitätssicherung der Windmessdaten

Zur Qualitätssicherung wurden alle eingesetzten Ultraschallanemometer der beiden TP vor deren Einsatz im Windkanal der Universität Hamburg überprüft. Dabei wurde ein generelles Korrekturverfahren für den Fehler durch Verwirbelungen um die Sensorgeometrie entwickelt. Abb. 34 zeigt die Anwendung am Beispiel von Ultraschallanemometern (Typ: Model 81000 der Firma RM Young). Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass bei höheren Anströmwinkeln Fehler von bis zu 15 % entstehen und gerade in Städten eine Korrektur der Daten notwendig ist.

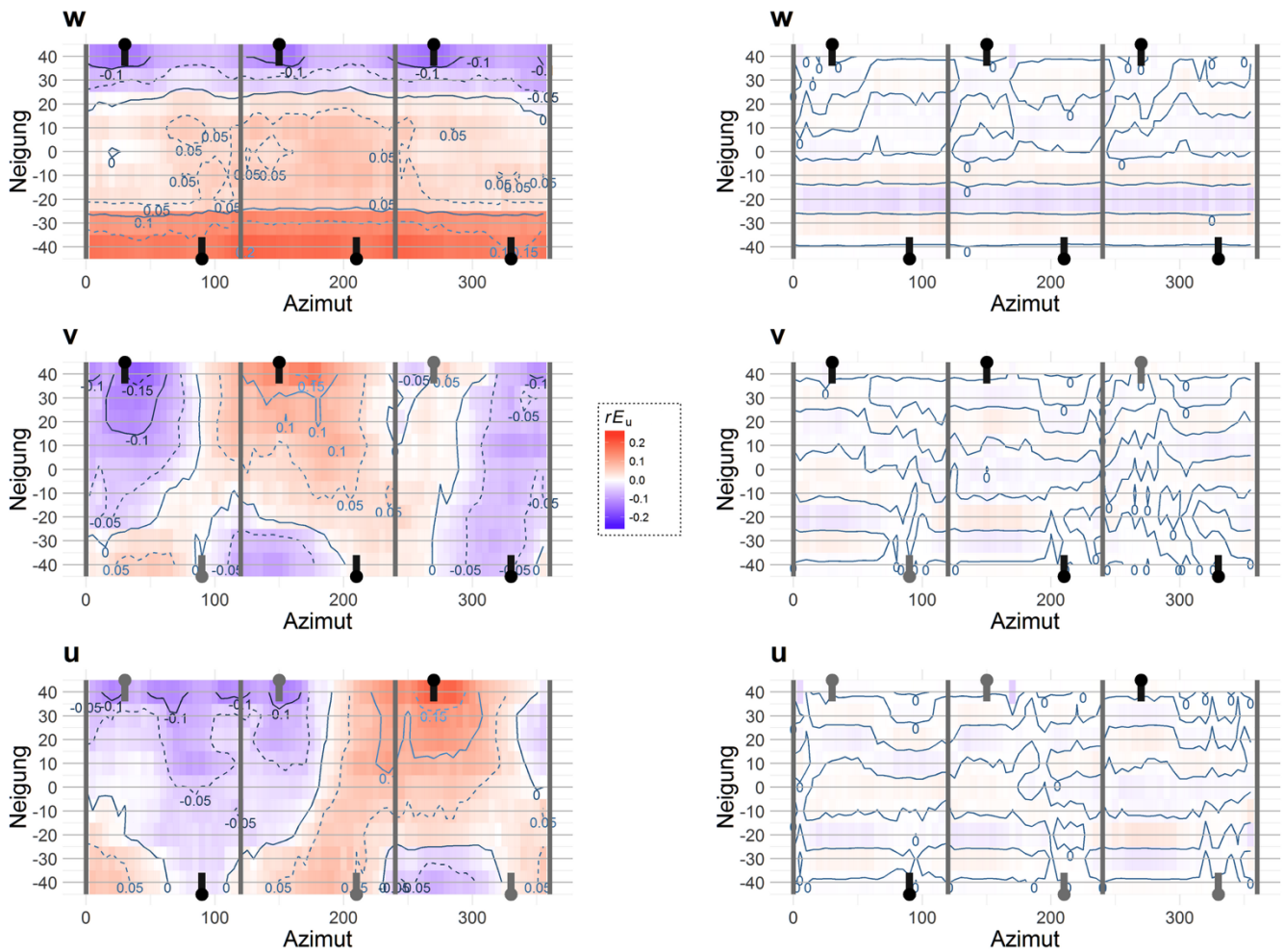


ABBILDUNG 34: Relativer Fehler rE_u eines 3D Ultraschallanemometers (RM Young 81000) für alle drei Windkomponenten ($rE_u = (U_{Sonic} - U_{Windkanal}) / U_{Windkanal}$). Linke Seite: Ergebnisse der Windkanalmessungen. Rechte Seite: nach Anwendung der Kalibrierfunktion. Quelle: Queck & Goldberg (2020).

Lokale Veränderung des Windfelds

Lokale Modifikationen des Windfelds durch das Gebäude der HafenCity Universität konnten durch den Transekt an den installierten Windmasten (Abb. 33) im Detail und in einem statistisch auswertbaren Umfang erfasst werden. Abb. 35 stellt exemplarisch die Kanalisierung des Windes bei südöstlicher Anströmung dar. Die Messpunkte A und B zeigen nahezu ungestörte Strömungsverhältnisse vor dem Gebäude. Ab Messpunkt C wird der Wind zunehmend in Richtung der Straßenschlucht abgelenkt. Das führt zu einer Drehung der Windrichtung um bis zu 60 Grad. Dieses in der Natur beobachtete Verhalten wird qualitativ sehr gut von den numerischen und idealisierten PALM-4U Simulationen sowie den idealisierten Experimenten im Windkanal wiedergegeben. Zu beachten ist, dass nur durch die lange Messzeit von knapp 90 Tagen ausreichend Messstunden für einen statistischen Vergleich zwischen Beobachtungen und Simulationen vorliegen.

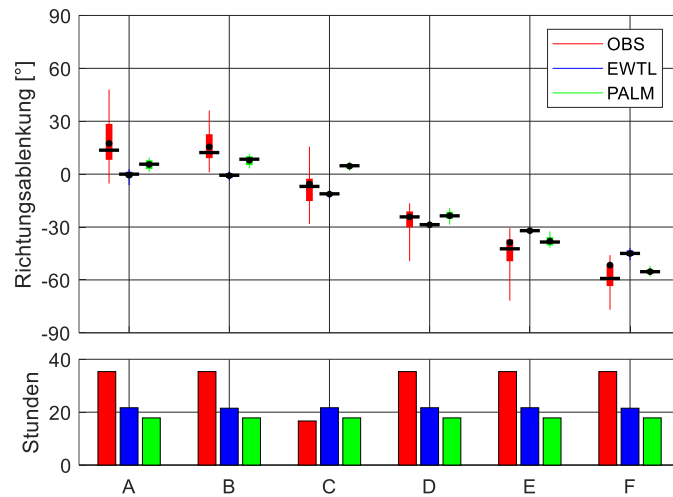


ABBILDUNG 35: Ablenkung der Windrichtung bei einer Anströmung aus Südost (130° Grundströmung) an den sechs Messpositionen des Transekts neben der HafenCity Universität. In Rot sind die Naturmessungen (OBS), in Blau die Windkanalergebnisse (EWTl) und in Grün die PALM-4U Simulationsdaten dargestellt. Das Balkendiagramm gibt den Datenumfang, der in die statistische Auswertung eingegangen ist, wieder. Quelle: Ament et al. (2020).

Stadt im Wandel

Während der Projektlaufzeit wurden im Stadtentwicklungsgebiet der HafenCity viele neue Gebäude errichtet. Dieser Wandel betraf im Untersuchungsgebiet insbesondere die Stationen A und B am östlichen Rand des Transekts (Abb. 33). In der Nähe dieser Stationen entstanden ein Hotel und Wohnbebauung. Die neuen Gebäude haben einen deutlichen Einfluss auf die Böigkeit an diesen Standorten (Abb. 36). Der Böenfaktor, definiert als das Verhältnis aus Spitzenwindgeschwindigkeit einer Böe zum mittleren Wind in einem zehnminütigen Messintervall, lag in der ersten IOP im Winter 2017 noch nahe dem in natürlicher Umgebung zu findendem Richtwert von 1,7. Mit zunehmender Bebauung stieg dieser Wert deutlich an. Die Wirbel im Nachlauf der neuen Gebäude sorgen für eine starke Erhöhung der Böigkeit. Dieses Beispiel zeigt, dass die Messdaten der IOPs in Hamburg nicht nur einen stationären Ist-Zustand beschreiben, sondern auch den Wandel der Stadt wiedergeben. Dadurch kann mit diesen Referenzdaten auch die Fähigkeit von PALM-4U, das Stadtklima mit verändernden Bebauungszuständen darzustellen, überprüft und untersucht werden.

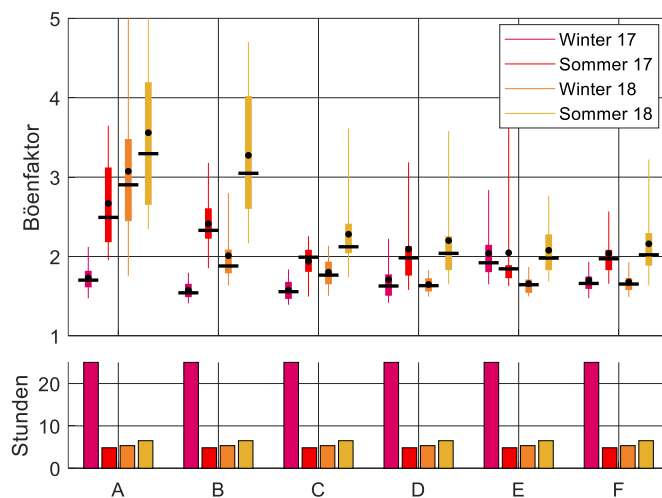


ABBILDUNG 36: Böenfaktor an den sechs Standorten A-F des Transekts vor der HafenCity Universität unterteilt nach den vier IOP. Der Böenfaktor ist definiert als das Verhältnis der Windgeschwindigkeit der stärksten Böen in einem 10 min Messintervall zur mittleren Windgeschwindigkeit. Quelle: Ament et al. (2020).

Beispiel für eine winterliche Inversion

Für die Untersuchung der winterlichen atmosphärischen Grenzschicht in größeren Höhen wurden die Fesselballonmessungen genutzt. Abb. 37 zeigt als beispielhaftes Ergebnis eine Inversion in 300 m Höhe über der Stadt. Sie entstand durch das Aufgleiten von Warmluft auf die kalte nächtliche atmosphärische Grenzschicht. Die Grenzschichtoberkante ist durch eine Temperaturzunahme von fast 10 K gekennzeichnet. Es liegt somit eine Inversion vor, die auch an den Windmessungen (Low-Level-Jet, konstante Windrichtung) deutlich zu erkennen ist. Derartige Schichtungen verhindern den Austausch und den Abtransport von Luftschadstoffen in größere Höhen sehr effektiv.

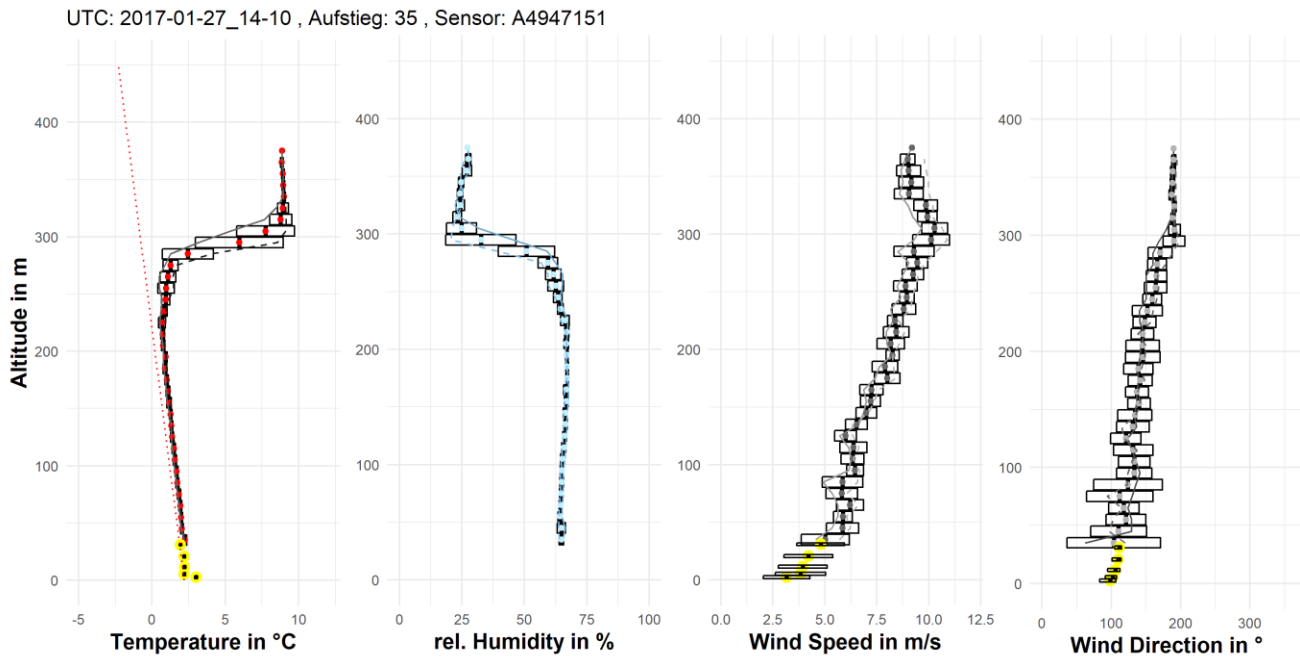


ABBILDUNG 37: Fesselballonmessungen vom Dach der HafenCity Universität, ergänzt durch die Messungen mit dem 30 m Messmast (gelbe Punkte am unteren Rand). Rel. Humidity – relative Feuchte; Wind Speed – Windgeschwindigkeit, Wind Direction – Windrichtung, Altitude – Höhe über Grund. Quelle: Queck & Goldberg (2020).

Die Konzeption der Intensivmesskampagnen ermöglichte unter Einbindung der Langzeitbeobachtungen sowie der Windkanalexperimente eine umfassende Untersuchung des bodennahen Windfeldes bis in 400 m Höhe in der Hamburger HafenCity. Lokale Windfeldveränderungen durch das Gebäude der HafenCity Universität konnten ebenso erfasst werden wie eine zunehmende Böigkeit durch die weitere Bebauung der HafenCity. Es wurde gezeigt, dass sowohl PALM-4U Simulationen als auch Windkanalexperimente die lokalen Veränderungen des Windfeldes im Vergleich zu den Beobachtungen sehr gut wiedergegeben. Messdaten, die im Zuge der sich wandelnden Bebauung erhoben wurden, dienen als Referenzdaten zur Überprüfung, inwiefern PALM-4U den Einfluss auf das Windfeld durch die sich ändernde Bebauung darstellen kann.

Stuttgart – die Stadt mit den größten Luftgüteproblemen

Die Stadt Stuttgart (210 km², 633'000 Einwohner in 2018) ist eine der deutschen Städte mit den größten Luftqualitätsproblemen, wesentlich durch die Kessellage verursacht. Topographisch bedingte Prozesse wie z.B. Kaltluftströme im Berg-Tal-Windsystem können jedoch auch das Stadtklima und die Luftqualität ganzjährig positiv beeinflussen und die Auswirkungen der städtischen Hitzeinsel während Sommernächten mildern. Demnach ist die Datenerhebung topographisch bedingter Luftströmungen und ihre Veränderungen durch das städtische Gefüge eines der Hauptziele der Partner in Stuttgart. Insbesondere die Rolle der atmosphärischen Strömungen für die Ausbreitung von Luftschadstoffen ist von größter Bedeutung. Atmosphärische Daten von LTOs sind in Stuttgart aus verschiedenen Quellen verfügbar (Abb. 38). Die längste Zeitreihe wird seit dem späten 19. Jahrhundert (1878) von der Universität Hohenheim gemessen. Im Rahmen des Verbundvorhabens wurden zusätzliche LTO-Standorte in Betrieb genommen, um Datenlücken zu schließen.

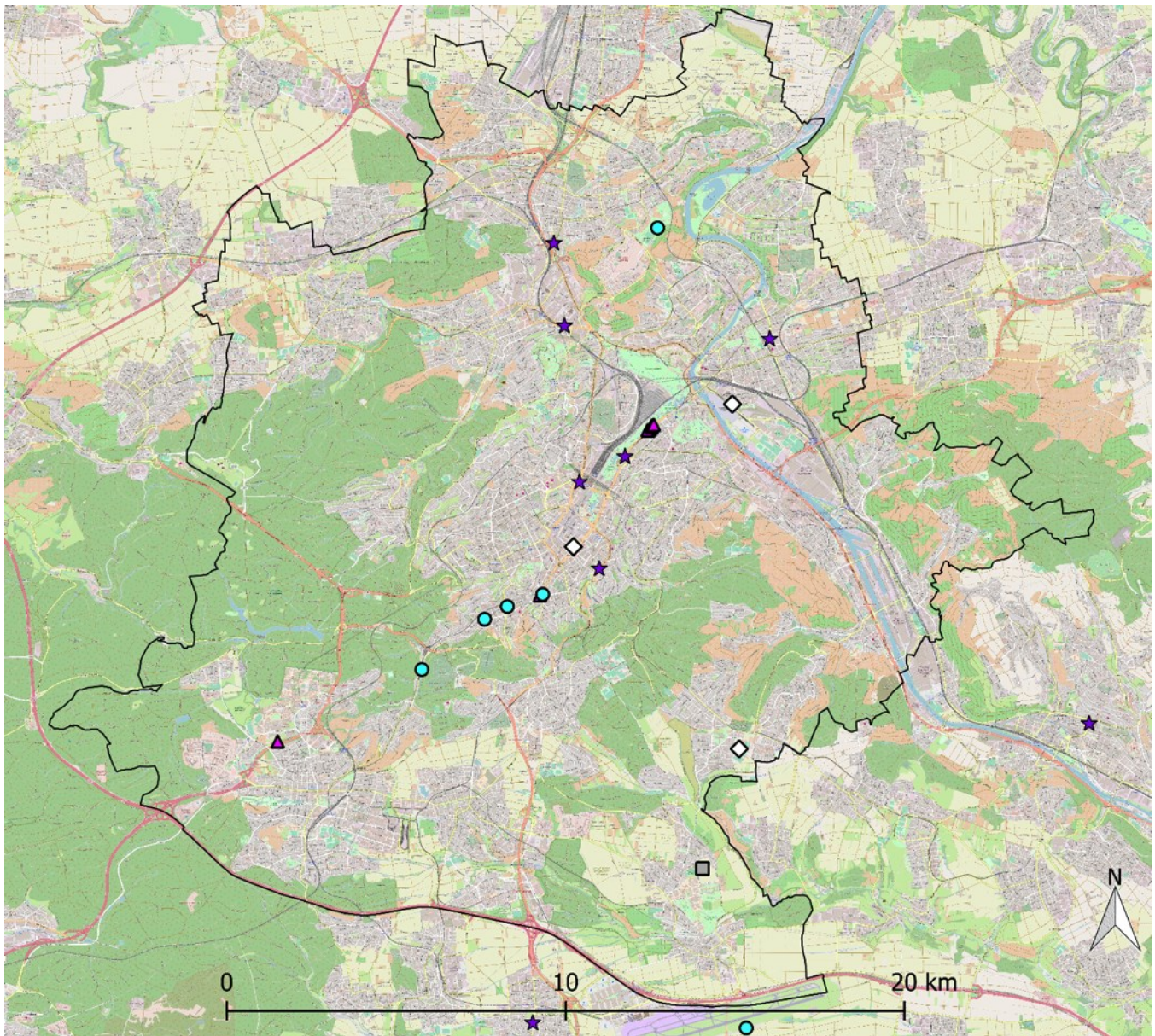


ABBILDUNG 38: LTO Standorte in Stuttgart. Die LTO-Daten werden durch folgende Institutionen erhoben: Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (lila Stern), Amt für Umweltschutz Stuttgart (weiße Raute), Deutscher Wetterdienst (türkiser Kreis), Universität Hohenheim (graues Rechteck), Universität Stuttgart, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (pinkes Dreieck). Die schwarze Linie markiert die Stadtgrenze. Kartengrundlage: Openstreetmap – veröffentlicht unter OdbL 1.0. Quelle: Scherer et al. (2019a).

Während der IOPs führten die 3DO-Partner zahlreiche Messungen von meteorologischen Größen und Luftschadstoffen an verschiedenen Standorten durch. Auch in Stuttgart konzentrierten sich die IOP-Messungen auf die IOL (Abb. 39). Für einen Überblick der LTO- und IOP-Messungen in Stuttgart siehe auch Scherer et al. (2019a).

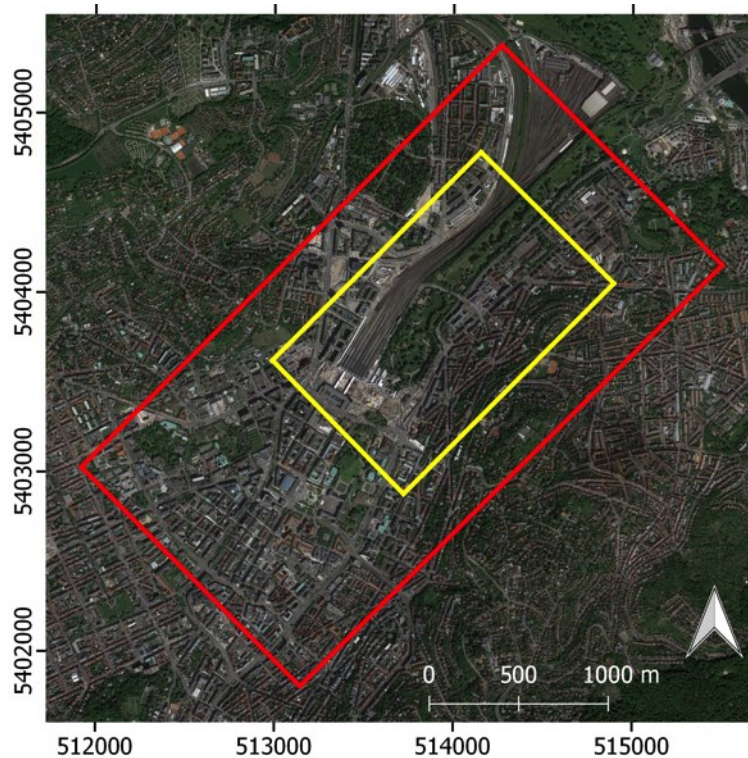


ABBILDUNG 39: IOL in Stuttgart. Rotes Rechteck: Ausschnitt für Windkanalmodell (Maßstab 1:500; Ausmaß 875 m), Gelbes Rechteck: Ausschnitt für die Analyse (Ausmaß 675 m). Bild in WGS84/Pseudo-Mercator Projektion. Koordinaten in UTM32. Kartengrundlage: © 2017 GeoBasis-DE/BKG (© 2009), Google. Quelle: Scherer et al. (2019a).

Die Topographie Stuttgarts ist sehr komplex, da die Stadt an drei Seiten von Hügeln umgeben ist. In Abb. 40 ist die komplexe Stuttgarter Topographie sowie der Messstandort am zentral gelegenen Marienplatz zu sehen. Die Lage des Messwagens am Marienplatz ist ideal, um die thermischen Windsysteme zu analysieren, da die Kaltluftflüsse an dieser Stelle in das Stadtzentrum hineinströmen bzw. umgekehrt gerichtete Strömungen vom Stadtzentrum in das Nesenbachtal analysiert werden können. Dieser Standort wurde daher für die stationären Messungen mit dem Messwagen von TP8 (Uni Stuttgart – IFK) gewählt. Der Messwagen misst dort kontinuierlich seit Februar 2017. Die gemessenen Luftschadstoffe sind Stickstoffoxide, Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid, Ozon, schwarzer Kohlenstoff, Kohlenstoffmonoxid und Feinstaub. Es werden auch meteorologische Größen wie Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Niederschlag und Globalstrahlung gemessen (siehe auch Scherer et al., 2019a).

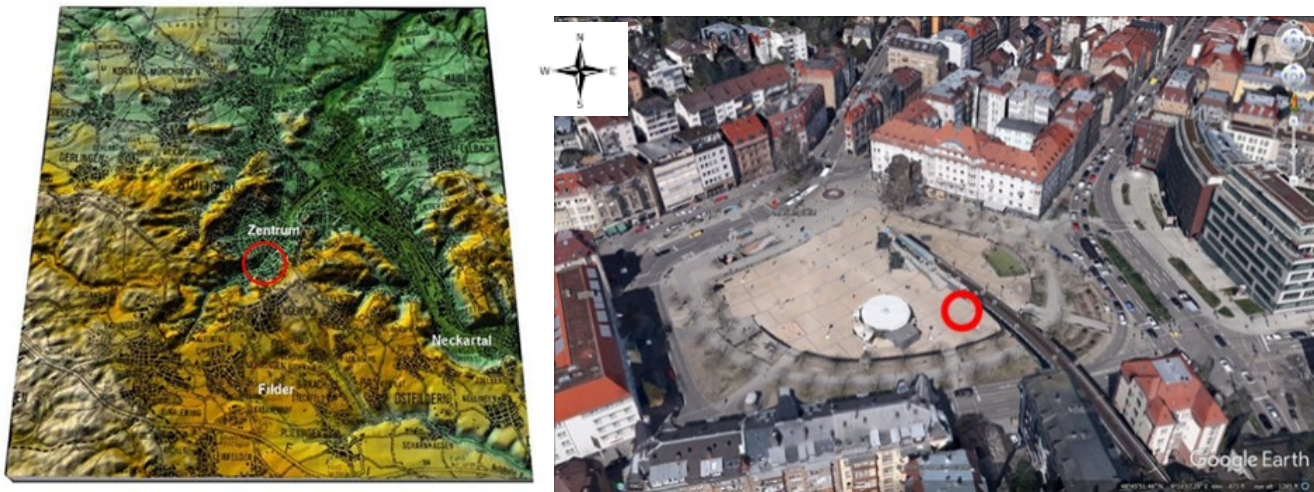


ABBILDUNG 40: Stuttgart und umliegende Gemeinden (links). Luftbild des zentral gelegenen Marienplatzes inklusive Standort (roter Kreis) des Messwagens von TP8. Quelle: Baumüller et al. (1988) (links); Vogt & Samad 2020 (rechts).

Nächtliche Temperaturinversionen und die Kühlwirkung des Nesenbachtalwindes in Stuttgart

Der Einfluss der Windrichtung auf die Schadstoffkonzentrationen wurde anhand von Windrosen und Schadstoffrosen untersucht. Eine Temperaturrose ist sehr hilfreich, um den Tag-Nacht-Effekt der Stadt zu verstehen. Ein wochenweiser Vergleich von Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid und Ozon wurde durchgeführt und ihre tageszeitlichen Trends für Wochentage und das Wochenende getrennt betrachtet. Es wurde schwarzer Kohlenstoff einerseits aus dem Verkehr und andererseits aus Biomassenverbrennung unterschieden und eine Korrelation mit Kohlenstoffmonoxid hergestellt. Einer der wichtigsten Schadstoffe in Stuttgart ist Feinstaub (PM) zusammen mit Stickstoffdioxid. Werden aufgrund einer längeren austauscharmen Wetterlage hohe Feinstaubkonzentrationen erwartet, dann wird von Mitte Oktober bis Mitte April Feinstaubalarm ausgelöst. Bei Feinstaubalarm dürfen holzbefeuerte Einzelöfen, sogenannte Komfortöfen, nicht betrieben werden. Zudem wird an die Bevölkerung appelliert, Fahrgemeinschaften zu bilden, das Auto stehen zu lassen und den öffentlichen Nahverkehr zu nutzen. Die verschiedenen Feinstaubpartikelgrößen PM_{2.5} und PM₁ werden zusammen mit PM₁₀ gemessen. Beispielergebnisse, die am Messwagen gemessen wurden, sind in den Abb. 41 bis 45 zu sehen.

Der Messwagen am Marienplatz ist mit verschiedenen meteorologischen Messgeräten ausgerüstet. In Abb. 41 sind die gemessenen Winddaten in Form einer Windrose für den gesamten Zeitraum von März 2017 bis Dezember 2019, unterteilt in verschiedene Windgeschwindigkeitsklassen von 0-4 m/s dargestellt. Es zeigt sich, dass die Hauptwindrichtung am Marienplatz durch Winde aus drei Sektoren zwischen Südsüdwest bis West an ca. 75 % des Messzeitraums bestimmt ist. Die restlichen Winde stammen aus allen weiteren Sektoren mit relativ geringen Anteilen.

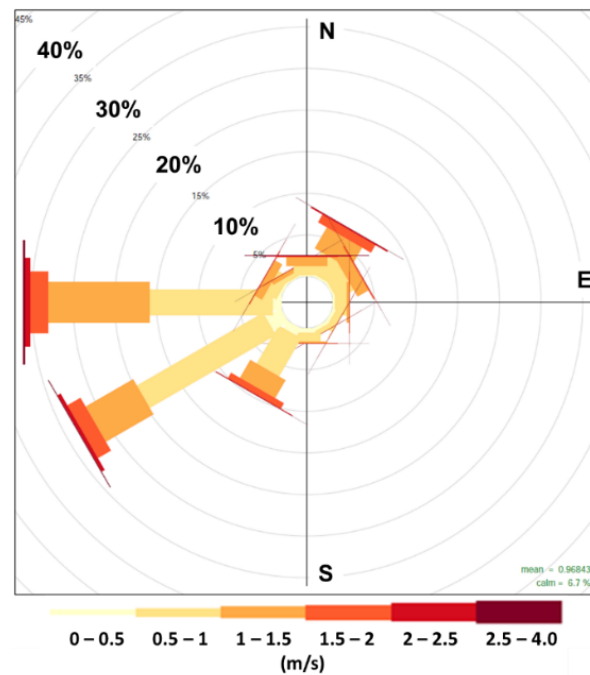


ABBILDUNG 41: Mittlere Windrose von März 2017 bis Dezember 2019 für den Standort Marienplatz. Quelle: Vogt & Samad (2020).

Eine Temperaturrose gibt die Temperatur von Luftmassen aus unterschiedlichen Anströmrichtungen an. Auf diese Weise kann festgestellt werden, dass Luftströmungen aus einer bestimmten Richtung kühler oder wärmer sind als Luftströmungen aus anderen Richtungen. Abb. 42 (a) zeigt die Temperaturrose für den gesamten Messzeitraum, in dem z.B. eine durchschnittliche Lufttemperatur von 18 °C aus Nord-Nordwesten und von 11 °C aus Südwesten gemessen wurde. Die Kaltluft wird auf den höher gelegenen Ebenen um den Stuttgarter Talkessel bei entsprechenden Wetterlagen gebildet. Sie besitzt eine höhere Dichte und strebt daher dem topografisch niedrigsten Punkt entgegen. Sie strömt über die Hänge und Täler in den Stuttgarter Talkessel. An der Messstation am Marienplatz konnten die Kaltluftflüsse anhand der Temperaturmessungen nachgewiesen werden. Die Ergebnisse der Temperaturrosen zeigen, dass Luftmassen, wenn sie von außerhalb der bebauten Gebiete über die Hänge kommen, im Vergleich zu Luftmassen, die aus der Stadt kommen, deutlich kühler sind.

Anhand von Schadstoffrosen ist es möglich, die Richtung zu identifizieren, aus der verschmutzte Luft kommt. Sie eignen sich also für die Lokalisation von Schadstoffquellen und z.B. dafür, die Auswirkungen des Verkehrs auf die Schadstoffkonzentrationen sichtbar zu machen. In der Schadstoffrose werden Schadstoffe als Funktion der Windrichtung für Windgeschwindigkeiten von mehr als 0.5 m/s dargestellt. Der direkt aus den Fahrzeugen austretende Schadstoff, der auch einen eindeutigen Hinweis auf die Fahrzeugemissionen gibt, ist Stickstoffmonoxid. Die Zunahme der Verschmutzung mit Stickstoffmonoxid ist beispielhaft in Abb. 42 (b) dargestellt. Es ist zu beobachten, dass die an der Messstation gemessene Stickstoffmonoxid-Konzentration bei Wind aus Nordosten, Osten und Südosten immer um einen Faktor von 1.5 bis 2 höher war im Vergleich zu Situationen mit Wind aus Südwest, West und Nordwest. Bei Nordostwind wurde eine Stickstoffmonoxid-Konzentration von ca. 15 µg/m³ und bei Südwestwind eine Stickstoffmonoxid-Konzentration von ca. 10 µg/m³ gemessen. Stickstoffmonoxid-Konzentrationen von etwa 20 µg/m³ traten bei Wind aus östlicher Richtung auf, während nur ungefähr die Hälfte dieser Konzentration bei Wind aus westlicher Richtung gemessen wurde. Die erhöhten Konzentrationen aus den entsprechenden Windsektoren können als direkter Beitrag des lokalen Straßenverkehrs angesehen werden. Die anderen Schadstoffe verhalten sich ähnlich, jedoch sind die Konzentrationsunterschiede bei entgegengesetzten Windrichtungen (Wind aus der Stadt versus Wind aus dem Kaltental) nicht so hoch wie bei Stickstoffmonoxid.

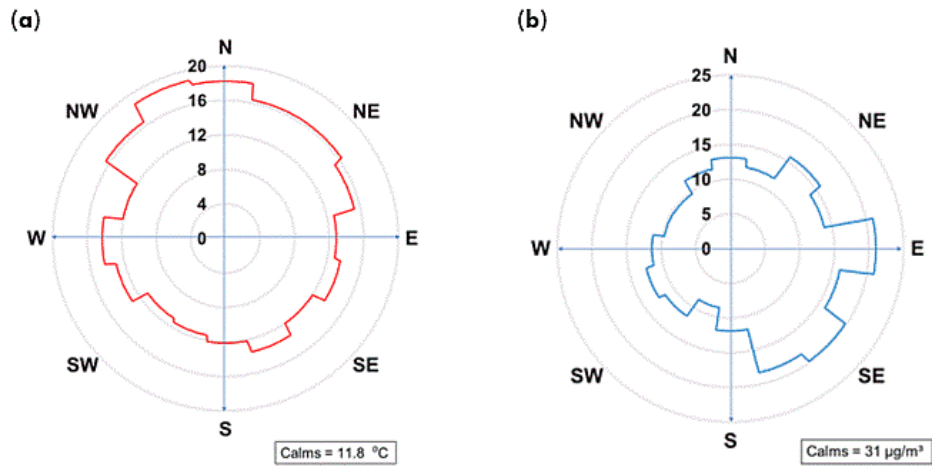


ABBILDUNG 42: Temperaturrose (a) und Stickstoffmonoxid-Schadstoffrose (b) von März 2017 bis Dezember 2019 für den Standort Marienplatz. Quelle: Vogt & Samad (2020).

Schadstoffkonzentrationen und Verkehrsintensität sind eng miteinander verbunden, daher wurde eine vergleichende Auswertung in Bezug auf die Verkehrsintensität und die Schadstoffkonzentrationen durchgeführt. Die Verkehrsdaten wurden von den zuständigen Behörden eingeholt und mit den gemessenen Schadstoffkonzentrationen in Beziehung gesetzt, um eventuell vorhandene Korrelationen zu untersuchen. Die durchschnittliche Anzahl der Fahrzeuge, die zwischen März 2017 und Dezember 2019 den Marienplatz passierten, ist in Abb. 43 dargestellt. Bei dieser Bewertung wurden sowohl die Bundesstraße B14 als auch die den Marienplatz tangierende Hauptverkehrsstraße Filderstraße berücksichtigt. Die durchgezogene Linie repräsentiert den Median (Zentralwert), der dunklere Farbton repräsentiert das 25. und 75. Quantil (Schwellenwert) und der hellere Farbton repräsentiert das 5. und 95. Quantil.

Wie erwartet passierten an den Wochentagen mehr Fahrzeuge die Messstation als an den Wochenenden (Samstag und Sonntag). An den Wochentagen machte sich morgens zwischen 07:00 und 09:00 Uhr der Verkehr zur Hauptverkehrszeit bemerkbar und abends zwischen 16:00 und 19:00 Uhr. Die durchschnittliche Anzahl der Fahrzeuge pro Stunde während der Hauptverkehrszeiten lag an den Wochentagen bei 3.500 bis 4.000. Aus der täglichen Verteilung geht hervor, dass die durchschnittliche Anzahl der Fahrzeuge an den Wochentagen bei 3.000 und an den Wochenenden bei 2.000 lag. Dies zeigt einen um fast 33 % geringeren Verkehr am Wochenende im Vergleich zu den Wochentagen.

Die Geschwindigkeit von Fahrzeugen ist ebenfalls ein sehr wichtiges Kriterium, da sie in direktem Zusammenhang mit den Emissionen der Fahrzeuge steht. In den Hauptverkehrszeiten war es meistens Stop-and-Go-Verkehr und die Fahrzeuggeschwindigkeit war im Vergleich zu den anderen Verkehrszeiten niedriger. Dies ist in Abb. 44 zu sehen, in der die Fahrzeuggeschwindigkeit in km/h für denselben Zeitraum aufgetragen ist.

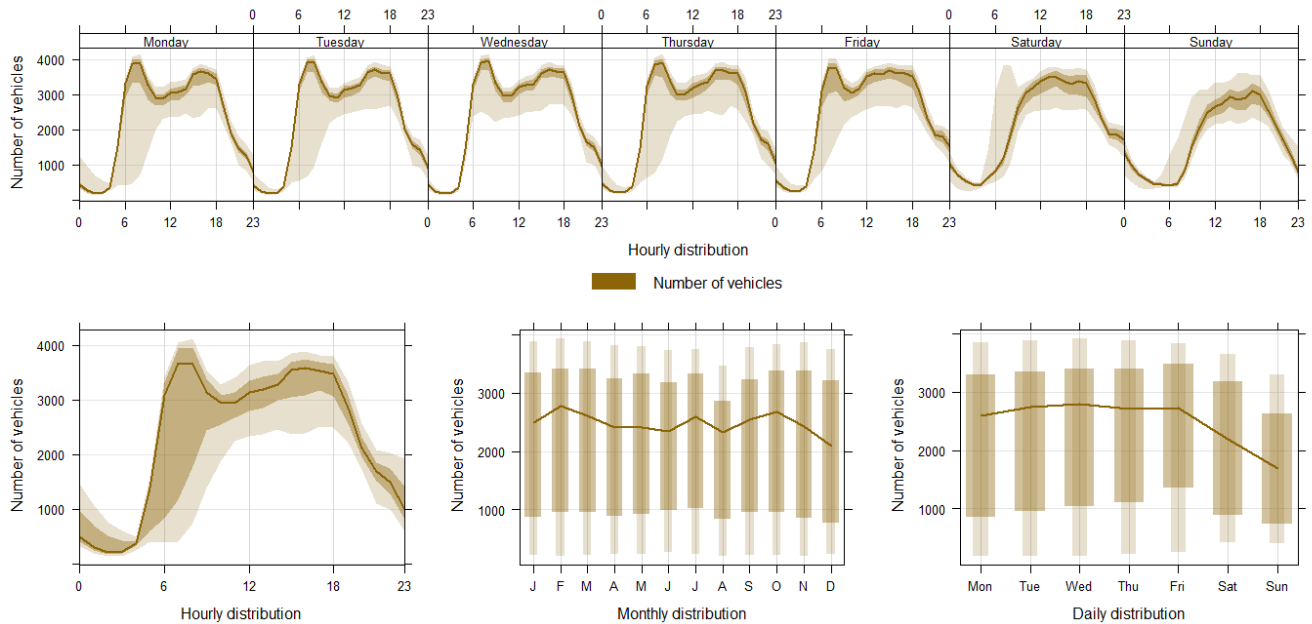


ABBILDUNG 43: Tagesgang, Wochengang und Jahresgang der Anzahl der Fahrzeuge, die von März 2017 bis Dezember 2019 an der Messstation Marienplatz vorbeifahren. Quelle: Vogt & Samad (2020).

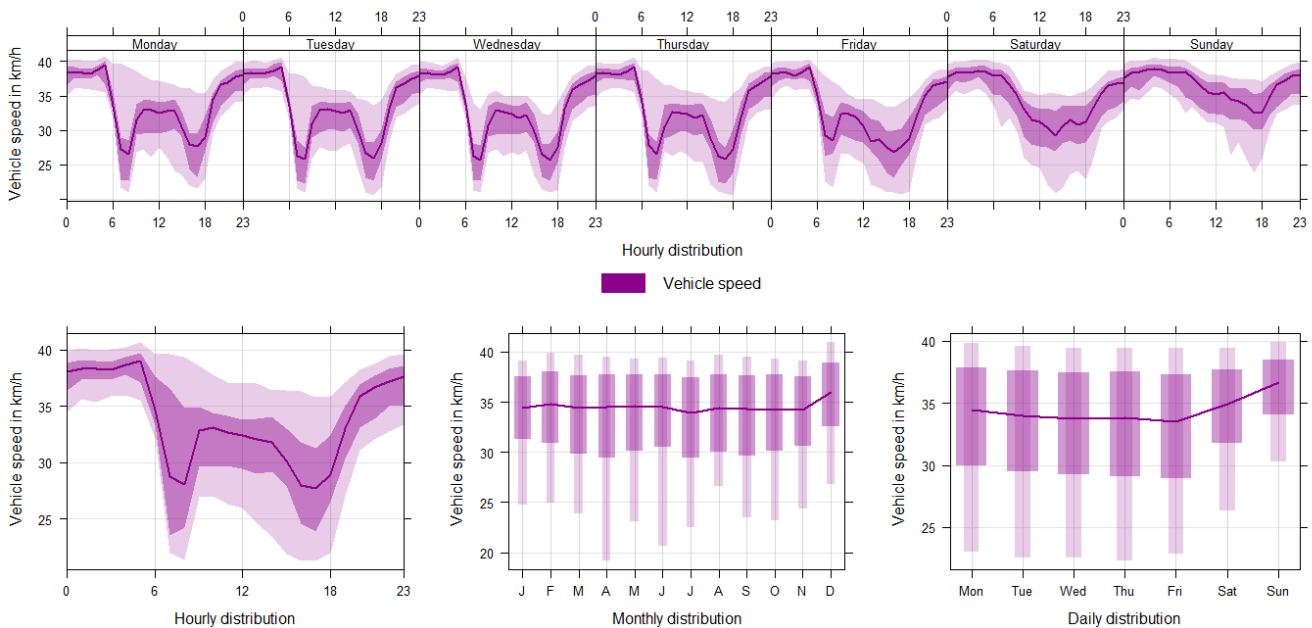


ABBILDUNG 44: Tagesgang, Wochengang und Jahresgang der Geschwindigkeit der Fahrzeuge, die von März 2017 bis Dezember 2019 an der Messstation am Marienplatz vorbeifahren. Quelle: Vogt & Samad (2020).

In Abb. 45 ist der mittlere Tagesgang, Wochengang und Jahresgang von Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid und Ozon für die Periode zwischen März 2017 und Dezember 2019 dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass die Stickstoffmonoxid- und Stickstoffdioxid-Konzentrationen an Wochentagen höher und am Wochenende niedriger sind, während es sich bei den Ozon-Konzentrationen umgekehrt verhält. Die höchsten Stickstoffmonoxid- und Stickstoffdioxid-Konzentrationen wurden Mitte der Woche und die niedrigsten sonntags gemessen. Die Ozon-Konzentration zeigt jedoch einen entgegengesetzten Verlauf. Die Gegenläufigkeit der Stickstoffdioxid- und Ozon-Konzentrationen lässt sich mit Hilfe des photostationären Gleichgewichts erklären,

wobei Stickstoffmonoxid bei Vorhandensein von Ozon zu Stickstoffdioxid reagiert. Die höchsten Ozon-Konzentrationen traten daher sonntags auf, wenn aufgrund des geringeren Verkehrs die geringsten Stickstoffmonoxid-Konzentrationen der gesamten Woche vorhanden waren. Die gegenseitige Abhängigkeit der Stickstoffmonoxid- und Ozon-Konzentrationen einerseits und der Stickstoffdioxid-Konzentrationen andererseits ist auch im Tagesgang deutlich zu erkennen. In den Nachtstunden, wenn keine Sonneneinstrahlung vorhanden ist, dominiert der Ozon-Abbau durch ständigen Nachschub von Stickstoffmonoxid aus Verbrennungsprozessen. Das Ozon-Minimum wurde in den frühen Morgenstunden während des Berufsverkehrs zwischen 06:00 und 09:00 Uhr erreicht. Die Neubildung von Ozon kann nur tagsüber bei Vorhandensein von Sonneneinstrahlung erfolgen. Somit wird das Maximum der Ozon-Neubildung im Sommer an sonnigen Tagen in den Mittagstunden erreicht.

Sowohl bei Stickstoffdioxid als auch bei Stickstoffmonoxid sind erhöhte Konzentrationen während der morgendlichen und abendlichen Spitzen im Berufsverkehr deutlich erkennbar, wobei das abendliche Maximum für Stickstoffdioxid deutlicher ausgeprägt ist als für Stickstoffmonoxid. Ein Grund hierfür könnten abendliche bzw. nächtliche, wenig vorbelastete Kaltluftflüsse aus Richtung Kaltental zum Marienplatz sein, die geringere abendliche bzw. nächtliche Stickstoffmonoxid-Konzentrationen am Messstandort bedingen.

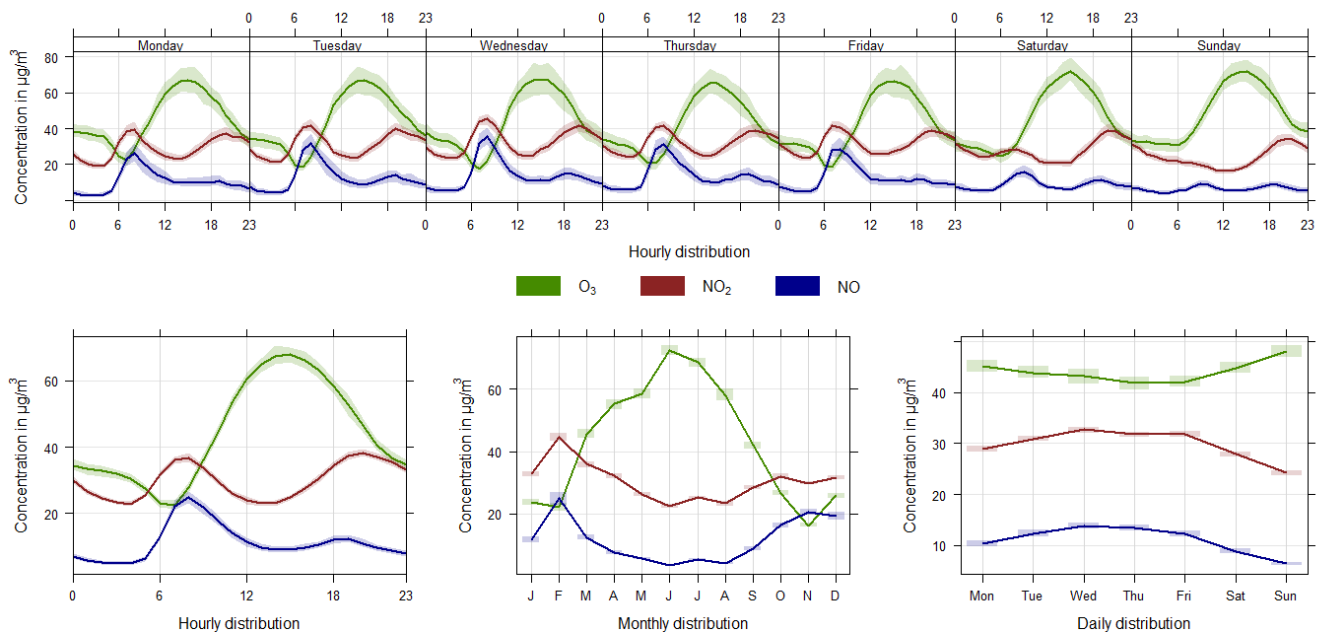


ABBILDUNG 45: Mittlerer Tagesgang, Wochengang und Jahresgang als Stundenmittelwert für die Stickstoffmonoxid- (NO), Stickstoffdioxid- (NO₂) und Ozon (O₃)-Konzentrationen für die Periode zwischen März 2017 und Dezember 2019. Quelle: Vogt & Samad (2020).

Als Zwischenfazit lässt sich festhalten, dass am Marienplatz mit Hauptwindrichtung Südwest durch den Verkehr verursacht, erhöhte Schadstoffkonzentrationen bei Wind aus Nordost und Südost auftreten. Die Lufttemperatur war am höchsten bei Wind aus Nordwesten. Ein wochenweiser Vergleich zeigte, dass die höchsten Stickstoffmonoxid- und Stickstoffdioxid-Konzentrationen wochentags im Vergleich zu den Wochenenden beobachtet werden können.

Durch zusätzliche Radiosondenaufstiege des DWD (TP11) am Erwin-Schöttle-Platz wurde die nächtliche Ausbildung und morgendliche Auflösung einer vielschichtigen Temperaturinversion im Stuttgarter Stadtkessel erfasst. Abb. 46 zeigt für eine Hochdruckwetterlage mit südlicher Anströmung am 14.-15.08.2017 eine in der zweiten Nachthälfte bis ca. 700 m ü. NN reichende Kaltluftschicht. In ca. 300 m ü. NN ist während der nächtlichen Sondierungen die Temperaturzunahme mit der Höhe besonders stark und wirkt als Barriere gegen die vertikale

Durchmischung von Emissionen im Stadtkessel. Vom Boden bis zur Temperaturinversion zeigen die nächtlichen Radiosondierung eine etwa 50 m mächtige, gut durchmischte Schicht, deren Ausbildung durch die nächtliche Abgabe von tagsüber in Gebäuden gespeicherter Wärme und durch Turbulenz aufgrund nächtlicher Kaltluftabflüsse erklärt werden kann.

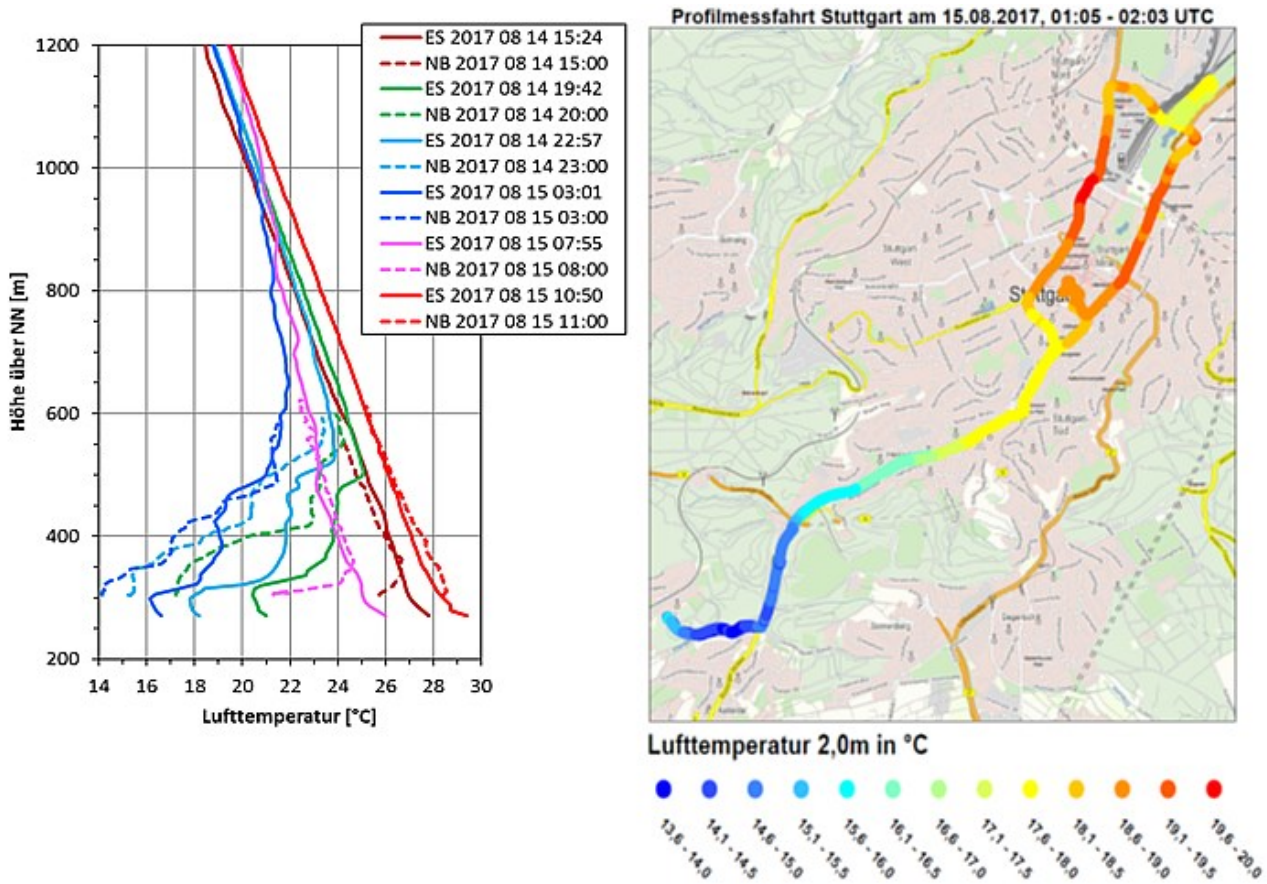


ABBILDUNG 46: Links: Vertikalprofile der Lufttemperatur aus Radiosondenaufstiegen des DWD am Erwin-Schöttle-Platz (ES) und Multikopteraufstiegen der LUH im Nesenbachtal (NB; Stadtteil Kaltental) am 14.-15.08.2017. Rechts: Nächtliche Profilmessfahrt entlang des Nesenbachtals vom Stadtteil Kaltental bis zum Unteren Schloßgarten am 15.08.2017. Quelle: Hodan et al. (2020).

Mittels Messfahrten (Abb. 46, rechts) und Stationsmessungen (Abb. 47) konnte für diese Nacht eine bodennahe städtische Wärmeinselintensität zwischen 4 und 6 K dokumentiert werden. Durch die von der Universität Hannover mit einem Multikopter annähernd zeitgleich zur Radiosondierung des DWD außerhalb des Stadtkessels im Nesenbachtal an der Station Böblinger Str. (Stadtteil Kaltental) durchgeführten Vertikalprofilmessungen der Lufttemperatur, wurde erstmals auch die vertikale Ausdehnung der Wärmeinsel im Stadtkessel erfasst (Abb. 46, links). Die höhenabhängigen Temperaturunterschiede zwischen dem Stadtkessel und Stadtteil Kaltental sind ein Maß für die Antriebskräfte des nachts regelmäßig auftretenden, und für die Belüftung des Stadtkessels immens wichtigen Nesenbachtalwindes.

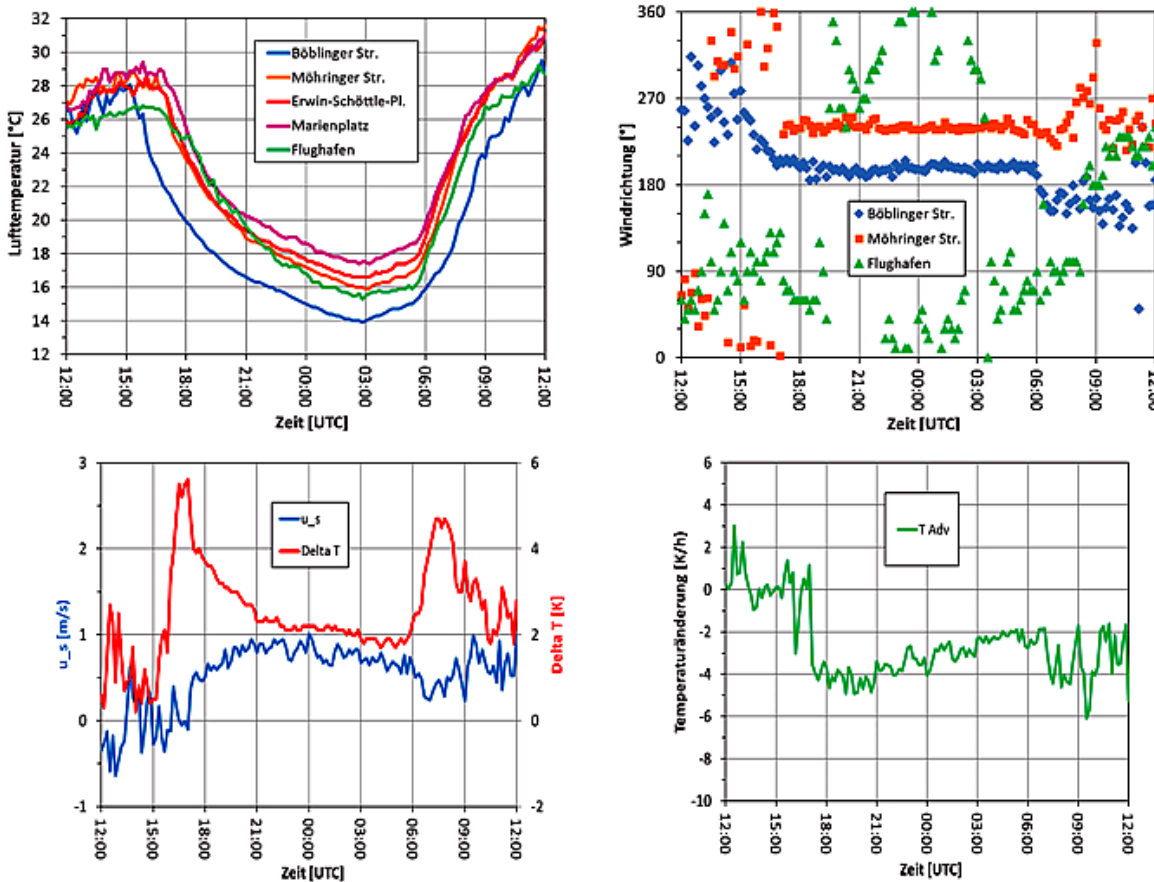


ABBILDUNG 47: Tagesgänge der DWD Stationsmessungen am 14.-15.08.2017. oben links: Lufttemperatur an Stationen entlang des Nesenbachtals und am Flughafen, oben rechts: Windrichtung im Nesenbachtal (Böblinger Str., Möhringer Str.) und am Flughafen, unten links: talparallele Windkomponente u_s und Lufttemperaturdifferenz ΔT zwischen Böblinger Str. und Möhringer Str., unten rechts: Temperaturänderung durch talparallele Advektion zwischen Böblinger Str. und Möhringer Str. Quelle: Hodan et al. (2020).

Anhand der Stationsmessung im Nesenbachtal außerhalb des Stadtkessels im Kaltental (Böblinger Str.) und im zwischen Kaltental und Stadtkessel gelegenen Stadtteil Heslach (Möhringer Str.) wurde die bodennahe Kühlwirkung des aus südwestlichen Richtungen wehenden Nesenbachtalwindes abgeschätzt.

Abb. 47 (unten links) zeigt, dass die Temperaturdifferenz ΔT zwischen den beiden Stationen nachts meist um 2 K betrug, bei Sonnenaufgang und -untergang mit etwa 5 K jedoch deutlich höher war. Die zwischen beiden Stationen gemittelte Windkomponente in Tallängsrichtung (u_s) belegt eine nachts in die Stadt gerichtete Strömung zwischen 0.5 und 1.0 m/s. Durch Advektion von kühlerer Luft aus dem Nesenbachtal (Abb. 47 unten rechts) ergibt sich für die Stadt zu Beginn der Nacht eine bodennahe Kühlwirkung des Nesenbachtalwindes von ca. 4 K/h, die im Verlauf der Nacht auf ca. 2 K/h zurückgeht. Diese stadtplanerisch bedeutsame Größenordnung der Kühlwirkung des Nesenbachtalwindes für den Stuttgarter Stadtkessel wurde durch Auswertung von Intensivmessungen während weiterer sommerlicher Strahlungsnächte bestätigt und zeigt keine signifikante Abhängigkeit von der großräumigen Anströmungsrichtung in Stuttgart.

Vertikalprofilmessungen im Kaltental westlich des Stadtzentrums

Die LUH (TP12) führte zur Winter-IOP 2017 eine 24-stündige Messkampagne im Stuttgarter Nesenbachtal durch. Während des Messzeitraumes lag eine ausgeprägte autochthone Wetterlage vor, zu erkennen am

wolkenlosen bzw. klaren Himmel, welcher von 09:00 UTC des 14.02.2017 bis 09:00 UTC des 15.02.2017 zu beobachten war. Zudem konnten bodennahe geringe Windgeschwindigkeiten um 1 m/s gemessen werden (Abb. 48), was den Schwachwindcharakter der Winter-IOPs unterstreicht.

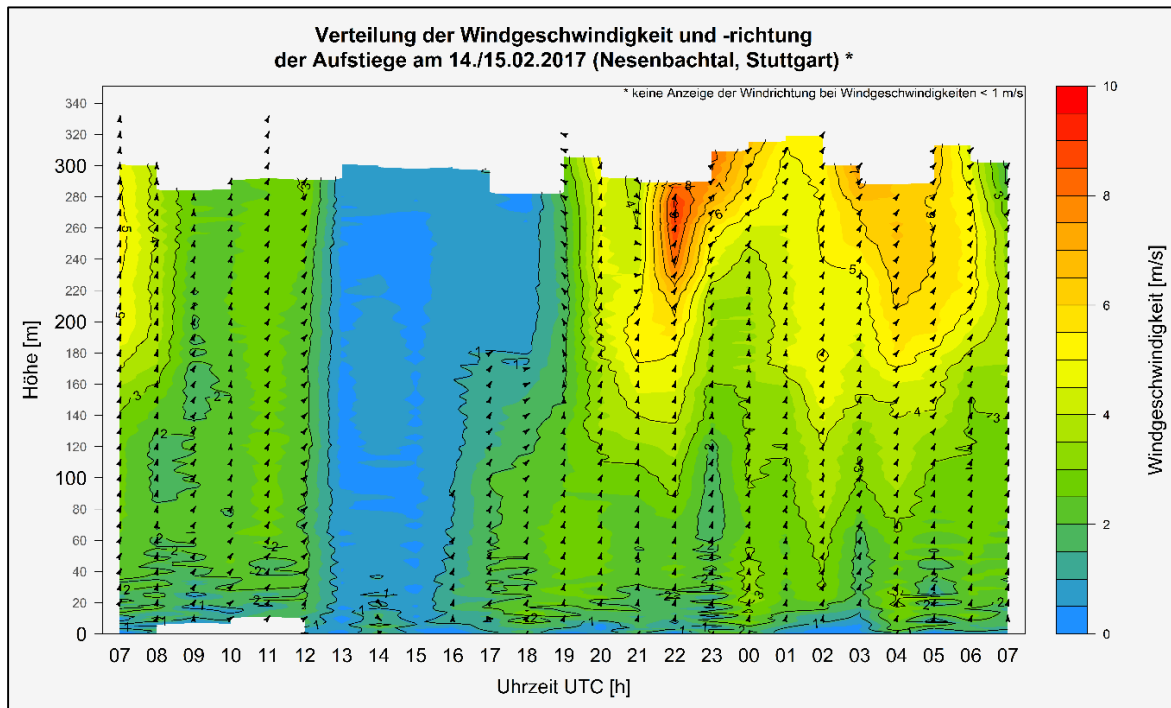


ABBILDUNG 48: Isoplethendiagramm der Stundenwerte der Horizontalwinde, gemessen vom Multikopter-Radiosonden-Messsystem am 14./15.02.2017 im Stuttgarter Nesenbachtal. Quelle: Meusel (2020).

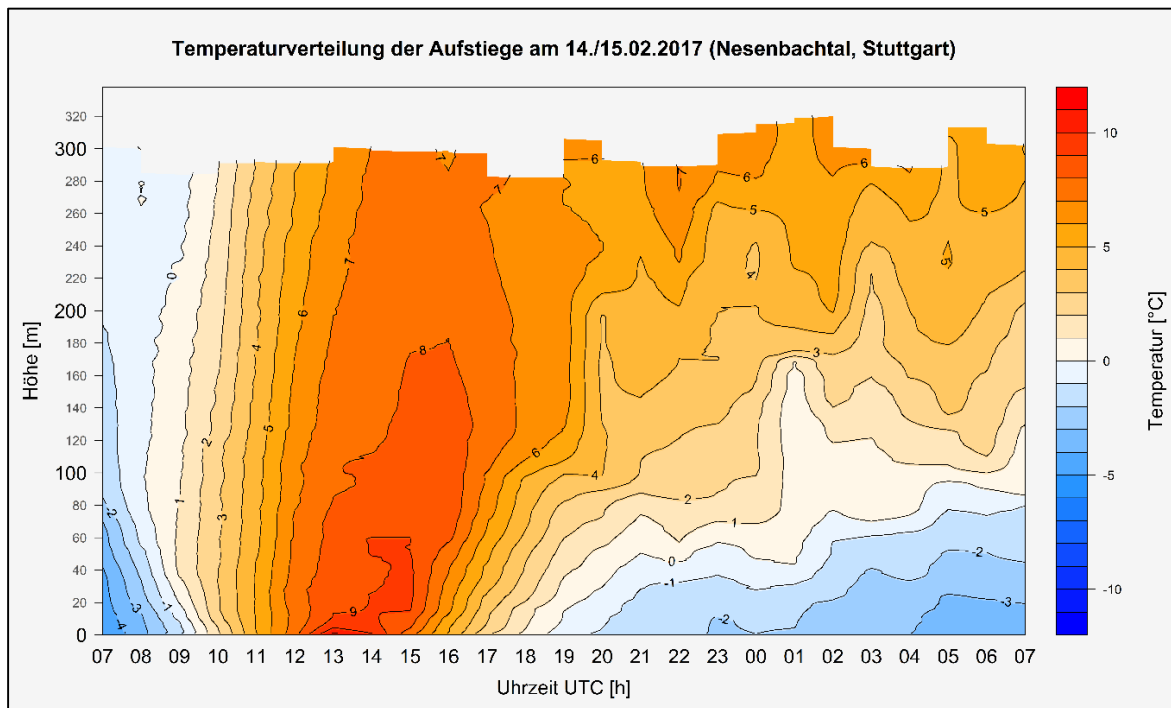


ABBILDUNG 49: Isoplethendiagramm der Stundenwerte der Lufttemperatur in °C, gemessen vom Multikopter-Radiosonden-Messsystem vom 14.-15.02.2017 (IOP1) im Stuttgarter Nesenbachtal. Quelle: Meusel (2020).

Während tagsüber allgemein geringe Windgeschwindigkeiten bis maximal 4 m/s gemessen wurden, sind nachts deutlich stärkere, und mit der Höhe zunehmende Winde bis ca. 10 m/s auf 300 m registriert worden. Zusätzlich zu den schwachen Windgeschwindigkeiten am Tage trug auch die geringe Bewölkung dazu bei, dass bodennah selbst im Winter und an diesem ruralen Standort eine verhältnismäßig starke Erwärmung stattfand. Die bodennahe Luftschicht wies im Maximum gegen 13:00 UTC eine Temperatur von 11 °C auf (Abb. 49). Nachts führten die unversiegelten Böden des Nesenbachtals sowie die mit dem klaren Himmel verbundene begünstigte langwellige Ausstrahlung zu großen Temperaturinversionen von teils 8 K von 0 m bis 300 m (Abb. 49). Die Ausbildung der Inversionsschicht beginnt bereits gegen 15:00 UTC. Die Inversion der Nacht zuvor wurde nach Sonnenaufgang allmählich abgebaut und gegen 11:00 UTC stellte sich eine neutrale Schichtung (ohne nennenswerte Abnahme der Temperatur mit der Höhe) ein. Bei der Betrachtung der relativen Luftfeuchtigkeit in Abb. 50 wird erkennbar, dass das Minimum am 14.02.2017 mit ca. 44 % in Bodennähe (~ 20 m Höhe) auftrat, was durch die erhöhte Verdunstung am Tage zu erklären ist. Bereits ab ca. 20:00 UTC ist die Luft der ersten 100 m nahezu mit Wasserdampf gesättigt, erkennbar an relativen Feuchten von knapp unter 100 %. Gegen 05:00 UTC setzt sich der Eintrag gesättigter Luft bis zum oberen Rand der Messung auf 300 m fort.

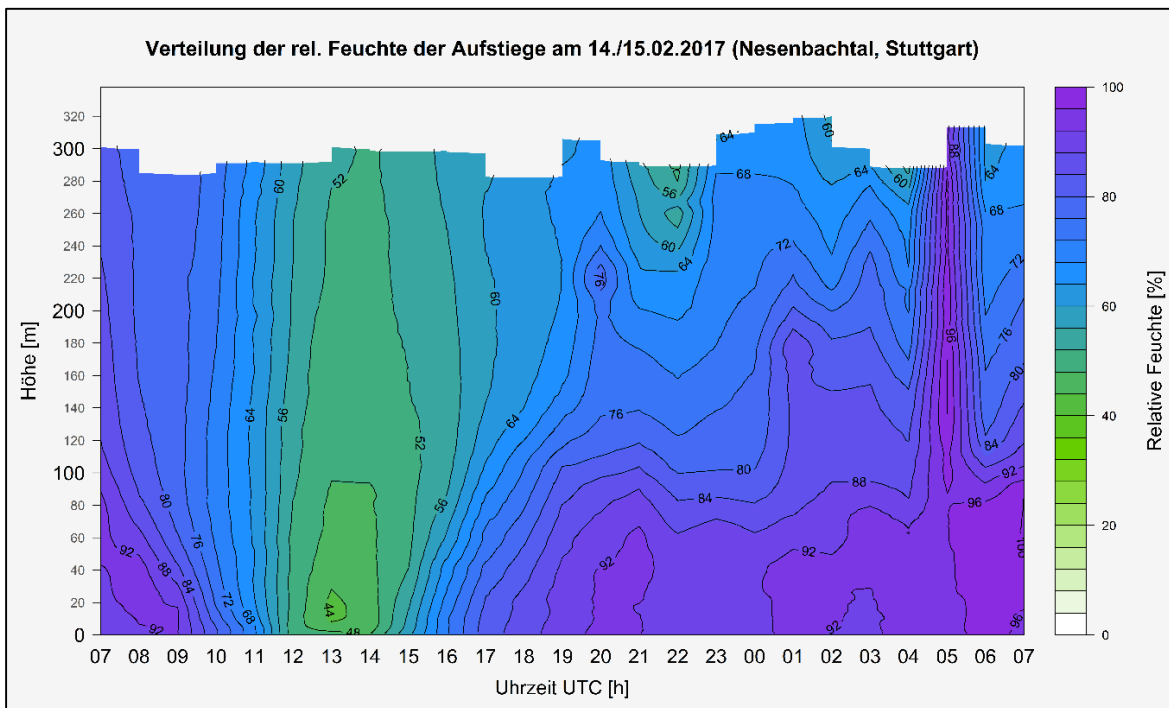


ABBILDUNG 50: Isoplethendiagramm der Stundenwerte der relativen Feuchte in %, gemessen vom Multikopter-Radiosonden-Messsystem vom 14.-15.02.2017 (IOP1) im Stuttgarter Nesenbachtal. Quelle: Meusel (2020).

Horizontalverteilung der Luftverunreinigungen im Stadtgebiet

TP8 (Uni Stuttgart – IFK) führte Fahrradmessungen durch, um die zeitliche und räumliche Verteilung der gemessenen Parameter detailliert zu erfassen. Die meteorologischen Größen, die während der Messungen ermittelt wurden, waren Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Luftdruck und Globalstrahlung. Zudem wurden die Luftverunreinigungen Ultrafeine Partikel, Feinstaub, schwarzer Kohlenstoff, Stickstoffoxiden, Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid und Ozon gemessen. Um die Daten mit Ereignissen während der Messfahrt in Verbindung zu bringen, war auch eine Videokamera im Einsatz. Die gemessenen Parameter wurden mittels GPS (Global Positioning System) dem Standort zugeordnet.

Die mit dem Messfahrrad abgefahrenen Strecken unterschieden sich von IOP zu IOP. Während IOP 1 und 2 lag der Fokus mehr im Bereich des Kaltentals und Marienplatzes. In IOP 3 und IOP 4 wurde der Schwerpunkt der Messaktivitäten in Richtung Stadtzentrum bzw. in Richtung der Öffnung des Nesenbachtals zum östlich des Stadtzentrums gelegenen Neckartals verlegt. In diesem Bereich befindet sich der Hauptbahnhof, die bekannte Luftmessstation Stuttgart „Am Neckartor“ und der Schlosspark, der sich bis zum östlich davon gelegenen Rosensteinpark erstreckt. Dieser Bereich ist geprägt durch stark befahrene Bundesstraßen, ausgedehnte Parkanlagen, aber auch durch großflächige Wohnquartiere.

In Abb. 51 ist die durchschnittliche Stickstoffmonoxid-Konzentration entlang der Messroute für 43 Runden im Zeitraum vom 18.-24.02.2018 während IOP 3 dargestellt. Die einzelnen Punkte repräsentieren Streckenabschnitte von 50 m entlang der Messroute. Für diese Streckenabschnitte wurde der Mittelwert aller vorhandenen Messwerte gebildet. Die Ergebnisse zeigen ein klares Bild der Verkehrsemissionen. Wie erwartet, wurden in den Straßenschluchten mit viel Verkehr hohe Konzentrationen für Stickstoffmonoxid gemessen. Die Stickstoffmonoxid-Konzentrationen sind auf den stark befahrenen Straßen B14 und B27 höher als die Stickstoffmonoxid-Konzentrationen auf den Nebenstraßen oder im Park. Dies zeigt deutlich die Auswirkungen des Verkehrs auf die aktuelle Luftqualitätssituation in Stuttgart. Die Konzentrationen lagen überwiegend zwischen 20 und 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

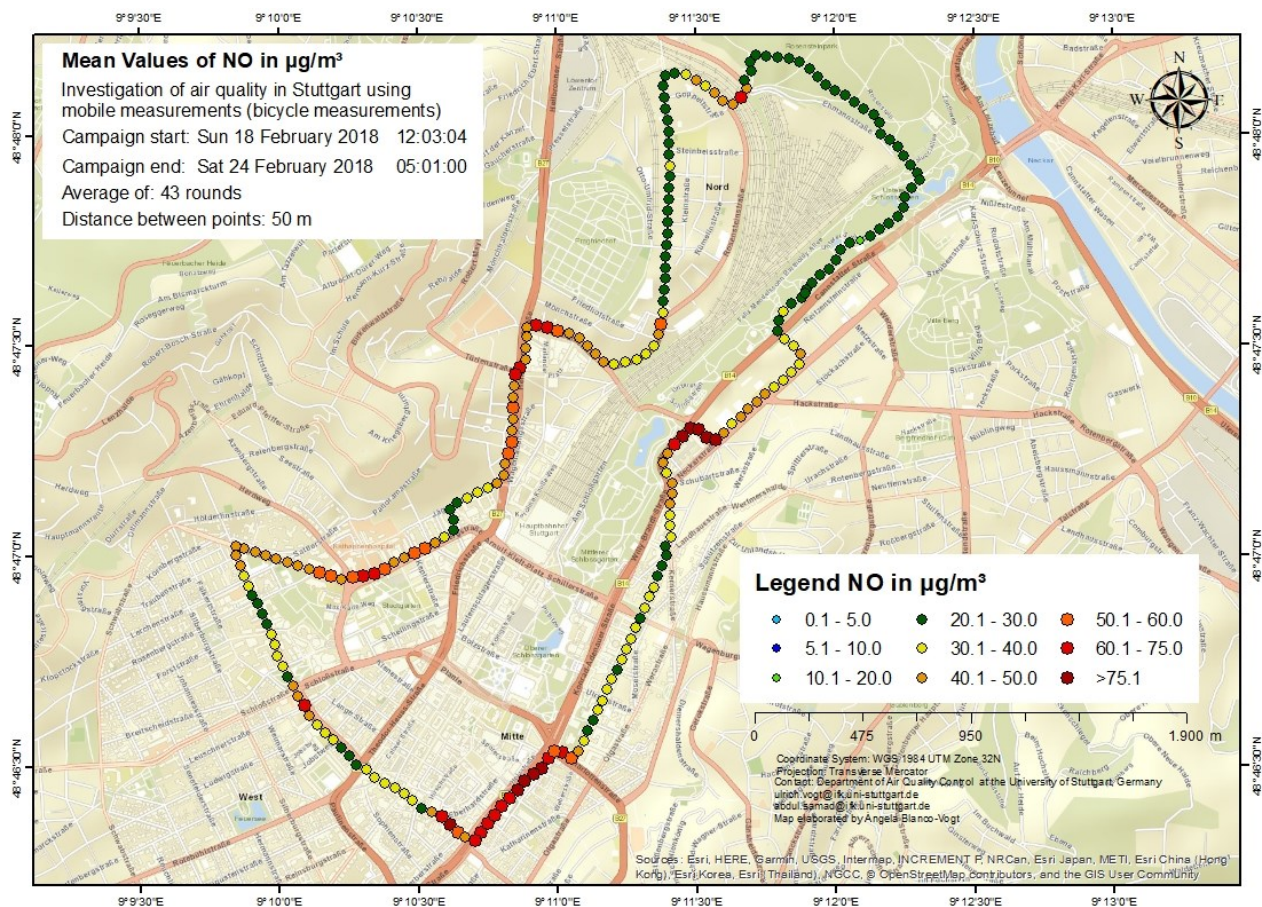


ABBILDUNG 51: Durchschnittliche räumliche Verteilung von Stickstoffmonoxid während der IOP 3 (18. – 24.02.2018). Kartengrundlage: OpenStreetMap. Quelle: Vogt & Samad (2020).

In Abb. 52 sind die Ergebnisse der Stickstoffdioxid-Passivsammlermessungen für den Zeitraum vom 21.01.-18.03.2018 dargestellt. Es wurden relativ hohe Konzentrationen für Stickstoffdioxid in den Straßenschluchten

in der Nähe des Stadtzentrums gemessen im Vergleich zu den Messwerten im Park. Dasselbe wurde für die mobilen Messungen bei den Stickstoffdioxid-Konzentrationen festgestellt. Die maximale Konzentration wurde wieder auf der vielbefahrenen Bundesstraße B 14 gemessen.

Abb. 53 zeigt die räumliche Verteilung der Stickstoffdioxid-Konzentration für die 75 Fahrradfahrten während IOP 4. Es ist zu erkennen, dass die Stickstoffdioxid-Konzentration auf den Bundesstraßen B 14 und B 27 höher als jene im Park oder auf den Nebenstraßen war. Sobald die Route in die Nähe von vielbefahrenen Hauptstraßen führte, war eine Zunahme der Stickstoffdioxid-Konzentrationen zu sehen.

Die Ergebnisse der Passivsammler (Abb. 54), welche entlang der Fahrradroute für den gesamten Zeitraum der IOP 4 ausgebracht wurden, zeigen ebenfalls, dass die Konzentrationen im Park niedriger waren als die Konzentrationen an der Straße. Die maximalen Konzentrationen konnten an der Messstation ‚Am Neckartor‘ beobachtet werden.

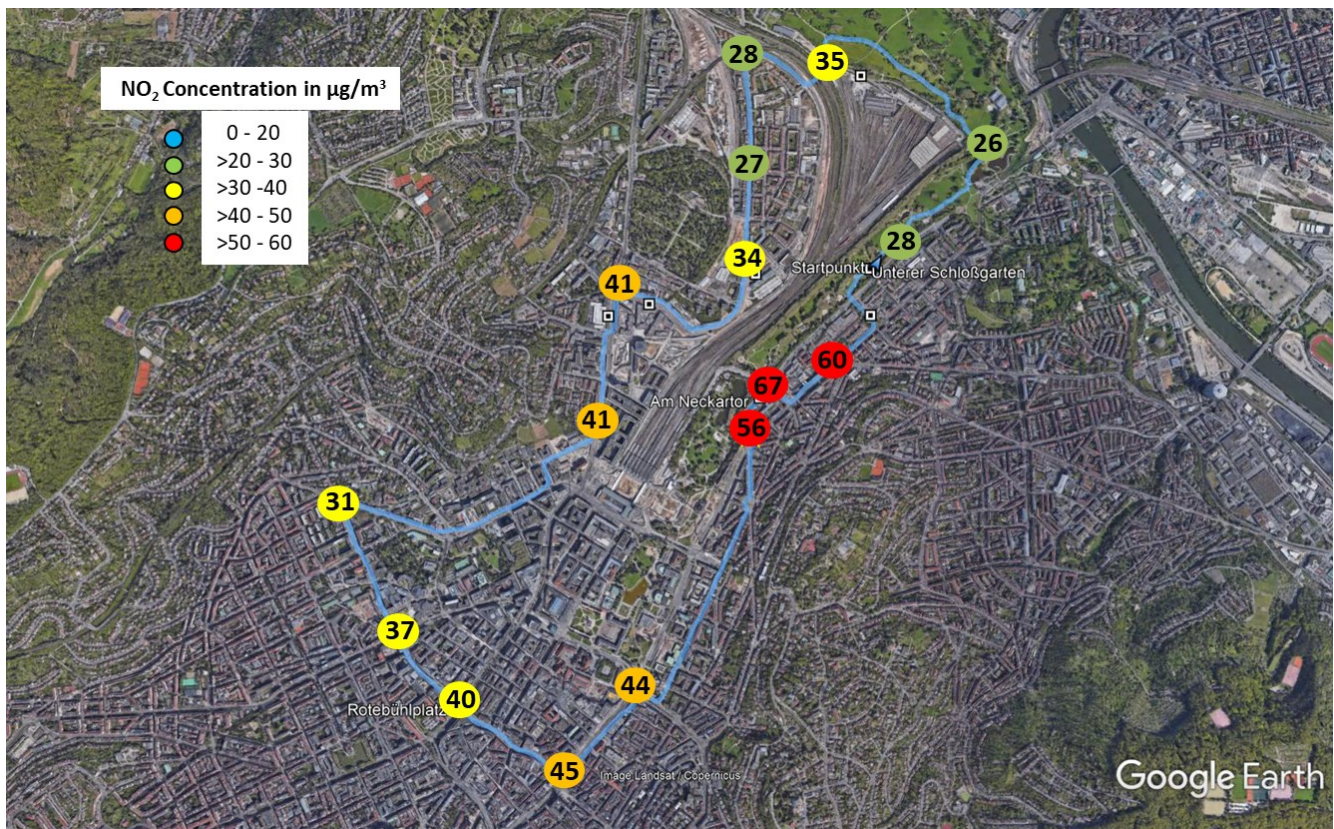


ABBILDUNG 52: Ergebnisse der Stickstoffdioxid-Passivsammlermessungen für die IOP 3 (21.01.-18.03.2018). Quelle: Vogt & Samad (2020).

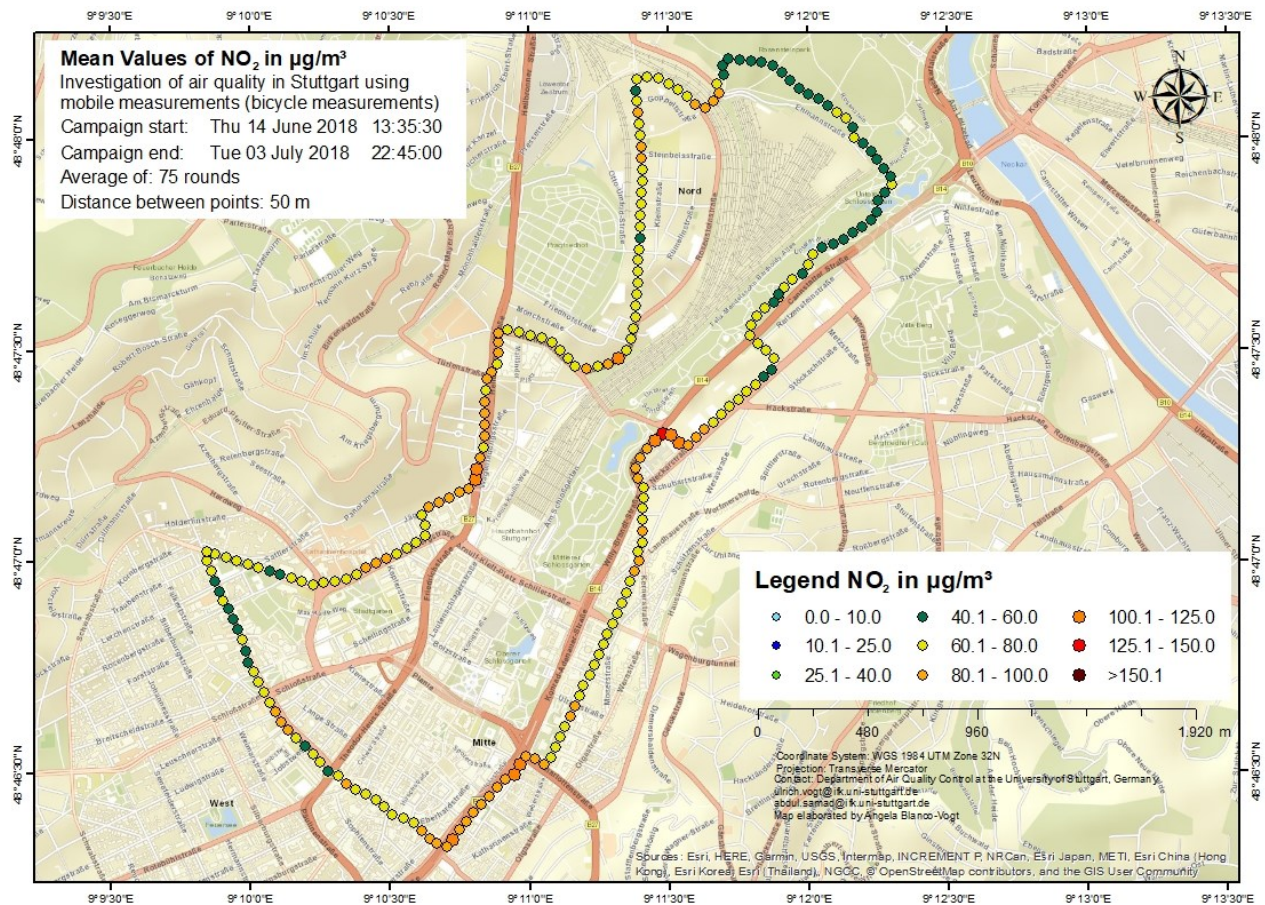


ABBILDUNG 53: Räumliche Verteilung von Stickstoffdioxid-Mittelwert während IOP 4 (14.06.-03.07.2018). Kartengrundlage: OpenStreetMap. Quelle: Vogt & Samad (2020).

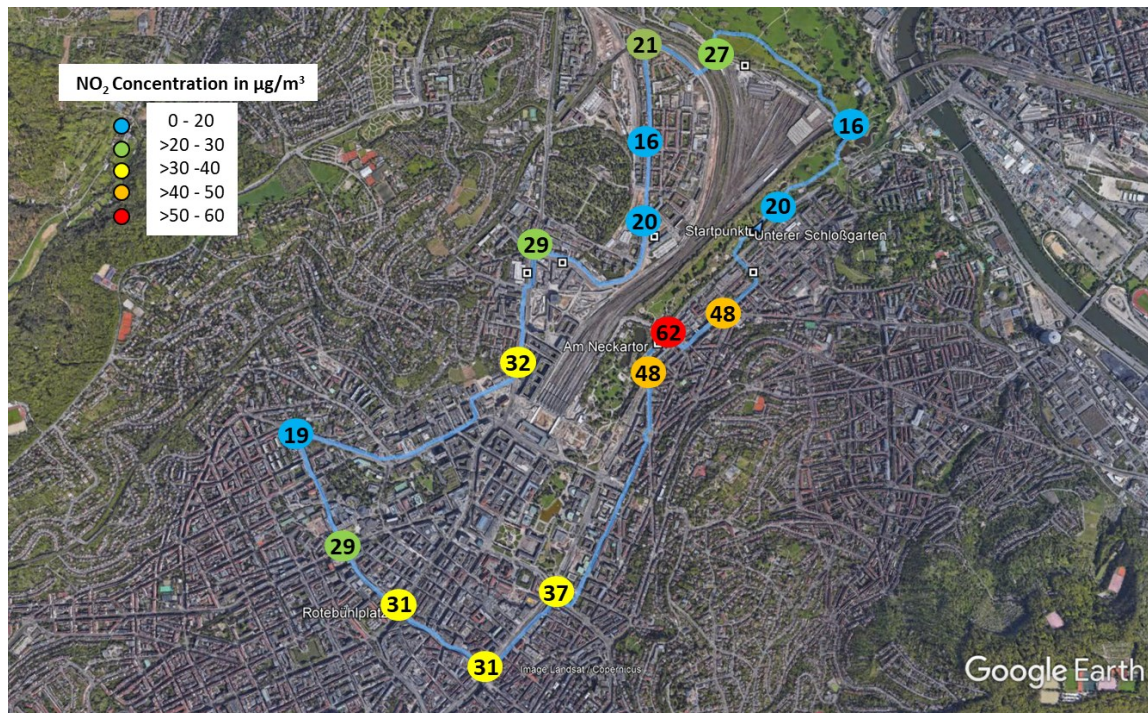


ABBILDUNG 54: Ergebnisse der Stickstoffdioxid-Passivsammler für die IOP 4 (03.06.-30.07.2018). Quelle: Vogt & Samad (2020).

TP7 (FZ Jülich) setzte ein mobiles Messfahrzeug (Mobilab) ein, welches mit umfangreicher Spurenanalytik ausgerüstet ist. Gemessen wurde u.a. Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Methan, Schwefeldioxid, Ammoniak, Stickstoffoxide, Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid und Ozon (siehe Ehlers et al., 2017).

Für die Entwicklung einer geeigneten Messstrategie zur optimalen Nutzung des mobilen Messlabors während der IOPs in Berlin und Stuttgart wurde in enger Abstimmung mit den übrigen Spurenstoff-Messgruppen (Stuttgart: TP8, TP14) Routen und deren Befahrung festgelegt. Zielsetzungen der Messfahrten waren die Untersuchung der Ortsabhängigkeit, der Tagesabhängigkeit und der Jahreszeitabhängigkeit der gemessenen Spurenstoffkonzentrationen. Die mit TP8 abgestimmte Messroute wurde während aller vier IOPs regelmäßig befahren. Start- und Endpunkt der Messfahrt war der Stuttgarter Marienplatz. Die Fahrtroute führte über die B 14 nach Norden bis über das Neckartor hinaus. Anschließend wurden in Form von zwei Schleifen der linke und rechte Teil des Stuttgarter Stadtgebietes vermessen. Die rechts der B 14 gelegene Schleife führte durch das auf der Uhlandshöhe gelegene Wohngebiet, während die linke Schleife zunächst den Hauptbahnhofs-Vorplatz kreuzte, dann das Europaviertel passierte, am Neckartor wieder auf die B 14. Die linke Schleife mündet am Neckartor wieder auf die B 14 und führt zurück zum Marienplatz.

Abb. 55 zeigt den Konzentrationsverlauf der Spurengase Stickstoffdioxid während der IOP 3 am 13.02.2018. Es ist klar ersichtlich, dass für Stickstoffdioxid der Straßenverkehr eine direkte Emissionsquelle darstellt. Eine hohe Verkehrsdichte (z. B. am Neckartor) geht einher mit Spitzenwerten für Stickstoffdioxid. Das auf der rechten Seite der B 14 gelegene Wohngebiet (Uhlandshöhe) zeigt hingegen weitaus niedrigere Werte für Stickstoffdioxid.

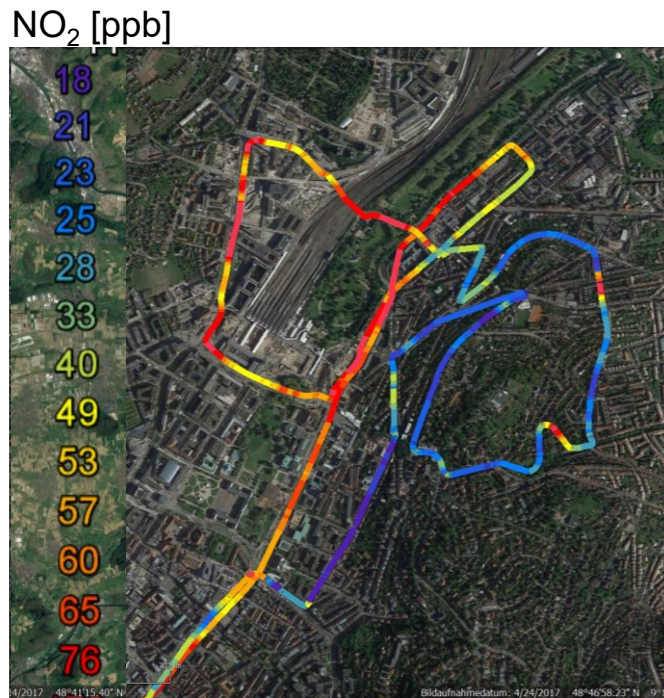


ABBILDUNG 55: Mischungsverhältnis von Stickstoffdioxid auf der Route rund um das Neckartor in Stuttgart (IOP 3; 13.02.2018). Quelle: Klemp et al. (2020).

Abb. 56 zeigt die räumliche Verteilung der Stickstoffdioxid-Konzentration am Fuß der Uhlandshöhe mit Blick nach Norden auf das Neckartor. Der minimale Abstand zwischen Kernerplatz und der B 14 im Osten beträgt lediglich 100 m, trotzdem ist bereits in dieser geringen Entfernung der Einfluss der verkehrlich stark frequentierten B 14 kaum mehr spürbar.

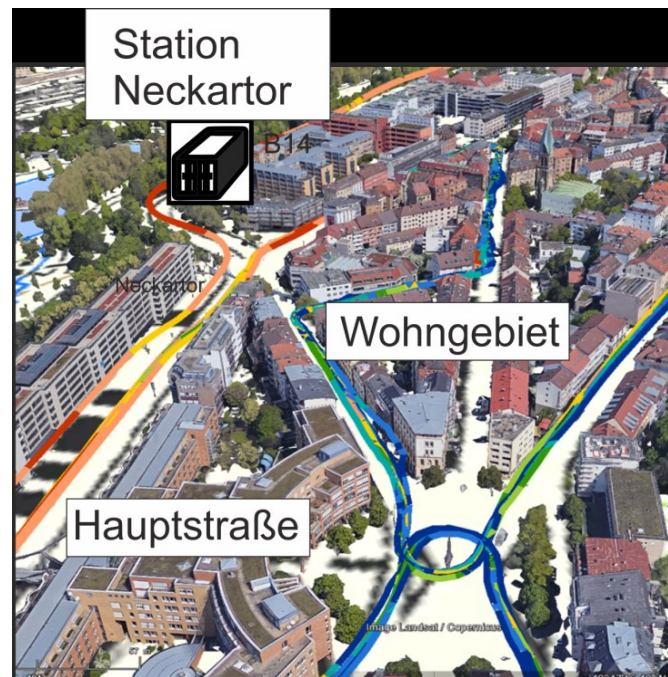


ABBILDUNG 56: Kernerplatz mit Blick nach Norden hin zum Neckartor. Räumliche Variabilität der Stickstoffdioxid-Konzentration (Minimaler Abstand B 14 – Kernerplatz: ca. 100 m). Farbskala für Stickstoffdioxid siehe Abb. 55. Quelle: Klemp et al. (2020).

Abb. 57 beschreibt den tageszeitlichen Verlauf der Stickstoffdioxid-Konzentration auf der festgelegten Route. Besonders hohe Konzentrationen werden während der Rushhour-Zeiten beobachtet, wenn hohes Verkehrsaufkommen herrscht und eine Inversion den Stuttgarter Talkessel nach oben hin abschließt. Das Auflösen der Inversion während der Vormittagsstunden zwischen 06:00 und 09:00 Uhr führt in Gebieten mit geringem Verkehrsaufkommen zu einer deutlichen Erniedrigung der Stickstoffdioxid-Konzentrationen. Besonders im Bereich der Uhlandshöhe ist dies an der deutlichen Abnahme der Stickstoffdioxid-Konzentrationen über den Tag hindurch zu erkennen. Auf der anderen Seite des Talkessels und entlang der Talsohle fließt hingegen ganzjährig dichter Verkehr, so dass hier keine vergleichbaren Abnahmen beobachtbar sind.

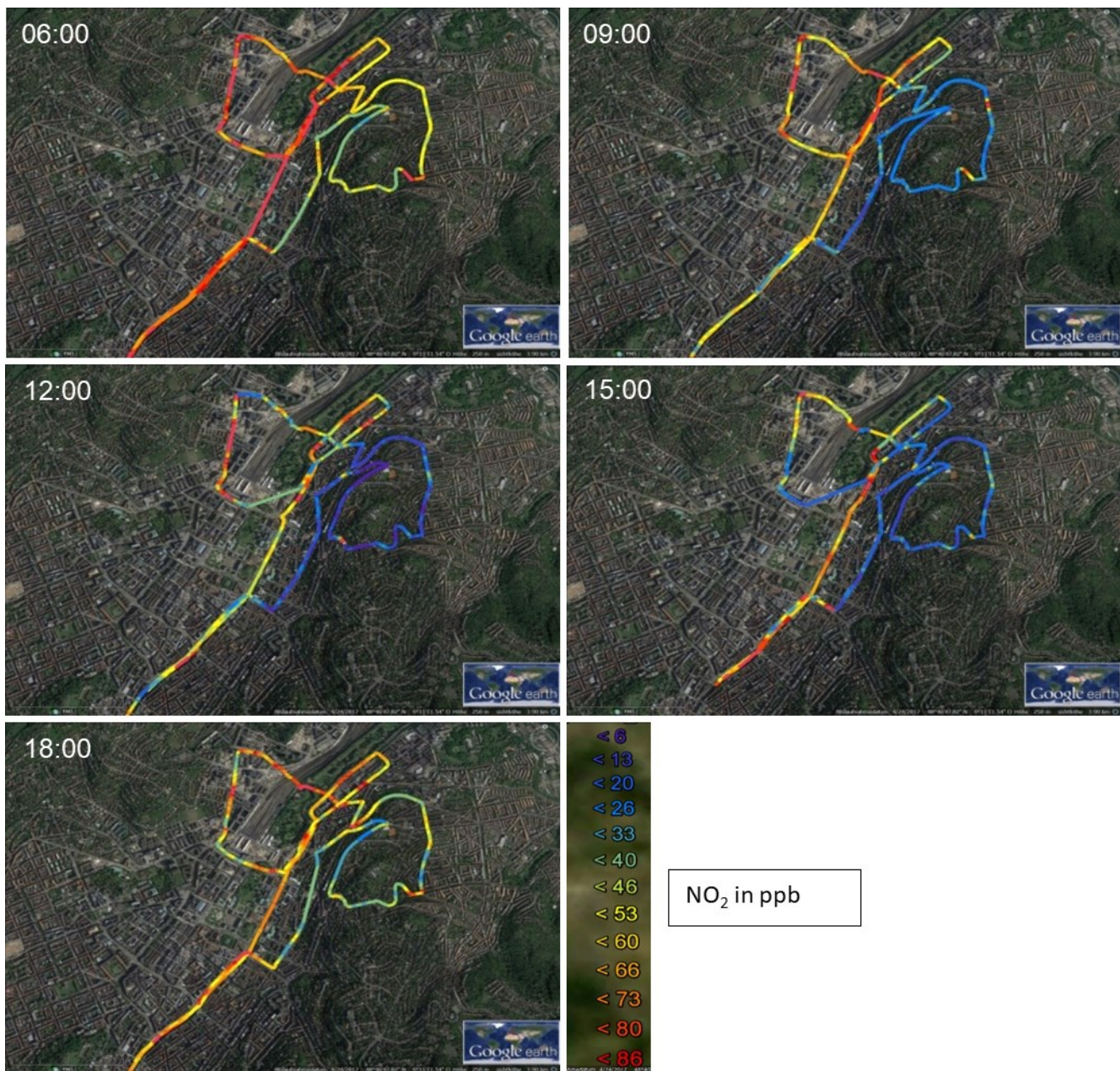


ABBILDUNG 57: Tageszeitlicher Verlauf der Stickstoffdioxid-Konzentration während der IOP 3 am 13.02.2018 auf der festgelegten Route. Quelle: Klemp et al. (2020).

Während der Stuttgarter IOPs wurden zusätzlich für verschiedene Jahreszeiten umfassende Stadt-Umland-Studien durchgeführt. Abb. 58 stellt die Stickstoffdioxid-Konzentrationen während einer winterlichen Messfahrt im Verlauf der IOP 1 (20.02.2017) dar. Für den Vergleich mit PALM-4U-Modellresultaten wurde für den Stickstoffdioxid-Datensatz eine zwei-Minuten-fünf-Perzentil-Tiefpassfilterung vorgenommen, um den Datensatz um ansonsten unvermeidbare Spitzkonzentrationswerte, verursacht durch Verkehrsspitzen, zu bereinigen (siehe Urban, 2010). Die Filterung erlaubt den ungestörten Rückschluss auf die herrschenden Stickstoffdioxid-Konzentrationen im Stuttgarter Umland und ermöglicht den direkten Vergleich mit den Resultaten der entsprechenden PALM-4U Modellierung.

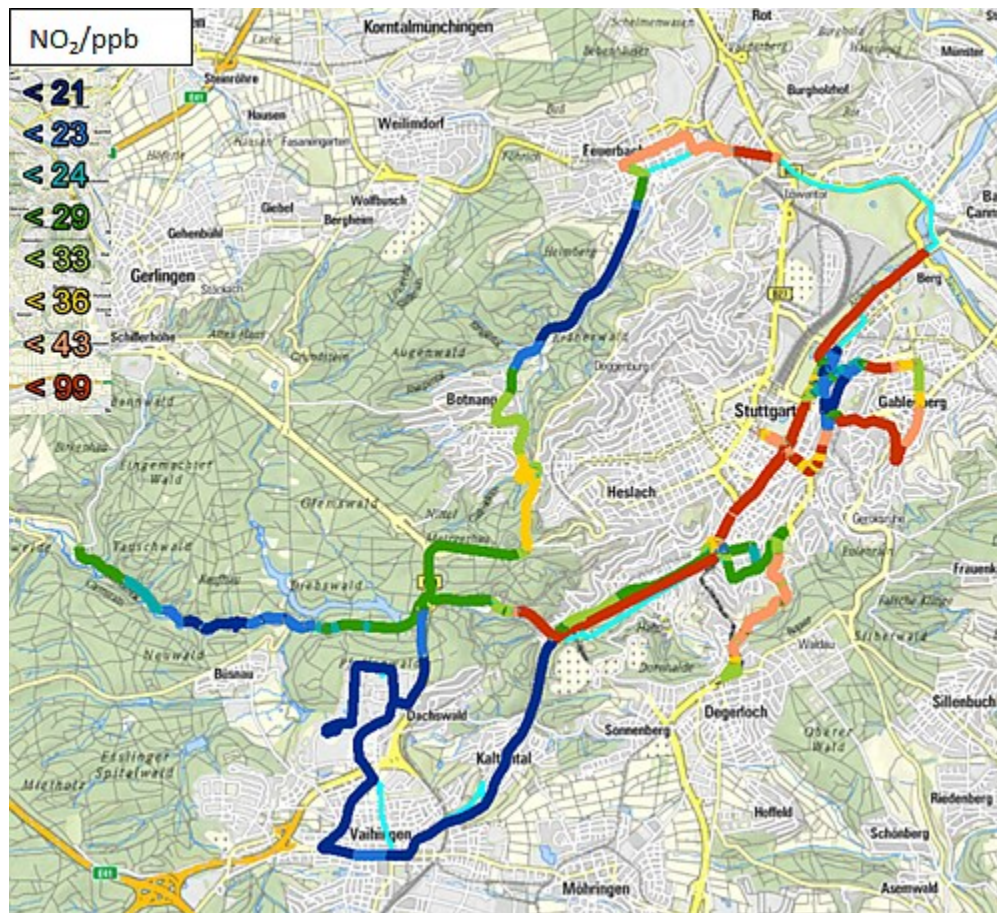


ABBILDUNG 58: Zwei-Minuten-fünf-Perzentil-Tiefpassfilterung der Stickstoffdioxid-Konzentrationen während einer Messfahrt im Verlauf der IOP 1 (20.02.2017) im westlich gelegenen Umland von Stuttgart. Quelle: Klemp et al. (2020).

Der Vergleich der Resultate aus Abb. 58 mit den in Abb. 59 dargestellten Stickstoffdioxid-Werten unter sommerlichen Bedingungen zeigt den Stickstoffdioxid-Jahresgang unter Hintergrundbedingungen auf: Die unter Sommerbedingungen gefundenen Stickstoffdioxid-Hintergrundwerte im Luv der Stadt Stuttgart liegen um den Faktor vier niedriger als im Winter. Allein auf Grund unterschiedlicher Hintergrundbedingungen führt dies zu einer winterlichen Erhöhung des in Stuttgart-Zentrum (Neckartor) gemessenen Stickstoffdioxid-Levels um ca. 15 ppb.

Im Verlauf der IOP 4 wurden von uns in Vorbereitung eines Flußdivergenz-Experimentes (geplant für die Projektphase 2) zur Evaluierung des Emissions-, Transport- und Chemiemoduls von PALM-4U eine Reihe von Testexperimenten vorgenommen. Abb. 59 zeigt den Verlauf einer Messfahrt im Großraum Stuttgart. Als Beispiel für die Spurenstoff-Konzentrationsverläufe werden hier die herrschenden Luv- und Lee-Konzentrationen von Stickstoffdioxid am 09.07.2018 (07:00-09:30 UTC) dargestellt.

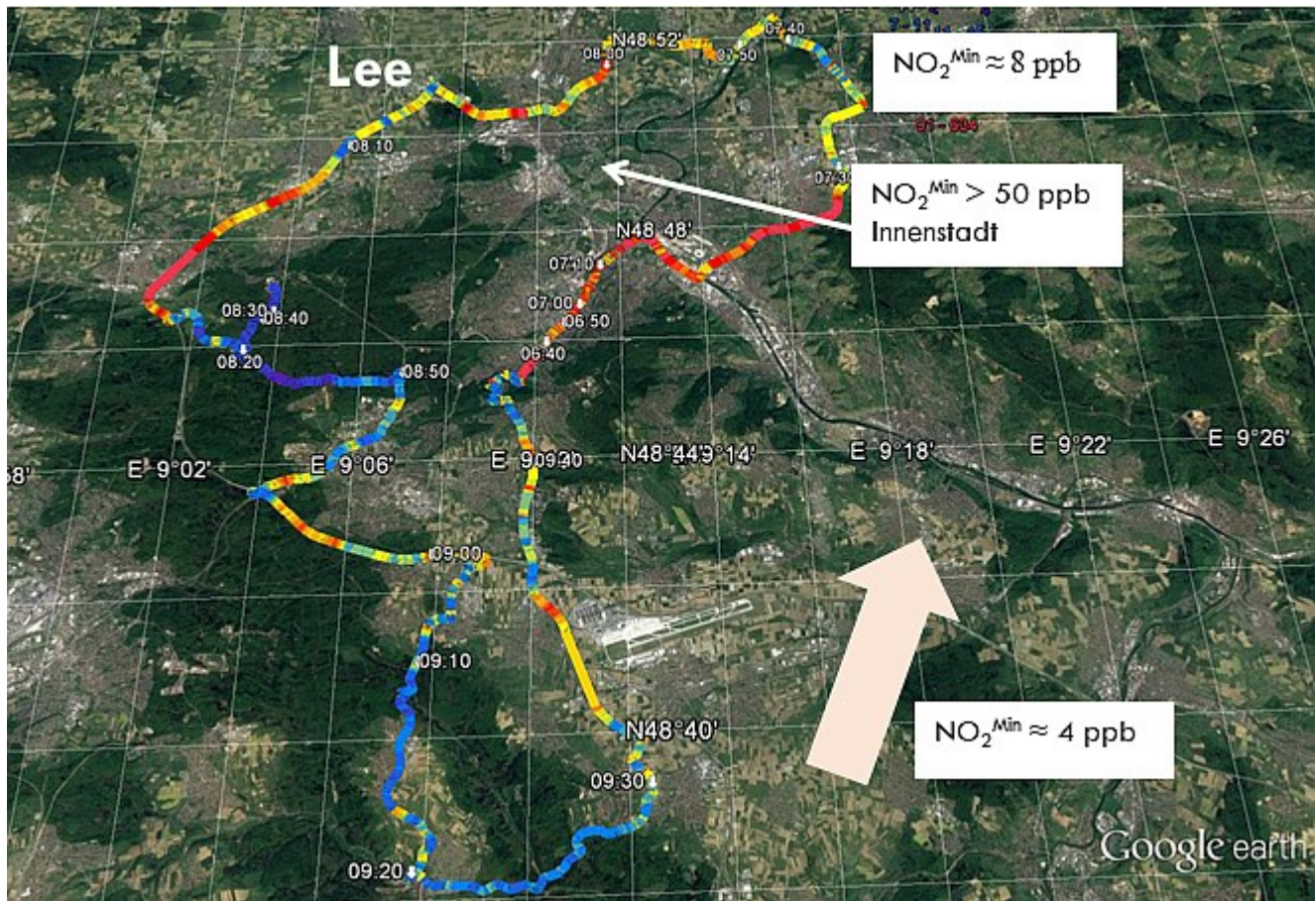


ABBILDUNG 59: Stickstoffdioxid-Konzentrationen während einer Messfahrt im Verlauf der IOP 4 (09.07.2018, 07:00-09:30 UTC) im westlich gelegenen Umland von Stuttgart. Erkundungsmessung zur Planung von Flussdivergenzuntersuchungen im Rahmen der zweiten Projektphase: Evaluierung des Emissions-, Transport- und Chemiemoduls von PALM-4U. Quelle: Klemp et al. (2020).

Die Stickstoffdioxid-Emissionen der Stadt Stuttgart führen zu einem spürbaren Anstieg der Stickstoffdioxid-Konzentrationen (von ca. 4 ppb im Luv-Bereich der Stadt) auf etwa 8 ppb im Lee-Bereich der Stadt. Der bei diesem Experiment beobachtbare Stickstoffdioxidbeitrag der Stadt (ca. 5-6 ppb Stickstoffdioxid mit 4 ppb Stickstoffdioxid und gemäß der Anteilsverteilung des photostationären Zustands 1-2 ppb Stickstoffmonoxid) liegt im zu erwartenden Rahmen: Der Stickstoffdioxidbeitrag des Verkehrs in städtischer Umgebung liegt mit 60-80 % (Karl et al. 2017) erheblich über dem durchschnittlichen Anteil für Deutschland von 34 % (UBA 2018) und unterstreicht die Rolle des Straßenverkehrs als Stickstoffdioxid-Hauptemittenten in städtischer Umgebung.

Gegen Ende der 1990er Jahre wurde im BMBF-Projekt EVA im Rahmen des Troposphären Forschungsprogramms (TFS) im Umland der Stadt Augsburg (Slemr et al. 2002) ein Vergleich zwischen experimentell bestimmter Stickstoffdioxid-Emissionsrate einer Stadt und den Resultaten eines Emissions-Berechnungsmodells durchgeführt. Typische Stickstoffdioxid-Immissionsanstiege im Lee-Bereich der Stadt lagen im Bereich von 8-10 ppb Stickstoffdioxid (Möllmann-Coers et al. 2002). Der Abstand zwischen Stadtzentrum und der Messlinie im Lee-Bereich betrug in beiden Fällen ca. 5-6 km (Mannschreck et al. 2002, Slemr et al. 2002), so dass in erster Näherung von vergleichbaren meteorologischen Bedingungen ausgegangen werden kann. Setzt man nun für den Verkehrssektor als innerstädtischen Stickstoffdioxid-Hauptemittenten eine Verringerung der städtischen Stickstoffdioxid-Emissionen in den letzten zwei Jahrzehnten um einen Faktor Zwei an (Ehlers et al. 2016), so erscheint der beobachtete Anstieg von ca. 4 ppb im Lee-Bereich der Stadt Augsburg ausgesprochen plausibel.

Ehlers et al. (2016) haben anhand von Langzeituntersuchungen städtischer flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) und Stickstoffdioxid-Immissionsmessungen prognostiziert, dass heutzutage die Bildung von Photooxidantien im Abluftbereich einer Stadt vornehmlich in ländlicher Umgebung durch Zumischung biogener VOC-Emissionen stattfindet. Zuvor unterbindet das heute niedrigere VOC/Stickstoffdioxid-Verhältnis weitgehend eine merkliche Bildung von Photooxidantien. Es erscheint daher messtechnisch aussichtsreich und wissenschaftlich interessant, die heutzutage existierenden Bedingungen im Abluftbereich einer Stadt experimentell zu untersuchen und den Vergleich mit entsprechenden PALM-4U-Modellierungen vorzunehmen.

Überprüfung aktueller Kraftfahrzeug-Emissionsfaktoren

Ein wesentlicher Emittent gas- und partikelförmiger Spurenstoffe in städtischer Umgebung ist der Straßenverkehr. Als Datenbasis verkehrstragender Emissionen in städtischer Umgebung wird für Modellstudien mit PALM-4U das Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs herangezogen. Eine wichtige Voraussetzung für die Güte von PALM-4U-Modellstudien besteht daher in der zuverlässigen Beschreibung des Emissionsverhaltens der aktuellen Fahrzeugflotte.

Zu diesem Zweck wurden mit der Analytik des mobilen Messlabors Spurengasmessungen in Straßentunneln durchgeführt. Die Quellzuordnung von Tunnelmessungen ist besonders einfach, da die Schadstoffe hier eindeutig aus dem Straßenverkehr stammen. Charakteristische Parameter sind Spurenstoff/Kohlenstoffdioxid-Verhältnisse einer aktuellen Straßenverkehrsflotte, da sie ein auf den Treibstoffverbrauch normiertes Maß für die Spurenstoffemission darstellen. Überdies erlaubt das ermittelte Spurenstoff/Kohlenstoffdioxid-Verhältnis den unmittelbaren Vergleich verschiedener Tunnelstudien untereinander, unabhängig von der jeweils den Tunnel passierenden Kfz-Anzahl.

Einen Schwerpunkt der Untersuchungen während der Stuttgarter IOPs bildeten Tunnelstudien im Heselbacher Tunnel. Ziel dieser war die Charakterisierung des Emissionsverhaltens der aktuellen Fahrzeugflotte. Der Stuttgarter Heselbacher Tunnel eignet aus den nachfolgend angeführten Gründen für diesen Zweck in besonderer Weise. Der Heselbacher Tunnel verbindet das Autobahnkreuz Stuttgart mit der B 14, die direkt durch Stuttgart verläuft und daher ein außergewöhnlich hohes Verkehrsaufkommen aufweist (Durchsatz: ca. 50'000 Fahrzeuge/Wochentag, davon 2500 LKW). Mit einer Länge von ca. 2300 m hat er eine ausreichende Länge, so dass durch fahrzeuginduzierte Turbulenzen eingebrachte atmosphärische Spurenstoffe (hier Ozon) keine merklichen Auswirkungen auf die gemessenen Stickstoffdioxid-Konzentrationen haben. Die wechselnden Belastungssituationen (konstante Geschwindigkeitsverhältnisse außerhalb der Stoßzeiten, Stop-and-Go-Bedingungen während der Stoßzeiten) erlauben die Untersuchung unterschiedlicher Emissionsbedingungen der aktuellen Fahrzeugflotte. Zudem erlaubt die gute Verkehrsanbindung des Tunnels eine hohe Frequenz von Tunnelpassagen durch MobiLab.

Abb. 60 zeigt die Resultate einer Reihe von Durchfahrten des Heselbacher Tunnels während der IOP 2. Der zeitliche Trend in den Konzentrationsspitzen für Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid und Kohlenstoffdioxid spiegelt die unterschiedlichen Belastungssituationen wider. Insbesondere die Messfahrten zwischen 15:00 und 16:00 UTC fallen direkt in die nachmittägliche Rushhour und sind daher mit besonders hoher Verkehrsdichte verknüpft.

02.07.2017 Stuttgart

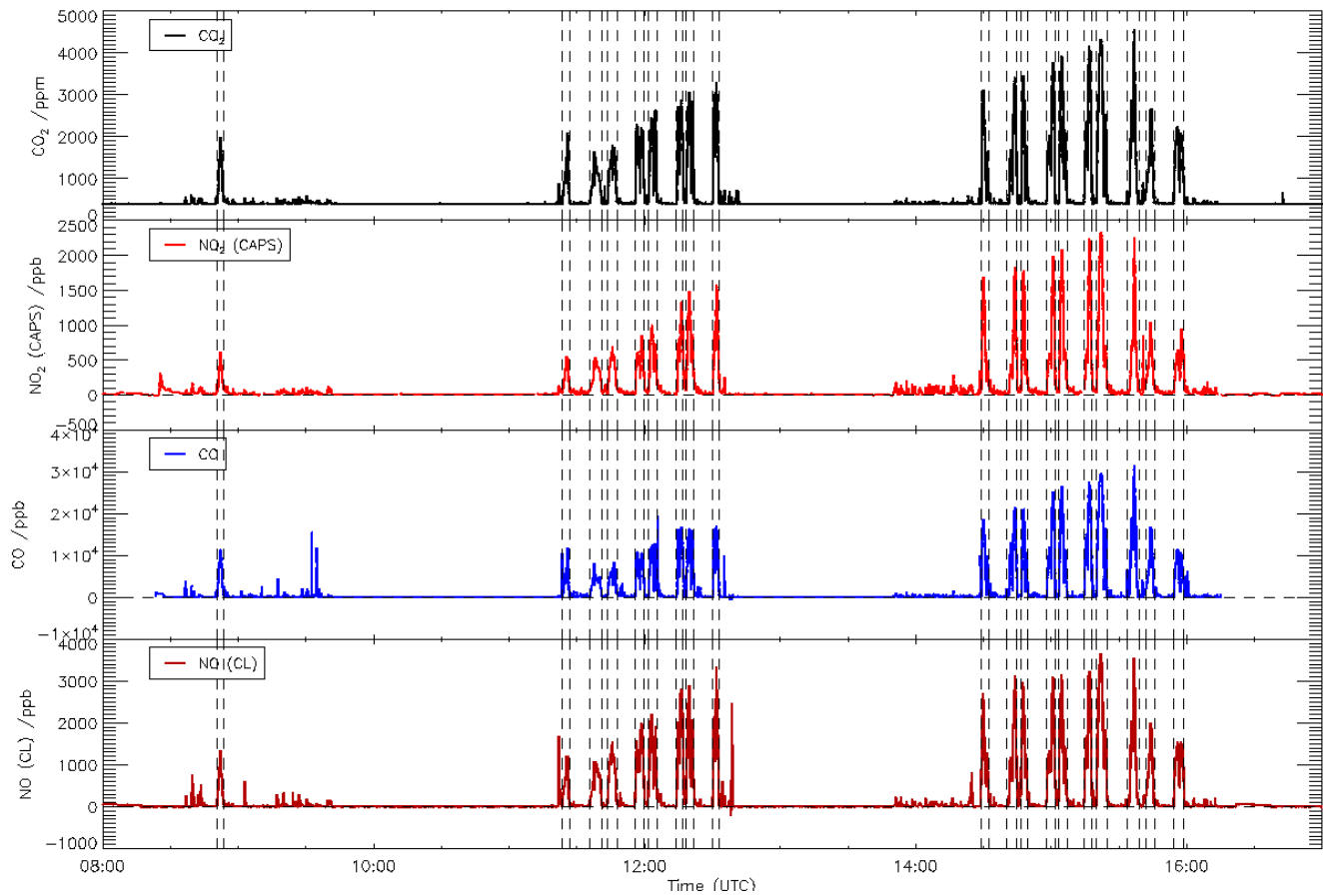


ABBILDUNG 60: Gemessene Konzentrationsverläufe von Kohlenstoffdioxid (CO_2), Stickstoffdioxid (NO_2), Stickstoffmonoxid (NO) und Kohlenstoffmonoxid (CO) während der Passagen des Stuttgarter Heselacher Tunnels (IOP 2; 02.07.2017). Gestrichelte Linien markieren die jeweiligen Eintritts- und Austrittszeiten des mobilen Messlabors. Quelle: Klemp et al. (2020).

Zur Normierung der Spurengase auf die Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen wurden lineare Korrelationen durchgeführt. Abb. 61 zeigt als Beispiel den Korrelationsfit zwischen Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid für die Durchquerung des Heselacher Tunnels von 15:14-15:18 UTC.

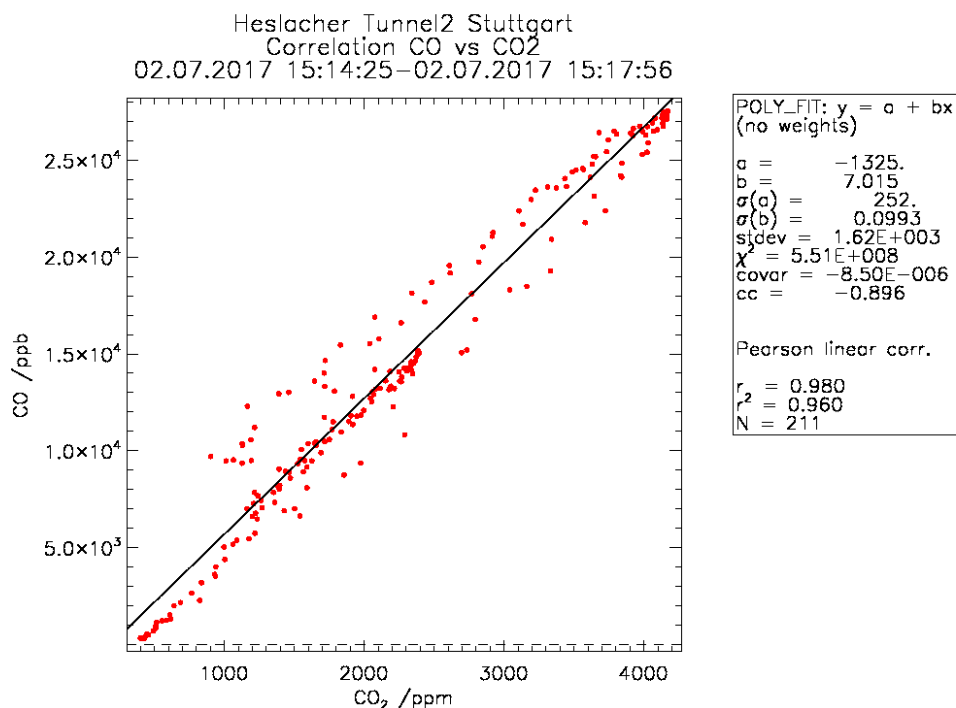


ABBILDUNG 61: Beispiel für einen linearen Korrelationsfit zwischen Kohlenstoffmonoxid (CO) und der gleichzeitig gemessenen Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Konzentration im Heslacher Tunnel (Stuttgart). Durchfahrt des Stuttgarter Heslacher Tunnels (IOP 2; 02.07.2017 15:14-15:18 UTC). Es gilt: CO (ppm) = 7.015 · 10⁻³ CO₂ (ppm); R² = 0.960. Quelle: Klemp et al. (2020).

Stellvertretend für eine Reihe von Untersuchungen soll hier exemplarisch der Einfluss von zwei Kenngrößen (Außentemperatur und Kfz-Zusammensetzung) auf den Stickstoffoxidausstoß der aktuellen Kfz-Flotte dargestellt werden (Abb. 62). Das Stickstoffoxid/Kohlenstoffdioxid-Verhältnis ist im Heslacher Tunnel im Winter um den Faktor 1.5-2.0 höher als im Sommer. Es konnte zudem gezeigt werden, dass jahreszeitunabhängig die auf den Kohlenstoffdioxid-Ausstoß normierten Stickstoffoxid-Emissionen an Wochentagen gegenüber den Wochenenden um mehr als 40 % erhöht sind. Der Vergleich mit Verkehrsdaten benennt die Ursachen. Am Wochenende sinkt der Anteil leichter und schwerer Nutzfahrzeuge von etwa 7 % an Wochentagen auf etwa 3 % ab (LUBW, 2013). Wenn eine Halbierung des Nutzfahrzeuganteils zu einer Reduktion des Stickstoffoxidausstoßes auf von mehr als 40 % führt, dann trägt ein Nutzfahrzeug-Anteil von 7 % (typisch für Wochentage) zu mehr als 50 % zum Gesamt-Stickstoffoxid-Ausstoß der gemessenen Fahrzeugflotte bei.

Es kann der Schluss gezogen werden, dass stationäre Messstationen die räumliche Variabilität nicht erfassen können. Dies betrifft insbesondere Messstationen in Quellnähe, wie die sogenannte Spotmessstation Stuttgart „Am Neckartor“, welche hauptsächlich vom lokalen Verkehr beeinflusst wird, aber auch andere Spotmessstationen bzw. Verkehrsmessstationen. Es ist daher unmöglich, die räumliche Variabilität der Konzentrationen einer gesamten Stadt mit wenigen Messstationen abzubilden. Die mobilen Messungen in Kombination mit den Passivsammlermessungen sind ein sehr nützliches Werkzeug, um die Luftqualitätssituation in einem größeren Untersuchungsgebiet zu bestimmen, die räumliche Verteilung verschiedener Luftschadstoffe zu ermitteln und die städtischen Hotspots zu erfassen. Während der Messungen wurden weitere Hotspots im Untersuchungsgebiet gefunden, die vor Beginn der Messkampagne nicht zu erwarten waren. Die lokalen Quellen spielen im Untersuchungsgebiet eine wichtige Rolle für die Luftqualitätssituation.

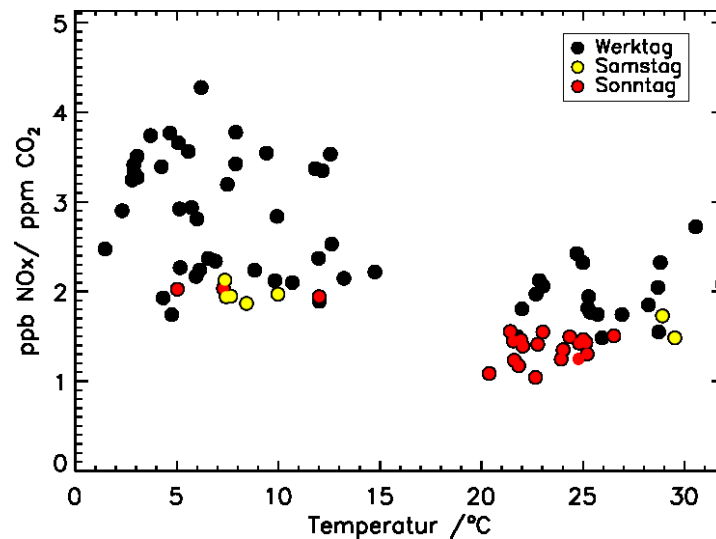


ABBILDUNG 62: Stickstoffdioxid (NO_x)/Kohlenstoffdioxid (CO_2)-Verhältnis in Abhängigkeit der Außentemperatur im Heslacher Tunnel (Stuttgart). Durchfahrt des Heslacher Tunnels während der Stuttgarter IOPs für unterschiedliche Wochen- und Wochenendtage. Quelle: Klemp et al. (2020).

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass die Luftverschmutzung in der Nähe der Quelle sehr starken zeitlichen und räumlichen Schwankungen unterliegt. Für Stickstoffdioxid betrugen die Konzentrationen im Park nur etwa 30-50 % der direkt am Straßenrand gemessenen Konzentrationen. Der Vergleich der PM_{10} -Konzentrationen auf der Straße mit denen im Park ergab einen weniger ausgeprägten, jedoch deutlich messbaren Unterschied. Die Ergebnisse der einzelnen Fahrten entlang der Straße zeigten darüber hinaus eine sehr große Variation, abhängig von der Belüftung der entsprechenden Straßenabschnitte. Bei Straßenkreuzungen oder größeren Lücken zwischen Gebäuden nahmen die Konzentrationen aufgrund der besseren Belüftung sofort ab. Der Vergleich der Hauptverkehrszeiten mit den verkehrsarmen Zeiten, bestätigte, dass der lokale Verkehr mehr als 50 % zu den jeweiligen Konzentrationen der meisten gemessenen Schadstoffe beitrug.

Vertikalverteilung von Luftverunreinigungen und meteorologischen Größen

Zur Untersuchung der Vertikalverteilung von meteorologischen Größen und Luftverunreinigungen wurde von TP8 ein Fesselballonsystem zusammen mit verschiedenen kompakten Messgeräten verwendet, um vertikale Profilmessungen durchzuführen. Die gemessenen Luftverunreinigungen waren Feinstaub, Ultrafeinstaub, schwarzer Kohlenstoff, Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid, Stickstoffdioxid und Ozon. Die gemessenen meteorologischen Größen waren Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung.

Der bei diesen Messungen verwendete Ballon hat ein Volumen von 85 m^3 mit einer Nutzlast von ca. 20 kg und wird mit Heliumgas befüllt. Der Ballon wird mit einem Seil verbunden, das mit einer elektrischen Winde auf- und abgespult wird. Die Auf- und Abstiegsgeschwindigkeit wird auf ungefähr 0.5 m/s eingestellt. Die Sondierungen (S) wurden vom Boden aus bis in eine Höhe von ca. 250 m über Grund, am Standort IFK-Uni Stuttgart und 470 m über Grund am Standort Stuttgarter Schlossgarten durchgeführt. Eine Sondierung (Auf- und Abstieg) dauerte durchschnittlich etwa 30-45 Minuten. Die gemessenen Schadstoffe und meteorologischen Größen wurden während des Auf- und Abstiegs kontinuierlich aufgezeichnet und mit einer zeitlichen Auflösung von einer Sekunde zur Bodenstation übertragen.

Der Messstandort Schlossgarten befindet sich zwischen der Messstation ‚Am Neckartor‘ und dem Rosensteinpark. In unmittelbarer Nähe ist das Gelände des Stuttgarter Bahnhofs und die viel befahrene Bundesstraße B 14. In Abb. 63 sind beispielhaft Vertikalprofile einer Fesselballonsondierung dargestellt. Die Sondierung fand am

08.07.2018 statt, startete um 20:52 MESZ und endete um 21:20 MESZ. Das Vertikalprofil der Lufttemperatur zeigt, dass die Temperatur vom Boden bis in etwa 50 m über Grund zunimmt und dann abnimmt. Es handelt sich daher um eine Bodeninversion bis in etwa 50 m Höhe. Temperaturinversionen sind sehr stabile Luftschichtungen, die den vertikalen Luftaustausch behindern. Die Windgeschwindigkeit weist ebenfalls einen starken Gradienten mit sehr niedrigen Geschwindigkeiten in Bodennähe innerhalb der Bodeninversion auf. Während der gesamten Sondierung war die Windrichtung mit nordöstlicher Richtung stabil. Es wurden hohe Konzentrationen an schwarzem Kohlenstoff und Feinstaub in Bodennähe bis zur Inversionsschicht im Vergleich zu den Konzentrationen über der Inversionsschicht beobachtet. Dies zeigt deutlich das Festhalten von Schadstoffen innerhalb der Inversionsschicht. Oberhalb der Inversionsschicht waren die Werte sowohl für den Wind als auch für die Schadstoffe konstant.

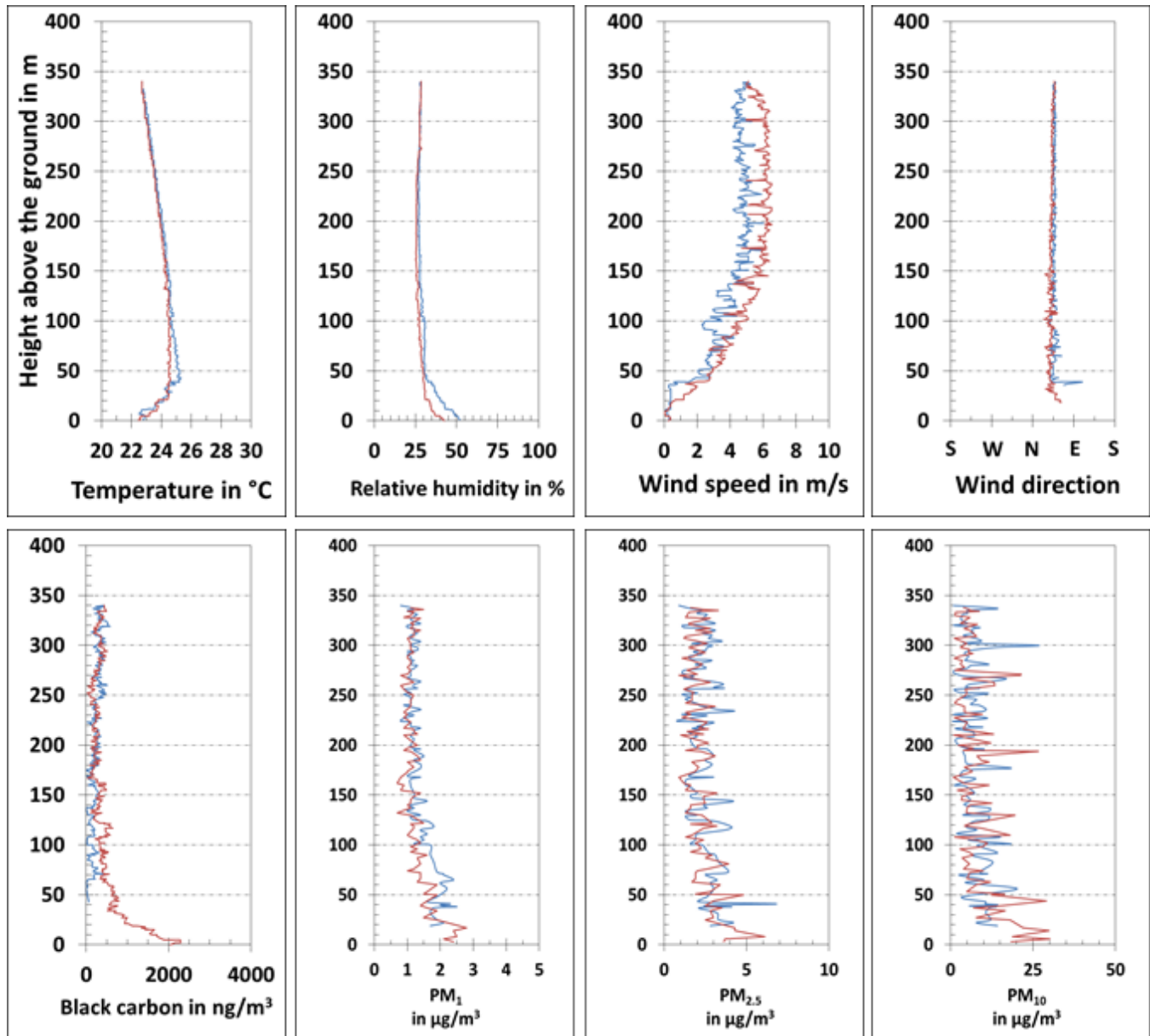


ABBILDUNG 63: Vertikalprofile der meteorologischen Parameter (Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung) und Schadstoffe (schwarzer Kohlenstoff und Feinstaub) für eine Sondierung am 08..07.2018 um 20:52 MESZ. Die blaue Linie zeigt die Ergebnisse während des Aufstiegs und die rote Linie während des Abstiegs. Quelle: Vogt & Samad (2020).

Die Bildung und Auflösung der Inversionsschicht während IOP 4 ist in Abb. 64 gezeigt. Die Bildung einer Bodeninversion (Abb. 64 links) wurde erstmals in der Sondierung S11 am Abend des 08.07.2018 gegen 19:30 MESZ festgestellt, als die Lufttemperatur vom Boden bis zu einer Höhe von 20 m über Grund anstieg und dann wieder abnahm. Diese Temperaturinversion wurde in der Nacht verstärkt und erreichte eine Höhe von etwa 400 m über Grund (Sondierung S20 und S21).

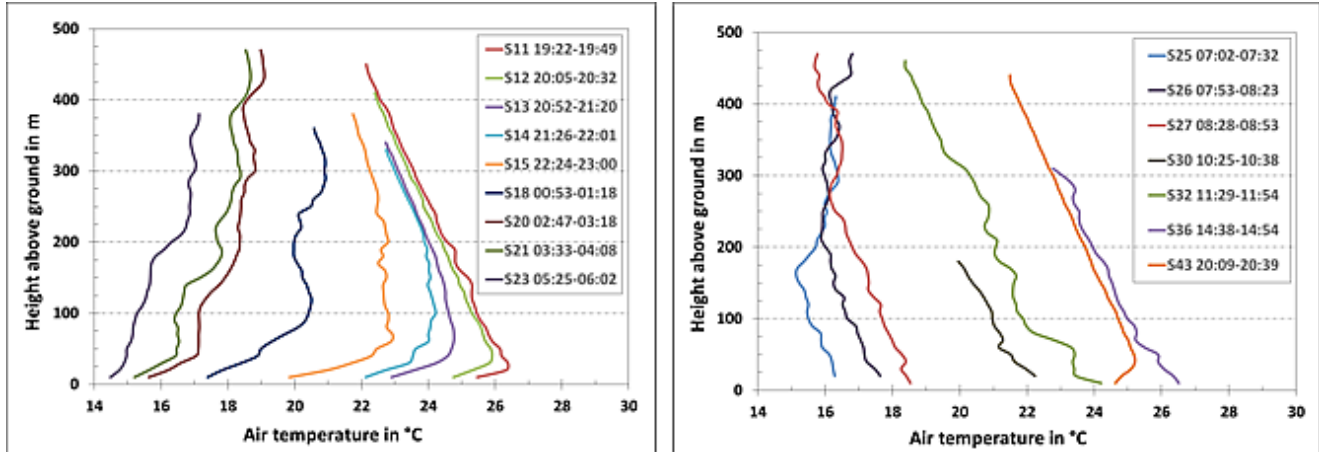


ABBILDUNG 64: Bildung (links) und Auflösung (rechts) der Inversionsschicht während der IOP 4 – Phase (08.-09.07.2018). Quelle: Vogt & Samad (2020).

In Abb. 64 rechts ist die Auflösung der Bodeninversion zu sehen. In der Sondierung S25 sieht man wie die Bodeninversion von unten her aufgelöst wurde. Es resultiert eine abgehobene Bodeninversion, die in einer Höhe von ca. 175 m beginnt. Die nächtliche Bodeninversion war um ca. 11:30 MESZ vollständig aufgelöst (S32). Der ganze Tag des 09.07.2018 zeigte ein labiles Verhalten (S30, S32 und S36). Abends wurde die Bildung einer Bodeninversion nach 19:30 MESZ erneut festgestellt (S43).

Die oben erwähnte Temperaturinversion wirkt sich direkt auf die Schadstoffkonzentration im Untersuchungsgebiet aus. Die Schadstoffe werden unter- oder innerhalb der Temperaturinversion festgehalten, da es innerhalb der Inversionsschicht keine Vertikalbewegung gibt. Wie in Abb. 65 zu sehen ist, ist der Abtransport und die Vermischung von Luftverunreinigung und damit deren Verdünnung aufgrund der reduzierten horizontalen Windgeschwindigkeit innerhalb und unterhalb einer Temperaturinversion herabgesetzt. Als Beispiel sind die PM_{2.5}- und PM₁-Konzentrationen in den Abb. 65 und 66 für die gleichen Messungen wie in Abb. 64 dargestellt. Die PM_{2.5}- und PM₁-Konzentrationen verhalten sich während diesen Sondierungen gleich. Nach Bildung der Temperaturinversion reichern sich die Partikel bodennah an, wie dies aus den Sondierungen S11 bis S23 ersichtlich ist. Wird die Inversionsschicht stärker, nimmt der PM-Konzentrationsgradient zwischen bodennahen Konzentrationen und denen oberhalb der Inversionsschicht zu. Es ist zu sehen, dass über der Inversionsschicht die PM-Konzentration bei allen Sondierungen am niedrigsten und fast gleich ist. Während des Auflösens der Inversion wurde beobachtet, dass die PM-Konzentration bis zur abgehobenen Bodeninversionsschicht zwischen 200 und 300 m über Grund gut durchmischt war und oberhalb der abgehobenen Inversionsschicht abnahm, wie in den Sondierungen S26 und S27 gezeigt. Sobald die Temperaturinversion vollständig aufgelöst war, war die PM-Konzentration gleichmäßig verteilt und es wurde kein Konzentrationsgradient festgestellt. Das gleiche Phänomen konnte auch bei den anderen Schadstoffen beobachtet werden.

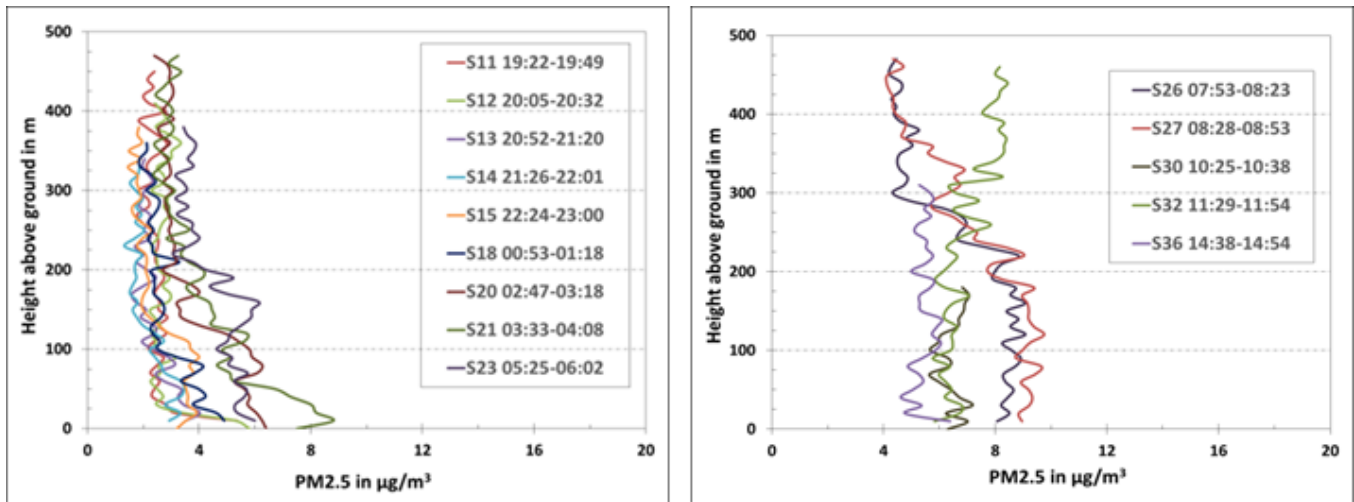


ABBILDUNG 65: PM_{2,5}-Vertikalprofile während der Bildung (links) und Auflösung (rechts) der Inversionsschicht während der IOP 4 vom 08.-09.07.2018. Quelle: Vogt & Samad (2020).

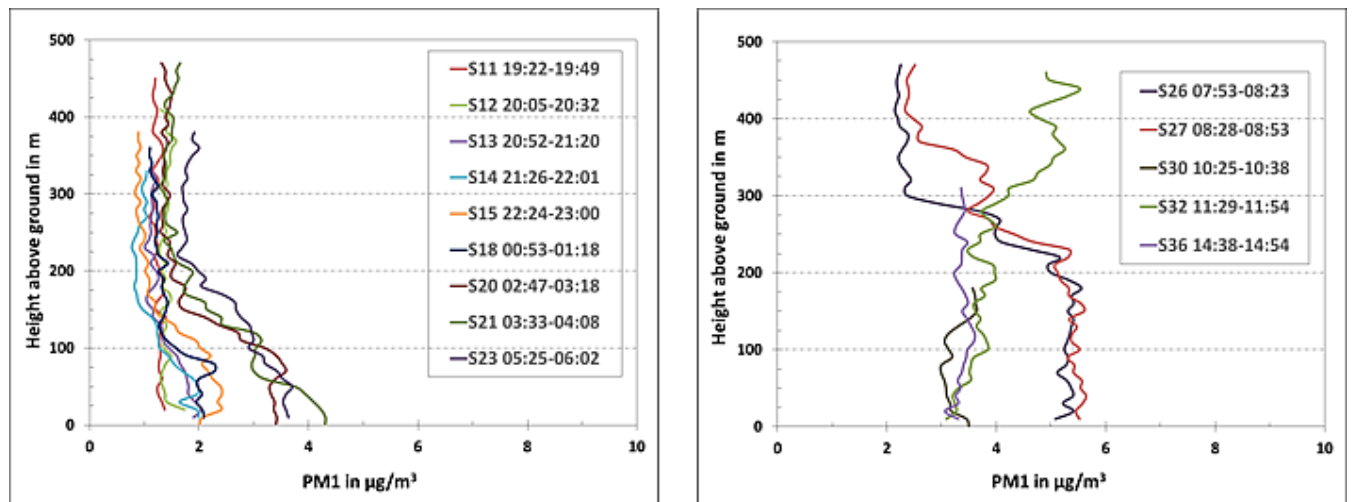


ABBILDUNG 66: PM₁-Vertikalprofile während der Bildung (links) und Auflösung (rechts) der Inversionsschicht während der IOP 4 vom 08.-09.07.2018. Quelle: Vogt & Samad (2020).

Talabwinde sind im Raum Stuttgart ein häufiges Phänomen. Sie können eine wichtige Rolle für die Belüftung der Stadt unter stabilen Bedingungen spielen. Deshalb wurde während der IOP 4 im Sommer 2018 die zeitliche Entwicklung der atmosphärischen Stabilität und der Windfelder um Stuttgart untersucht.

Weitere Messungen zur Untersuchung der Vertikalverteilung von meteorologischen Größen wurden von TP7 (KIT) durchgeführt. Details zu den eingesetzten Messgeräten, den eingestellten Messmodi und den geografischen Daten der Messstandorte sind Emeis et al. (2020) und Kalthoff et al. (2013) zu entnehmen. Die Stabilität der atmosphärischen Grenzschicht ist für zwei IOP-Tage in der Abb. 67 (a) dargestellt und wurde aus den Messungen der potenziellen Temperatur vom Mikrowellenradiometer HATPRO (Temperatur- und Feuchte-Profile) abgeleitet (Crewell & Löhnert, 2007; Löhnert et al., 2009). Während der beiden Nächte wurde eine strahlungsbedingte Bodeninversion beobachtet. Am 08.07.2018 existierte die Bodeninversion bis 07:00 UTC und am 09.07.2018 bis 08:00 UTC. Dabei war die Inversion am 09.07.2018 ausgedehnter und stärker als am Morgen des Vortages. Dieser Unterschied in der Stabilität kann durch den Einfluss der Bewölkung erklärt werden. Die Bewölkung begrenzte die Abstrahlung und damit Abkühlung der Erdoberfläche. Wolken wurden

über Stuttgart anhand der HATPRO- und Ceilometer-Messungen am 08.07.2018 zwischen 02:00 und 05:00 UTC detektiert. Erhöhte Infrarottemperaturen über dem HATPRO dienten als Indikator von Bewölkung (Abb. 67 (d)). Die Wolkenuntergrenze lag bei ca. 2500 m ü. NN, was aus den Ceilometer-Messungen am Schnarrenberg (DWD) abgeleitet werden konnte. Am 09.07.2018 reichte die Bodeninversion bis zu 700 m ü. NN mit einem vertikalen Gradienten der potentiellen Temperatur von 1.2 K/100 m. Die stärkere Stabilität (2 K/100 m) entwickelte sich bis zur mittleren Kammhöhe (470 m ü. NN).

Die Vertikalprofile des Horizontalwindes im Stuttgarter Kessel und an der Feuerwache im Neckartal in ihrer zeitlichen Entwicklung sind in Abb. 67 (b) und (c) dargestellt. Am 08.07.2018 zwischen 00:00 UTC und 03:00 UTC sowie am 09.07.2018 zwischen 02:00 UTC und 05:00 UTC wurde ein Low-Level-Jet (LLJ) über der Kammhöhe bei etwa 550 m ü. NN beobachtet. Die maximale Windgeschwindigkeit betrug 5 m/s und der Wind wehte aus nordwestlicher Richtung. Die Entwicklung eines LLJ mit Lage über der mittleren Kammhöhe stimmt mit der Analyse von Wittkamp et al. (eingereicht) überein. Sie untersuchten die mesoskalige Variabilität des horizontalen Windfelds um Stuttgart und zeigen, dass sich unabhängig von der Orographie ein räumlich homogener LLJ ausbildete.

An der Feuerwache herrschte in der Nacht vom 08. auf den 09.07.2018 ein thermisch angetriebener Talabwind (Südwestwind) mit einer Geschwindigkeit von ca. 3 m/s. Am 08.07.2018 wurde kein Talabwind beobachtet, was anhand der schwächeren Stabilität in dieser Nacht erklärt werden kann. Über dem Windcube im Stuttgarter Zentrum wurde während beider Nächte kein thermisch angetriebenes Windsystem beobachtet. Dies mag daran liegen, dass die unterste Messhöhe erst in 60 m über Grund lag.

An beiden Tagen entwickelte sich nach 08:00 UTC mit zunehmender Sonneneinstrahlung eine konvektive atmosphärische Grenzschicht. Aufgrund der damit verbundenen guten Durchmischung herrschte in allen Höhen ein Wind aus nördlicher bzw. nordwestlicher Richtung vor. Am Nachmittag des 09.07.2018 erreichte ein Tiefdrucksystem gegen 16:00 UTC das Messgebiet, was mit der Ausbildung eines starken Nordwestwindes verbunden war.

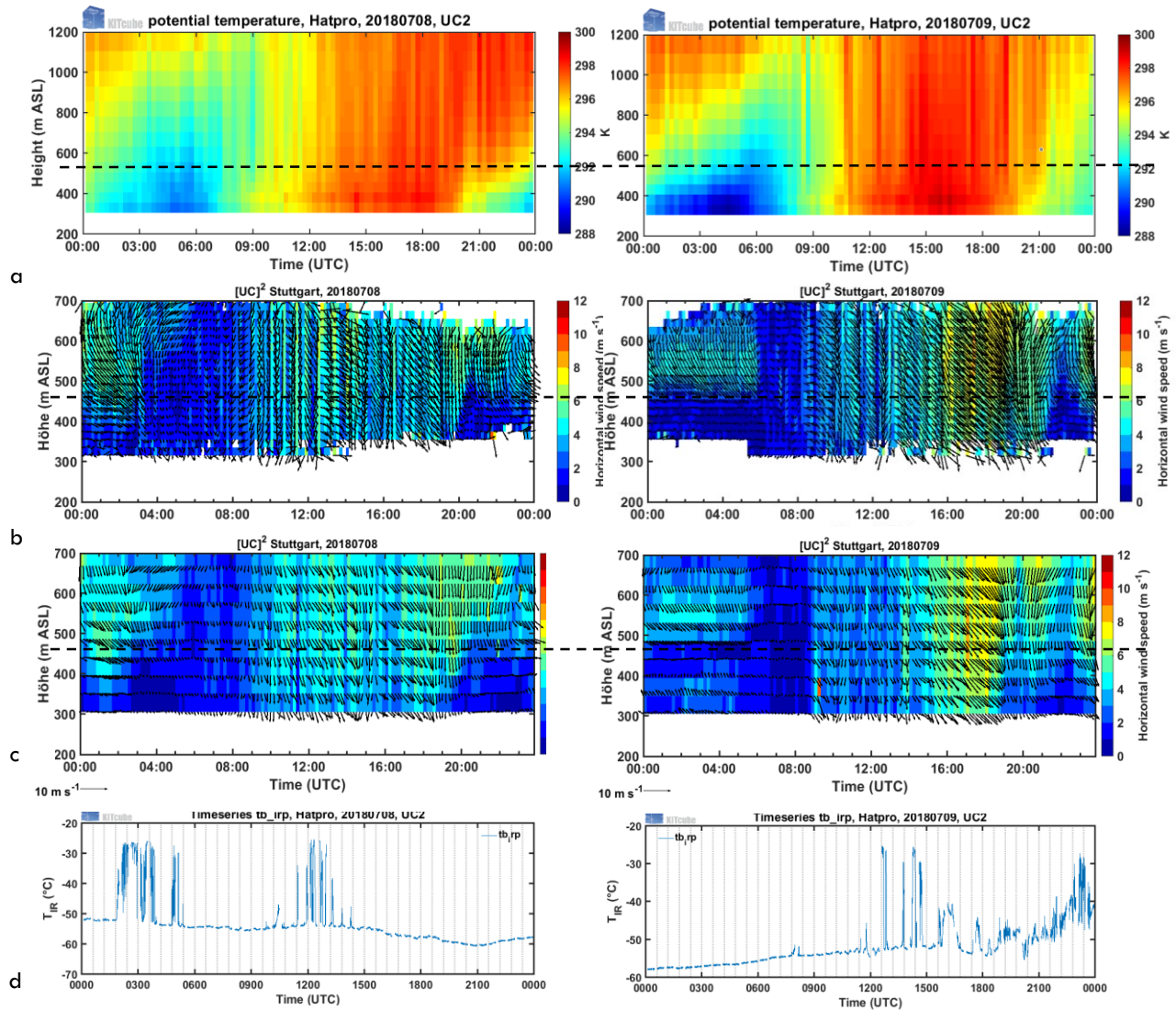


ABBILDUNG 67: (a) Potentielle Temperatur aus HATPRO-Messungen. (b) Horizontalwinde vom Windlidar Windcube. (c) Horizontalwinde an der Feuerwache (mittels virtual-tower-Technik aus drei WSL200 Lidargeräten abgeleitet). (d) Infrarottemperatur aus HATPRO-Messungen. Die gestrichelte Linie zeigt die mittlere Kammhöhe auf 470 m ü. NN. Quelle: Kiseleva et al. (2020).

Flugzeugmessungen

Im Rahmen der Intensivmesskampagne (IOP 4) fand eine Flugzeugmesskampagne mit der DLR Cessna Caravan in Abstimmung mit den Messungen der Projektpartner in Stuttgart und den Überflugzeiten des Satelliten Sentinel-5P statt. Hierzu wurden insgesamt sechs Messflüge über Stuttgart vom 08.-13.07.2018 durchgeführt. Dies erlaubte die dreidimensionale in-situ-Messung der meteorologischen Größen Lufttemperatur, 3D-Wind und Feuchte als auch der Spurengase Ozon, Stickstoffdioxid, Kohlenstoffdioxid und Methan in der urbanen und der Umland-Atmosphäre. Ziel der Messkampagne in Stuttgart war die Vermessung der Entwicklung der verschmutzten Grenzschicht. Es fanden sechs Messflüge an drei Tagen (jeweils vormittags und nachmittags) statt, um Tagesverläufe möglichst gut zu erfassen. Das Flugmuster wurde in Zusammenarbeit mit den Partnern anderer Teilprojekte entwickelt, um die bodengestützten Messungen und Fesselballone und Drohnen in der unteren Grenzschicht möglichst sinnvoll zu ergänzen. Ein rechteckiges Flugmuster, bei dem die südöstliche Seite über den Talkessel von Stuttgart führt und fast alle Bodenmessungen überquert, wurde in verschiedenen Höhen bis zu 3 km über Grund bis zum Überschreiten der Grenzschichthöhe wiederholt (Abb. 68). Ein zusätzlicher Überflug

durch das Neckartal und ein Vertikalprofil in der östlichen Ecke wurden realisiert. Somit konnten wertvolle Daten zur Evaluierung der horizontalen und vertikalen Variabilität in PALM-4U Referenzläufen gewonnen werden.

Bei den Vormittagsflügen waren die Konzentrationen der gemessenen Spurengase über der Stadt im Talkessel deutlich erhöht. Dies ist erkennbar in der Darstellung der Stickstoffdioxid Konzentrationen entlang des Flugweges in Google Earth (Abb. 68). Durch die niedrige Grenzschichthöhe sowie die geringe Durchmischung entstand eine starke Erhöhung über der Stadt (bis zu 30 ppb Stickstoffdioxid; 450 ppm Kohlenstoffdioxid; 2.05 ppm Methan am 09.07.2018), wobei die Konzentrationen mit der Höhe abnehmen. Die Erhöhung von Kohlenstoffdioxid, Stickstoffdioxid und Methan ist korreliert, wie man im zeitlichen Verlauf erkennen kann (Abb. 69). Die Ozon-Konzentrationen sind aufgrund der sogenannten „Ozontitration“, der schnellen Reaktion von Stickstoffmonoxid mit Ozon, antikorreliert. Oberhalb der Grenzschicht (1050 m ü. NN) gab es kaum noch Variationen in den Spurengaskonzentrationen.

Beim Nachmittagsflug wurde das Flugmuster wiederholt. Es zeigte sich eine höhere Grenzschicht (~2200 m) und eine ausgeprägte Durchmischung mit niedrigeren Erhöhungen der Spurengase über der Stadt. Eine Korrelation von Kohlenstoffdioxid, Methan, Stickstoffdioxid und Ozon ist weiterhin vorhanden (Abb. 70).

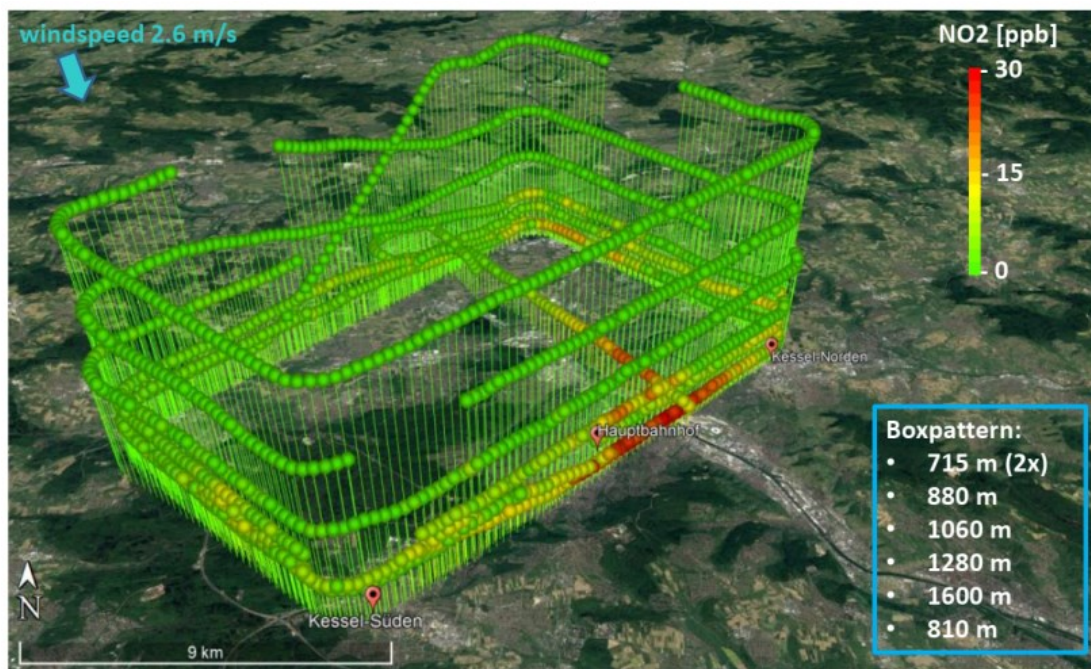


ABBILDUNG 68: Befliegung Stuttgart am 09.07.2018 am Vormittag. Dargestellt sind die in-situ-Stickstoffdioxid-Konzentrationen. In der Box sind Flughöhen und Grenzschichthöhe angegeben. Quelle: Pühl (2019).

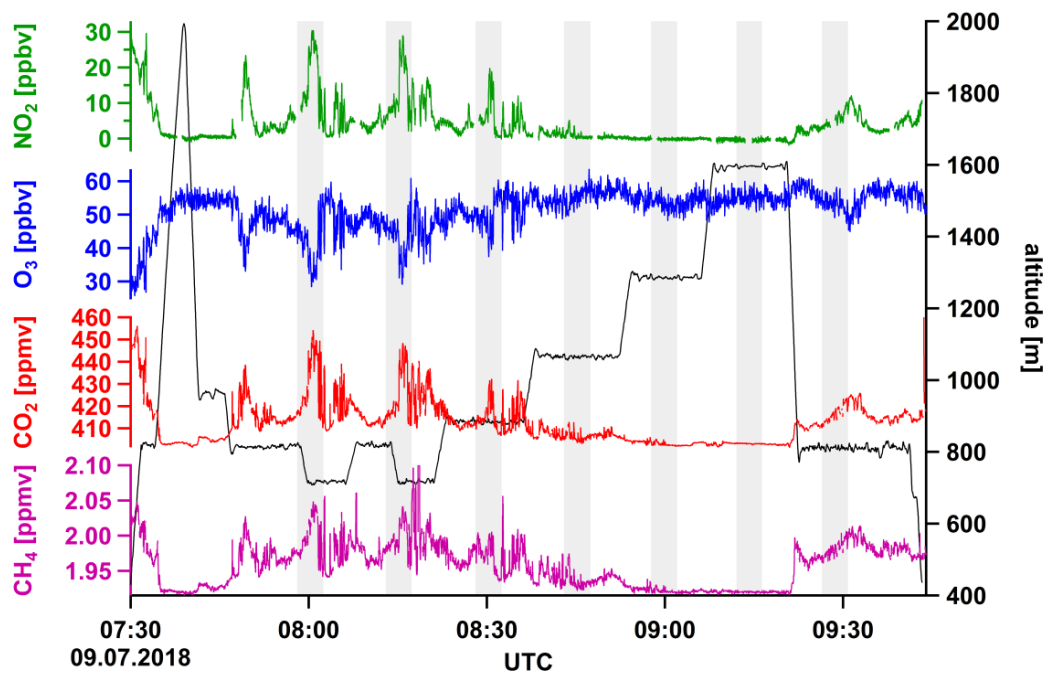


ABBILDUNG 69: Zeitlicher Verlauf der Spurengaskonzentrationen Methan (CH_4), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Ozon (O_3) und Stickstoffdioxid (NO_2) und Flughöhe auf dem Flug am 09.07.2018 am Vormittag über Stuttgart. Die grauen Kästen kennzeichnen den Stadtbereich von Stuttgart. Quelle: Pühl (2019).

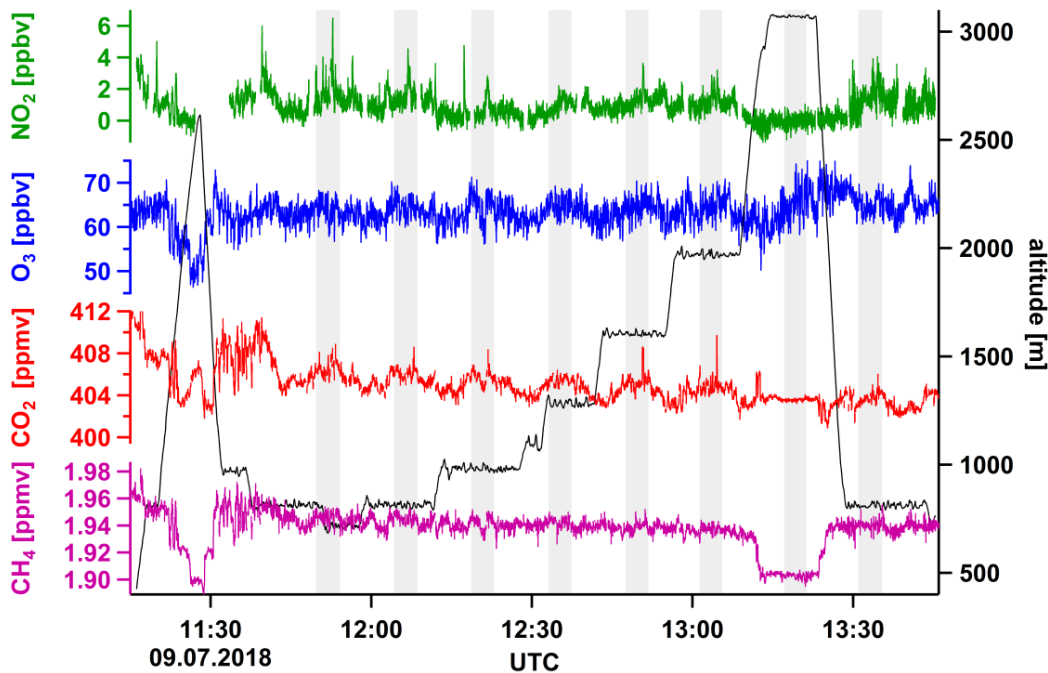


ABBILDUNG 70: Wie Abb. 69, nur für den Nachmittagsflug. Quelle: Pühl (2019).

Die zeitliche Entwicklung der konvektiven Grenzschicht konnte durch wiederholte Profilflüge nachgewiesen werden. Täglich wurden vier Vertikalprofile, zwei bei jedem Flug, durchgeführt. Aus diesen kann die Höhe der Grenzschicht über den Gradienten der potentiellen Temperatur und der Gradienten in Wasserdampf- oder Spurengaskonzentrationen sowie der Windgeschwindigkeit abgeleitet werden. Während des Vormittagsfluges am 09.07.2018 wuchs die Grenzschicht von 890 m beim ersten Profil (07:30 UTC) auf 1050 m beim zweiten

Profil (09:20 UTC) an. Auch über den Nachmittag wuchs die Grenzschicht weiter von 1500 m (11:30 UTC, Abb. 71) auf 2200 m (13:20 UTC) an. Weitere Ergebnisse der Kampagne sind Bestandteil der Masterarbeit von Pühl (2019).

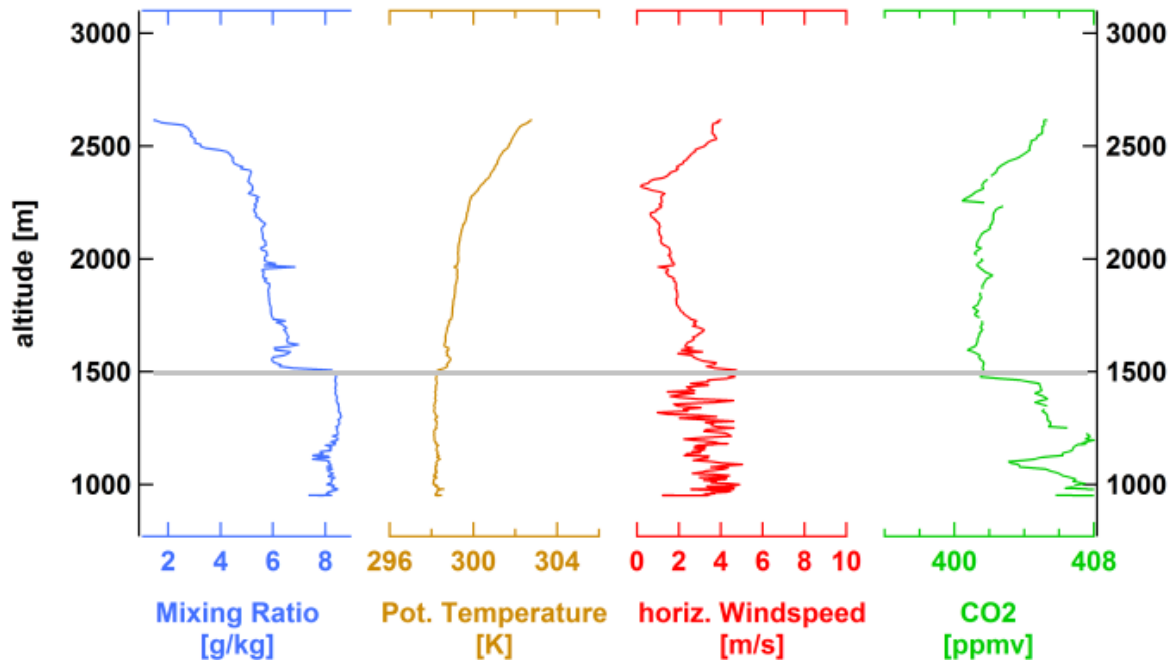


ABBILDUNG 71: Vertikalprofile für das Mischungsverhältnis von Wasser in der Atmosphäre (Mixing Ratio), die potenzielle Temperatur, Windgeschwindigkeit und Kohlenstoffdioxid (CO₂) über Stuttgart am 09.07.2018 um 11:30 UTC. Die Grenzschichthöhe (graue Linie) lag zu diesem Zeitpunkt ungefähr bei 1500 m ü NN. Quelle: Pühl (2019).

Messvergleiche zur Datenharmonisierung

TP6 (FZ Jülich) war zuständig für die Durchführung von Interkalibrationen der Gas- und Partikelphase im Vorfeld der IOPs in Berlin und Stuttgart mit der MobiLab-Analytik als Referenzsystem. Ziel war dabei die Harmonisierung der Resultate verschiedener Messsysteme zur Sicherstellung eines Gesamtdatensatzes bekannter Datenqualität für Modellevaluierungszwecke. Teilnehmer an den Interkalibrationen waren alle Teilprojektspartner, die während der IOPs Spurenstoffmessungen durchführten. Neben der intensiven Erfassung zeitlich und räumlich hochaufgelöster Spurenstoffdaten mittels MobiLab-Messfahrten wurden in allen Kampagnen Interkalibrationen mit den anderen Spurenstoff-Messteams angeboten und durchgeführt.

Die Abb. 72 und 73 zeigen beispielhaft einige Fotos von Messvergleichen aus den IOP 2 und 4. Bei den Interkalibrationen mit TP14 in Berlin auf dem Gelände des Flughafens Schönhagen sind beide Ansaugsysteme 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 durch Eigenemissionen der Messplattformen vermieden werden (Windströmung von rechts).

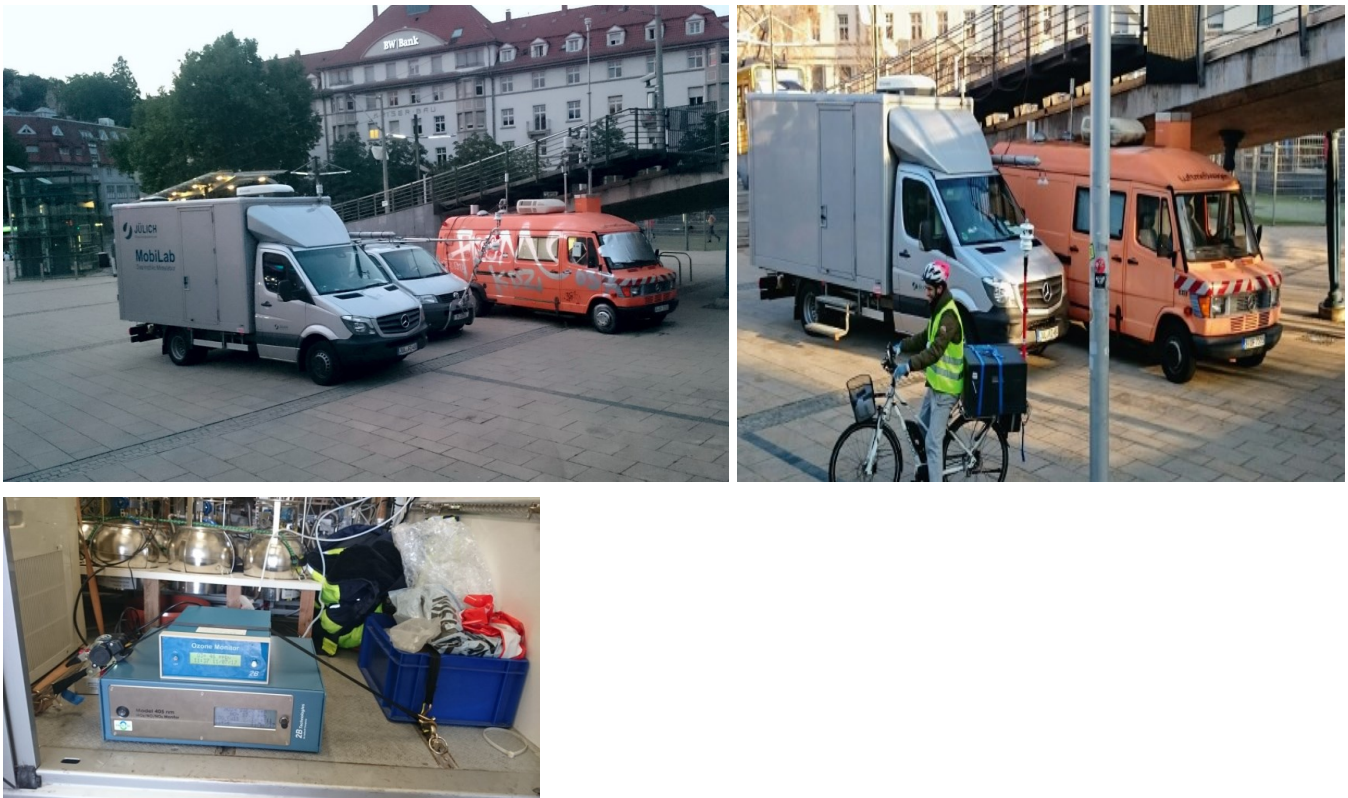


ABBILDUNG 72: Oben links: Messvergleich der Temperatursensoren mit den Messfahrzeugen der Uni Stuttgart und des Deutschen Wetterdienstes (DWD) während der IOP 4 in Stuttgart. Oben rechts: Messvergleich auf dem Stuttgarter Marienplatz: Mobile Fahrrad-Analytik und stationäre Analytik des IFK mit MobiLab-Analytik. Unten links: Außenluft-Vergleich für Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid und Ozon mit TP8 auf dem Gelände des IFK der Uni Stuttgart. Quelle: Klemp et al. (2020).



ABBILDUNG 73: Vorbereitung zum Außenluftvergleich auf dem Flughafen Schönhagen (17.07.2018, IOP 4) zur Datenharmonisierung beider Messsysteme im Kontext der gemeinsamen Untersuchungen (TP14 und TP6) in Stuttgart und in Berlin (Cessna und MobiLab (mobile Bodenstation)). Quelle: Klemp et al. (2020).

Stuttgart ist, bedingt durch seine Kessellage, eine der deutschen Städte mit den größten Luftqualitätsproblemen. Topographisch bedingte Prozesse können diese Probleme aber nicht nur verschärfen, sondern das Stadtklima und die Luftqualität auch positiv beeinflussen. Stuttgart bietet daher die Möglichkeit, die Funktionalität des neuen Stadtklimamodells PALM-4U nicht nur im Hinblick auf relevante meteorologische Größen, sondern zusätzlich in Bezug auf Luftschadstoffe in einem Gebiet mit komplexer Topographie zu testen. Die korrekte Wiedergabe des Einflusses der Topographie in den Modellergebnissen stellt eine zusätzliche Herausforderung für PALM-4U dar. Während der Intensivmesskampagnen wurden zeitliche und räumliche Verteilungen von Luftschadstoffen und Feinstäuben gemessen und in Beziehung zu Berg-Talwinden, Kaltluftabflüssen, dem Aufbau der städtischen Grenzschicht und dem Verkehrsgeschehen gesetzt. Die Ergebnisse, auch jene der Langzeitbeobachtungen, zeigen, dass der Einfluss des Geländes eine wichtige Rolle bei den Ausbreitungsbedingungen für Luftschadstoffe und bei der Belüftung der Stadt durch lokale Windsysteme spielt. Mit dem umfangreichen dreidimensionalen Datensatz lässt sich die Leistung von PALM-4U in komplexem städtischem Gelände bewerten.

TEIL III – VERBUNDÜBERGREIFENDE AUFGABEN

Datenmanagement

Umfassende Daten zu Wetter, Klima und Luftqualität in Großstädten sind bis heute leider nur begrenzt verfügbar. Im Rahmen der Verbundarbeit wurden daher bereits verfügbare Daten aufbereitet, neue bzw. fehlende Daten mittels Langzeitbeobachtungen (LTO) und Intensivmesskampagnen (IOP) erhoben sowie mit numerischer und physikalischer Modellierung erzeugt. Im Ergebnis liegt damit eine enorme Vielfalt und Menge an Daten vor, die auf unterschiedlichen Messverfahren und Modellierungen beruhen. Zusätzlich entstehen bei der Modellierung mit PALM-4U große Datenmengen. Um den Austausch von Beobachtungs- sowie Modelldaten z.B. für die Modellevaluierung zwischen den Projektpartnern zu unterstützen, wurde in Zusammenarbeit der [UC]² Verbünde 3DO und MOSAIK ein gemeinsames Datenmanagement entwickelt.

Das Datenmanagement soll eine effektive und effiziente Nutzung und Verwaltung der Daten sowohl für die Evaluierung von PALM-4U als auch für die Forschung ermöglichen (siehe Scherer et al. 2019b). Dies ist nur auf der Basis eines modulübergreifenden, einheitlichen Datenstandards sowie durch die Nutzung eines Datenmanagementsystems (DMS) als zentrale Ablage für modulspezifische und programmweite Datensätze möglich. Die eigens gegründete Arbeitsgruppe (AG) Datenmanagement legte daher Richtlinien für die Nutzung der Daten ([UC]² Datennutzungsrichtlinien) fest, entwickelte einen einheitlichen Datenstandard mit verbindlichen Konventionen für Daten und Metadaten (siehe [UC]² Datenstandard) und unterstützte das TP13 (GEO-NET) bei der Erstellung eines DMS. Die AG Datenmanagement bestand aus Projektpartnern aller Module des [UC]² Programms.

Die [UC]² Datennutzungsrichtlinien, der Datenstandard in deutscher und englischer Sprache sowie die Datenstandard-Tabellen sind über die Webseiten von 3DO und [UC]² verfügbar⁹.

[UC]² Datennutzungsrichtlinien

Die Richtlinien zur Nutzung der Daten wurden in sieben unterschiedlichen Datenlizenzen niedergelegt (siehe Tab. 3), um den unterschiedlichen, internen Nutzungsregelungen der beteiligten Institutionen und Projektpartner Rechnung zu tragen. Die [UC]² Datennutzungsrichtlinien sind während der gesamten Laufzeit des Programms gültig und bleiben auch nach dessen Ende für alle in [UC]² erhobenen Daten bestehen. Ein auf das programminterne DMS hochgeladener Datensatz besitzt eine dieser Lizenzen. Entsprechend der Lizenz kann der Datensatz entweder nur von einem der Teilprojekte, von einem Modul oder auch modulübergreifend (also innerhalb des Programms) oder öffentlich genutzt werden (Zugangsrechte und Zugangsbeschränkungen, siehe Abb. 74).

⁹ www.uc2-program.org/datenmanagement

TABELLE 3: Übersicht der Datennutzungsrichtlinien im [UC]² Programm.

Lizenztyp	Gültigkeit	Datennutzung
[UC]² Open Licence	Allgemein	Freie Nutzung der Daten erlaubt.
[UC]² Research Licence	Forschung	Daten nutzbar für nichtkommerzielle Zwecke. Für kommerzielle Nutzungen muss die Genehmigung des Eigentümers der Daten eingeholt werden.
[UC]² Restricted Licence	Programm	Nur für Mitglieder des [UC] ² Programms.
MOSAIK Licence	Modul A	Nur für Mitglieder des MOSAIK Verbundes, die eine Kooperationsvereinbarung der MOSAIK Partner sowie mit dem Deutschen Wetterdienst unterzeichnet haben.
3DO Licence	Modul B	Nur für Mitglieder des 3DO-Verbundes, die eine Kooperationsvereinbarung der 3DO-Partner sowie mit dem Deutschen Wetterdienst unterzeichnet haben.
KliMoPrax Licence	Modul C - KliMoPrax	Nur für Mitglieder des KliMoPrax Verbundes, welche eine Kooperationsvereinbarung der KliMoPrax Partner sowie mit dem Deutschen Wetterdienst unterzeichnet haben.
UseUCLim Licence	Modul C - UseUCLim	Nur für Mitglieder des UseUCLim Verbundes, welche die Kooperationsvereinbarung der UseUCLim Partner unterzeichnet haben.

Die [UC]² Research Licence (Forschungslizenz) oder die [UC]² Open Licence (Offene Lizenz) wurde allen Projektpartnern des Programms empfohlen, da das BMBF mit dem Programm eine offene Datenpolitik verfolgt. Die beiden Lizenzen erlauben die freie Nutzung der Daten für Forschungszwecke (Research Licence) bzw. eine öffentliche Nutzung z.B. für beliebige Anwendungsfälle (Open Licence). Langfristig und nach Ende des Programms können Datensätze mit diesen Lizenzen über frei zugängliche Datenportale der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden (Abb. 73). Die Nutzer des programminternen DMS und später auch der öffentlichen Datenportale sind verpflichtet, der angegebenen Datenlizenz zu folgen.

Zusätzlich zu den in Modul B erhobenen Messdaten werden für Simulationen mit PALM-4U auch sogenannte statische Eingangsdaten wie Informationen zur Topographie des Geländes, zu den Gebäudegeometrien und Eigenschaften oder zur Vegetation (z.B. Baumkataster) benötigt. Diese Eingangsdaten werden von Modul C zur Verfügung gestellt und als interne Daten betrachtet, die nicht dem [UC]² Datenstandard folgen müssen.

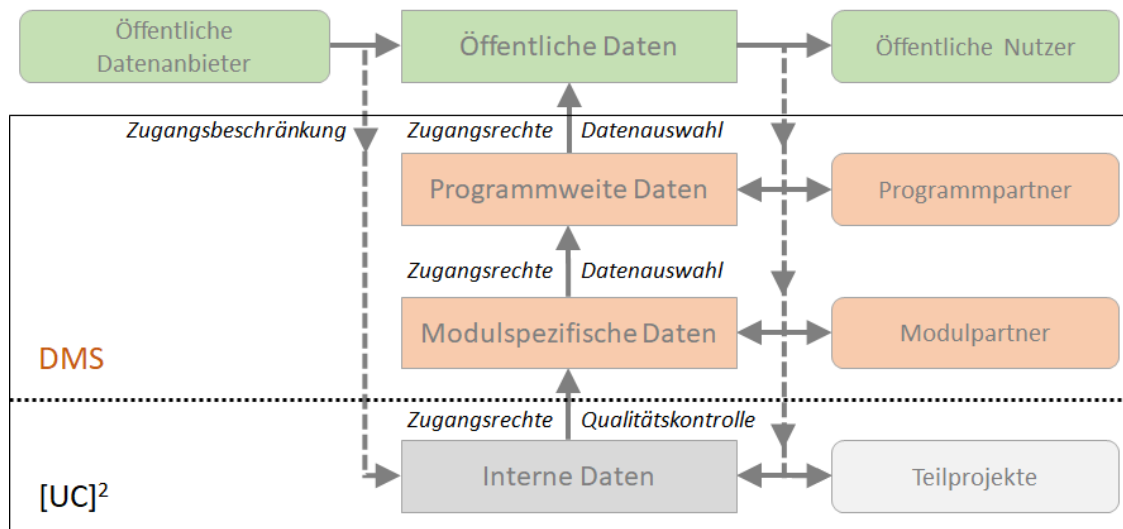


ABBILDUNG 74: Datenbereitstellung und Nutzungsmöglichkeit entsprechend der vorliegenden Datennutzungsrichtlinie. Modifiziert nach Scherer et al. (2019b).

[UC]² Datenstandard

Die Verwendung eines einheitlichen Datenformates sowie verbindlicher Konventionen für Daten und Metadaten ist Voraussetzung für eine effektive und effiziente Verwaltung aller Daten im DMS sowie für die Entwicklung und Bereitstellung innovativer Werkzeuge zur Analyse und Visualisierung der komplexen und vielfältigen Daten.

Der [UC]² Datenstandard berücksichtigt sowohl die Anforderungen von PALM-4U als auch jene, die aufgrund der unterschiedlichen Beobachtungsmethoden zur Gewinnung der Messdaten in 3DO entstehen. Es muss sichergestellt werden, dass die Daten und Metadaten nicht nur vollständig sind, sondern auch zwischen den Modulen ohne weitere Datenkonvertierung ausgetauscht und genutzt werden können. Nicht zuletzt sollen die Projektpartner des Moduls C (KliMoPrax und UseUCLim) sowie deren Praxispartner ohne spezifisches Detailwissen in der Lage sein, Modell- und Beobachtungsdaten für unterschiedliche Anwendungen nutzen zu können. Obwohl der [UC]² Datenstandard für die spezifischen Anforderungen des [UC]² Programms entwickelt wurde, sind die Festlegungen so getroffen worden, dass eine Übertragung auf andere Städte, Forschungsprojekte und Anwendungen möglich ist. Darüber hinaus können Datensätze, die dem [UC]² Datenstandard folgen, nicht nur über das DMS, sondern auch über andere Datenportale bereitgestellt werden.

Sämtliche Messdaten werden im offen zugänglichen Format NetCDF über das DMS allen Projektpartnern bereitgestellt. Der [UC]² Datenstandard folgt den NetCDF Climate and Forecast (CF) Metadata Conventions Version 1.7¹⁰ sowie den Cooperative Ocean/Atmosphere Research Data Service (COARDS¹¹) Konventionen. Zur automatisierten Überführung der Daten in den [UC]² Datenstandard wurden Routinen in den Programmiersprachen R, IDL und Python entwickelt und zur Unterstützung der Projektpartner in die programminterne Plattform (Knowledge Base) für den Informations- und Wissensaustausch eingestellt. Der Datenstandard wurde und wird auch weiterhin stetig weiterentwickelt. Die aktuelle Version in deutscher und englischer Sprache ist der Programm Webseite¹² zu entnehmen.

Gemäß den vom BMBF vorgegebenen Richtlinien werden in [UC]², sofern es die Daten erlauben, die Datensätze im offenen Datenformat NetCDF (Network Common Data Form) gespeichert. Bei NetCDF handelt es sich um ein selbsterklärendes, maschinenunabhängiges Datenformat, das die Erstellung, den Zugriff und

¹⁰ www.cfconventions.org/Data/cf-conventions/cf-conventions-1.7/cf-conventions

¹¹ <http://ferret.pmel.noaa.gov/Ferret/documentation/coards-netcdf-conventions>

¹² www.uc2-program.org/datenmanagement

den Austausch von in Datenfeldern geordneten, wissenschaftlichen Daten unterstützt. Es ist weltweit verbreitet und bietet eine Vielzahl offener, kostenloser Schnittstellen und Anwendungen für den Umgang mit Daten an. NetCDF bietet bei der in [UC]² bestehenden Datenvielfalt den entscheidenden Vorteil, dass unterschiedlichste Daten und Metadaten gespeichert werden können. Für viele Messgrößen sind in der neuesten Konvention für NetCDF- Dateien, der NetCDF Climate and Forecast (CF) Metadata Conventions Version 1.7 (CF-1.7¹³) bereits einheitliche Standardnamen und Einheiten definiert. Für alle weiteren Messgrößen wurden analog dazu Festlegungen getroffen, die sich u. a. an den Standardisierungen der BMBF-Fördermaßnahme „Wolken und Niederschlag im Klimasystem - HD(CP)²⁴“ orientieren.

Damit alle Teilprojekte die Einträge für den jeweiligen Inhalt der Datei (z.B. Messgröße, Institutionsnamen oder Standort der Messstation) in das DMS einheitlich durchführen, wurden die [UC]² Datenstandard-Tabellen A1 -A4 entwickelt (Tab. 4) sowie eine Anleitung zur Erstellung der Einträge in diese Tabellen erarbeitet (Anleitung [UC]² Datenstandard-Tabellen A1 - A4).

TABELLE 4: Datenstandard-Tabellen und Inhalte.

Tabelle	Inhalt	Einträge
A1	Variable	Messgröße, Messkampagne, Variablenname, Einheit
A2	Variablen Kategorie	Es werden mehrere Variablen in einer Gruppe organisiert (z.B. mehrere Luftschadstoffe)
A3	Akronym	Datenerheber bzw. die für den Eintrag verantwortliche Institution
A4	Ort	Messstandort, Modelldomäne, Standortbeschreibung, Adresse, Akronym

Die Tabelleneinträge dienen dazu, beim Hochladen von Daten und Metadaten in das DMS, deren Attribute zu überprüfen. Ein Attribut entspricht einer Eigenschaft, einem Merkmal oder Informationsdetail, das konkreten Daten bzw. einem spezifischen Datensatz zugeordnet und beschrieben wird. Stimmen die Attribute nicht mit dem entsprechenden Eintrag in den [UC]² Datenstandard-Tabellen A1 - A4 überein, so können diese Daten nicht in das DMS hochgeladen werden (Prüfung auf Konformität). Auf diese Weise wird die Einhaltung des Datenstandards modulübergreifend gewährleistet.

Bei Bedarf (z.B. der Einführung neuer Messgrößen) werden die Datenstandard-Tabellen aktualisiert und erneut in das DMS eingepflegt. Einmal veröffentlichte Tabelleneinträge dürfen weder geändert noch gelöscht werden, damit bereits erzeugte NetCDF-Dateien gültig bleiben, sowie die Kontinuität und Nachvollziehbarkeit für weitere wissenschaftliche Studien und Anwendungsfälle gewährleistet ist.

[UC]² Datenmanagementsystem

Das Datenmanagementsystem (DMS) ist eine Plattform auf der Daten für den modulinternen sowie den modulübergreifenden Austausch unter Berücksichtigung der [UC]² Datennutzungsrichtlinien zur Verfügung stehen.

Das DMS wurde von der Firma GEO-NET (TP13) in enger Zusammenarbeit mit der Firma IDU IT+Umwelt GmbH und Unterstützung von der TU Berlin (TP1) auf der Basis der Software Cardo entwickelt. Cardo ist

¹³ www.cfconventions.org

ein lizenziertes Produkt der IDU IT+Umwelt GmbH und wurde für die ausschließliche Verwendung in Projektphase 1 von [UC]² als lizenzfreie Version kostenlos allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Intensive Tests zum Austausch großer Datenmengen und zur Konformitätsprüfung der Daten mit dem [UC]² Datenstandard sicherten die Funktionalität des DMS. Im DMS eingestellte Metadaten und Daten konnten ohne weitere Bearbeitung zwischen den Partnern ausgetauscht werden.

Da die Software Cardo zum Ende der Phase 1 nicht in eine Open Source Anwendung überführt werden konnte, sind keine Änderungen zur Weiterentwicklung des DMS möglich und ein dauerhafter Zugriff auf die Software ist nicht gewährleistet. Entsprechend den Anforderungen des BMBF müssen die Daten jedoch nach dem Ende von [UC]² auf öffentlich zugänglichen Datenportalen zur Verfügung stehen. Auch der Zugriff auf die Daten muss mit frei verfügbaren und sowohl in der Praxis als auch in der Wissenschaft üblichen Programmen bzw. Software-Routinen möglich sein. Aus diesen Gründen wird in Projektphase 2 (Start Oktober 2019) die Entwicklung und Operationalisierung eines Datenportals, das auf Open Source Software basiert und öffentlichen Zugang zu den Daten bietet, verfolgt.

Der neu entwickelte [UC]² Datenstandard beinhaltet ein einheitliches Datenformat sowie verbindliche Konventionen für Daten und Metadaten. Dies ist die Voraussetzung für eine effektive und effiziente Verwaltung aller Daten in einem Datenmanagementsystem, das eine Plattform für den modulübergreifenden Austausch von Daten nach den [UC]² Datennutzungsrichtlinien darstellt und zukünftig in ein öffentlich zugängliches Datenportal überführt werden kann. So können langfristig umfassende Wetter- und Stadtklimadaten der Wissenschaft und Praxis frei zur Verfügung gestellt werden.

Modellevaluierung

Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit, der Unsicherheiten sowie der Anwendungsbereiche von PALM-4U sind die Programmpartner der Module A (MOSAİK) und B (3DO) verantwortlich. Um dieser Aufgabe gerecht zu werden, wurde eine modulübergreifende Arbeitsgruppe (AG) Modellevaluierung gegründet. In der AG mussten beispielweise folgende Fragen geklärt werden: Inwieweit kann das Modell die gemessen bzw. beobachteten Größen reproduzieren? Welche systematischen und statistischen Fehler ergeben sich in Raum und Zeit? Werden physikalische Prozesse wie z.B. die Energiebilanz richtig gelöst? Welches Vertrauen haben wir in die Modellergebnisse? In AG-Treffen und bilateralen Gesprächen wurde nicht nur das Konzept zur Modellevaluierung entwickelt, sondern auch der inhaltliche und zeitliche Ablauf der Modellevaluierung koordiniert. Partner des Moduls C wurden ebenso in die AG eingebunden.

Bei der Modellevaluierung sind verschiedene Begrifflichkeiten und deren Bedeutung zu beachten. Die Modellvalidierung zielt darauf ab, die Genauigkeit eines Modells zu bewerten, d.h. Abweichungen zwischen Ergebnissen aus Modellsimulationen und Referenzdaten aus Beobachtungen oder physikalischen Experimenten (z.B. Messungen im Windkanal) zu quantifizieren. Unter dem Begriff Evaluierung versteht man die Bewertung eines Modells und dessen Programmierung hinsichtlich seiner Genauigkeit. Die Evaluierung beinhaltet ebenfalls die Überprüfung der Güte der Modellansätze sowie die Eignung der im Modell verwendeten Vereinfachungen und Parametrisierungen. Alle für den Modellzweck relevanten Phänomene müssen durch das Modell erfassbar sein. Im Hinblick auf die Belastbarkeit der Modellergebnisse ist die Bestimmung der Anwendungsgrenzen des Modells essentiell. Das Modell sollte darüber hinaus seinen Zweck so erfüllen, dass die Anwender es im Rahmen ihrer Möglichkeiten einsetzen können.

Hierzu wird ein strukturierter Vergleich von Modellergebnissen mit Beobachtungsdaten auf der Basis statistischer Analysen ausgewählter atmosphärischer Größen durchgeführt. Ziel ist es, den Unterschied zwischen den Modellergebnissen und den ausgewählten Referenzdatensätzen zu identifizieren und zu quantifizieren, um Hinweise darauf zu erhalten, wie gut das Modell mit den Referenzdaten übereinstimmt. Die Genauigkeit entspricht dem Ausmaß der Übereinstimmung zwischen einem zu beurteilenden Wert (z.B. aus einer Simulation mit PALM-4U) und einem Bezugswert (z.B. einer Messgröße aus dem Referenzdatensatz). Eine Quantifizierung der Unsicherheit der Modellergebnisse sollte in diesem Zusammenhang ebenfalls erstellt werden. Dabei wird geprüft mit welcher Genauigkeit ein Programm (Software) innerhalb des formalen Anwendungsbereichs des Modells die Phänomene beschreibt, die es zu modellieren vorgibt. Die Verifikation schließlich ist die Bestätigung dafür, dass der Programmcode dem Modell (z.B. PALM-4U) entspricht und ist daher die Aufgabe von Modul A.

Die Evaluierung von PALM-4U erfolgt auf der Basis der VDI-Richtlinie 3783/9 (VDI, 2017) und dem CEDVAL-LES-Ansatz, entwickelt von der COST-Aktion 732 (Franke et al., 2011). Zusätzlich werden die Simulationsergebnisse mit Daten aus Windkanal-Experimenten und Ergebnissen aus Simulationen mit anderen Modellen (z.B. SOLWEIG, ENVI-met, MUKLIMO_3 usw.) verglichen.

Ein gemeinsamer Nenner bei der Qualitätssicherung ist bei den verschiedensten und komplexen Instrumenten, die in 3DO eingesetzt wurden nicht möglich, daher sind die TP jeweils selbst für die Qualitätssicherung ihrer Messdaten zuständig. Möglichkeiten der Qualitätssicherung sind bi- und multilaterale Vergleichsmessungen, gemeinsame Kalibrationen der Messinstrumente der Projektpartner in der Klimakammer des Fachgebiets Klimatologie der TU Berlin sowie bei Windmessgeräten im Windkanal von der Universität Hamburg. Trotzdem bleiben quantitative Ungenauigkeiten der Messinstrumente (z.B. Trägheit des Instruments) und der jeweiligen Messbedingungen (z.B. Repräsentativität der Messung) bestehen. Für genauere Informationen zur Qualitätssicherung der Daten sei auf den Evaluierungsbericht von 3DO verwiesen, der vor Abschluss der Projektphase 2 veröffentlicht wird.

Abb. 75 zeigt den Daten- und Informationsfluss während der Evaluierung von PALM-4U. Die Projektpartner von Modul A führen technische und Plausibilitätsprüfungen einzelner PALM-4U-Komponenten durch, in deren Folge eine getestete Modellversion vorliegt. Die Prüfungen beinhalten z.B. Software-Routinen zur Parametrisierung thermodynamischer Prozesse (Strahlung, Energiebilanz an der Oberfläche, Grenzschichtprozesse usw.) sowie für Berechnungen der Luftchemie (z.B. Stickstoffoxide, Feinstaub). Jedes Modul liefert spezifische Eingangsdaten für eine Simulation mit PALM-4U. Modul A gibt die atmosphärischen Randbedingungen (Antriebsdaten des Modells) für die Simulation vor, während 3DO die Messstandorte der Referenzdatensätze (z.B. Koordinaten der Stationen, Messzeiten) zur Verfügung stellt. Alle Daten, die zur Evaluierung herangezogen werden, liegen qualitätsgesichert im [UC]² Datenstandard vor (Scherer et al., 2019c). Die Module A und C liefern statische Eingangsdaten wie z.B. Gebäudehöhen und -längen, Vegetationshöhen und -dichten sowie Geländemodelle.

3DO zieht zur Evaluierung der Modellergebnisse qualitätsgesicherte Referenzdatensätze für atmosphärische und lufthygienische Größen heran. Diese wurden aus bestehenden LTOs aufbereitet und mit neuen LTOs sowie in Windkanalexperimenten als auch während der IOPs erhoben. Bereits zum Testen von PALM-4U eingesetzte Daten werden nicht für die Evaluierung verwendet. Im Anschluss an die Evaluierung spiegelt 3DO die Ergebnisse an Modul A zur Bewertung und falls notwendig zur Verbesserung des Modells zurück. Der Vorgang der Evaluierung wird in enger Abstimmung mit Modul A wiederholt bis eine neue Version von PALM-4U hinreichend gute Ergebnisse liefert. Dies ist der Fall, wenn die Ergebnisse einer Modellrechnung im Rahmen vorgegebener Abweichungen mit den Referenzdatensätzen oder anderen Modellergebnissen übereinstimmen. Bei einer positiven Evaluierung liegt im Anschluss eine evaluierte Modellversion von PALM-4U vor.

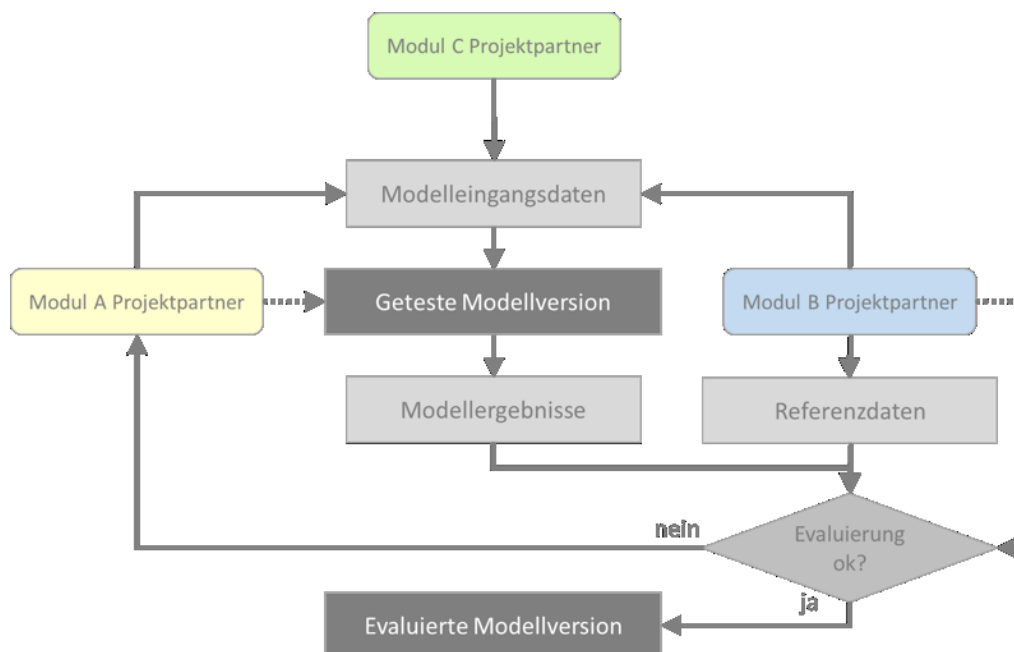


ABBILDUNG 75: Das Schema illustriert den Daten- und Informationsfluss für die Prüfung und allgemeine Evaluierung von PALM-4U. Durchgezogene Linien zeigen den Daten- und Informationsfluss. Gepunktete Linien geben die jeweiligen Partner an, die Modellsimulationen und Evaluierungsroutinen durchführen.

3DO konzentriert sich bei der Modellevaluierung auf nach stadtklimatischen Gesichtspunkten ausgewählten Modellsimulationen, und bezieht daher alle für das städtische Wetter und Klima sowie für die Luftqualität relevanten räumlichen Skalen mit ein. Im spezifischen Fokus steht die Evaluierung der Prozesse der Thermodynamik und der Dynamik der Atmosphäre (Tab. 5). Zusammen mit LTO- und IOP-Daten sowie mit Satelliten- und Flugzeug-Daten soll gleichzeitig eine Analyse stadtweiter atmosphärischer Prozesse (Meso- bis Lokalskala) eine Analyse von Prozessen in Stadtvierteln, Straßenschluchten sowie rund um Gebäude (Lokal- bis Mikroskala) erfolgen.

Im Evaluierungskonzept der ersten Phase (siehe Tab. 5) ist vorgesehen, dass Simulationen für die gesamten Stadtregionen von Berlin und Stuttgart in einem Modellraster von 10 m bzw. feiner durchgeführt werden. Die Simulationen liefern Tagesgänge für die eigentlichen Messdatenvergleiche und die Evaluierung. Zusätzlich wird für Berlin noch die Nesting-Option von PALM-4U (Maronga et al. 2019) für Simulationen mit sehr hoher räumlicher Auflösung von 1 m oder feiner in den Gebieten der Intensivbeobachtungsstandorte eingesetzt. In den IOLs besteht eine hohe räumliche und zeitliche Datendichte, da diese Gebiete von den 3DO-Partnern durch LTO- und/oder IOP-Messungen umfassend untersucht wurden (Scherer et al., 2019). PALM-4U erfordert für räumlich hoch aufgelöste Simulationen sehr detaillierte und genaue Eingangsdaten für die Anfangs- und Randbedingungen einer Simulation.

Für Hamburg wird ein sogenannter Idealfall simuliert. In Idealfällen werden die Randbedingungen je nach Ziel der Untersuchung festgelegt. Die Randbedingungen müssen nicht einer aktuellen Wettersituation entsprechen, sondern können repräsentativ für eine bestimmte Wettersituation sein (z.B. strahlungsreicher Sommertag). Bei Realfallsimulationen wie für Stuttgart und Berlin wird das Modell mit äußeren atmosphärischen Randbedingungen, die aus dem Regionalmodell COSMO-DE stammen und den atmosphärischen Bedingungen im Zeitraum der festgelegten Referenzdatensätze entsprechen, initialisiert und angetrieben. Nach einer bestimmten Einschwingzeit (Atmosphären-Spinup) des Modells haben sich die von dem gröberen Gitter von COSMO-DE beeinflussten atmosphärischen Zustände an die feiner aufgelösten Strukturen (z.B. Gebäude, Vegetation) in PALM-4U angepasst und können zur Evaluierung herangezogen werden. Die hochauflösenden Simulationen werden im sogenannten LES (Large Eddy Simulation) Modus durchgeführt, die stadtweiten Simulationen entweder im RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) oder im LES Modus.

TABELLE 5: Vereinbarte Simulationen zur Evaluierung von PALM-4U.

	Berlin			Hamburg	Stuttgart
Gebiet	TU Campus	Rothenburg	gesamt	HafenCity Uni	gesamt
Winter	1 m	1 m	10 m	-	10 m
Sommer	1 m	1 m	10 m	-	10 m
Zeit	24 h + Atmosphären-Spinup (6 h)			<12 h	≥24 h
Modus	LES			LES	LES (ggf. RANS)
Simulation	Realfall			Idealfall	Realfall
Prozess	Thermodynamik			Dynamik	Thermodynamik

Für Berlin und Stuttgart wurden jeweils Zeiträume für die durchzuführenden Simulationen festgelegt. Hierbei musste die Datenlage, basierend auf den IOPs, ausreichend für die Modellevaluierung im Hinblick auf Quantität, Qualität und Diversität der Daten sein, damit die Evaluierung unter Berücksichtigung verschiedener Anforderungen an das Modell möglich ist. Gleichzeitig müssen adäquate atmosphärische Randbedingungen geherrscht haben, da sich aufgrund der Modellphysik von PALM-4U Einschränkungen der zur Evaluierung geeigneten Wetterlagen ergeben (z.B. Schneefall und Schneedecke auf dem Untergrund). Die in den festgelegten Zeiträumen erhobenen Messdaten wurden als Referenzdatensätze mit der Bezeichnung VALR und einer Nummerierung von 01 bis 06 entsprechend des ausgewählten Simulationszeitraums gekennzeichnet und qualitätsgeprüft in das DMS eingestellt.

Die Zeiträume für die Evaluierung müssen zudem die für die Simulationen benötigte Rechenzeit von PALM-4U sowie die zur Verfügung stehende Rechenkapazität berücksichtigen. Sowohl der Simulationszeitraum als auch die erforderlichen Rechenkapazitäten sollten so gering wie möglich gehalten werden, dabei jedoch den Anforderungen an eine Evaluierung genügen.

Für die Modellevaluierung wurden die Daten folgender Zeiträume als Referenzdaten ausgewählt:

VALR01: 17.01.2017 06:00 UTC bis 18.01.2017 06:00 UTC (Winter 2017 Berlin)

VALR02: 16.07.2018 06:00 UTC bis 18.07.2018 06:00 UTC (Sommer 2018 Berlin)

VALR03: 14.02.2017 06:00 UTC bis 16.02.2017 06:00 UTC (Winter 2017 Stuttgart)

VALR04: 08.07.2018 04:00 UTC bis 09.07.2018 19:00 UTC (Sommer 2018 Stuttgart)

VALR05: Idealfall* (Hamburg)

VALR06: 30.07.2017 06:00 UTC bis 01.08.2017 06:00 UTC (Sommer 2017 Berlin)

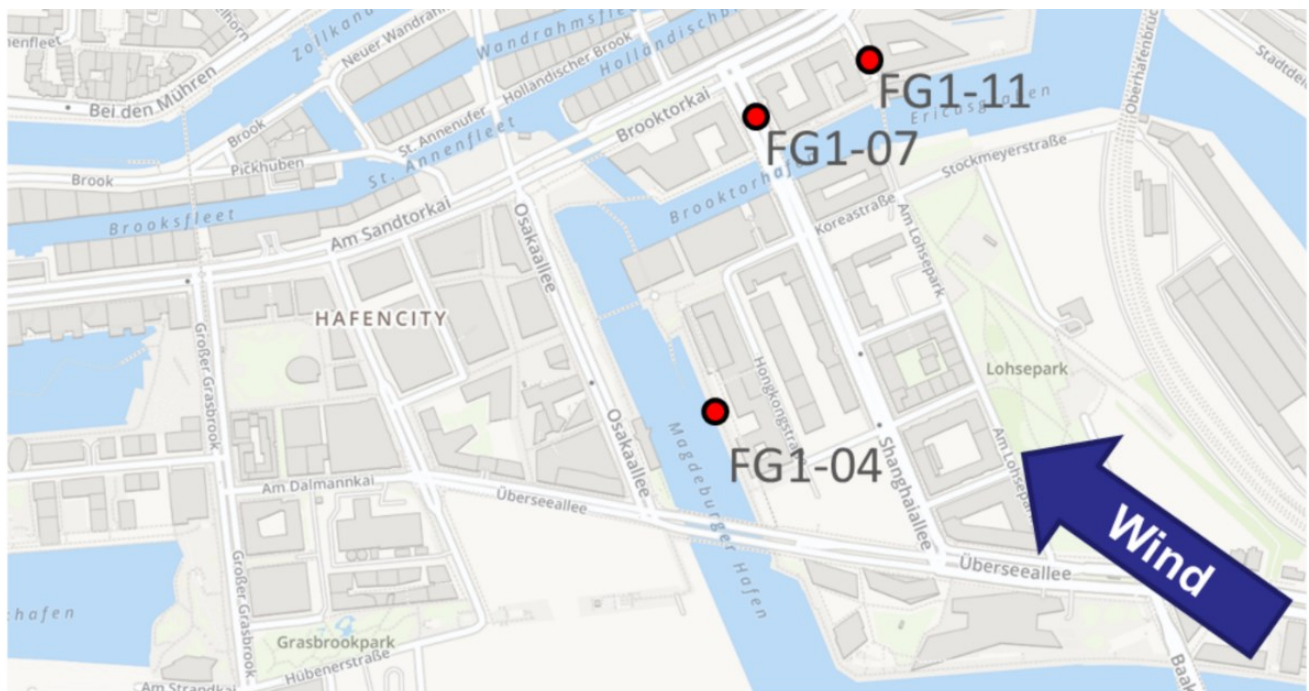
Sofern möglich, werden Modell und Referenzdaten normiert. Da PALM-4U ein LES-Modell ist, dürfen für die Validierung nicht nur Mittelwerte für verschiedene Zeitintervalle (z.B. Minutenwert, 30-Minutenwert, Stundenwert) abgespeichert werden (gilt für Modell- und Messdaten), da sonst keine Turbulenz in der Atmosphäre abgebildet werden kann.

Referenzdaten und Simulationsergebnisse werden dann auf systematische und statistische Fehler geprüft und statistische Größen wie die Trefferquote oder Skill Scores als Grundlage für die Bewertung der Modellqualität berechnet. Die für die Evaluierung eingesetzten statistischen Verfahren sollen sich an der jeweiligen Messgröße orientieren. Für Messdaten der Luftqualität (z.B. Stickstoffdioxid-Konzentration) ist beispielsweise die Standardabweichung beim Vergleich von Referenzdaten zu Modellergebnissen nicht geeignet.

Abweichungen zwischen den Modellergebnissen und den Referenzdaten werden je nach Messgröße, Fehler und Unsicherheiten in den Referenzdaten bewertet. Dabei werden spezifische Anforderungen an die Modellgenauigkeit berücksichtigt. Die Bewertung beinhaltet zudem eine qualitative Diskussion der anwendungsspezifischen Anforderungen an die Modellgenauigkeit. Ein komplexes Problem bei der Bewertung stellen die verschiedenen Fehlerquellen und deren Einschätzung, wie beispielsweise Fehler bei Eingabe- oder Referenzdaten sowie Mängel von PALM-4U, dar. Die Interpretation der Ergebnisse der Modellevaluierung soll zunächst innerhalb der einzelnen TPs erfolgen, danach werden diese TP-übergreifend und anschließend in der AG Modellevaluierung diskutiert. Details zur Evaluation von PALM-4U können dem Evaluierungsbericht von 3DO entnommen werden, der im Laufe der zweiten Programmphase veröffentlicht wird.

Das Potenzial von PALM-4U zeigt zudem die erste, im Verbund gemeinsam mit den Modellentwicklern durchgeführte Validierung zur Strömungsdynamik von PALM-4U im Untersuchungsgebiet Hamburg HafenCity. Der gesamte Datensatz umfasst insgesamt mehr als 4000 Windmessungen – sowohl im Windkanalversuch als auch in der Modellsimulation – an verschiedenen Messorten für variierte Bebauungsstruktur und wechselnde mittlere Windrichtungen. Für die in Abb. 76 markierten Messstandorte werden exemplarisch einige typische Ergebnisse des Datenvergleichs vorgestellt. Die Komponenten des mittleren Horizontalwindes in der PALM-4U Simulation stimmen sehr gut mit den Messdaten aus dem Modellversuch überein. Die turbulenzauflösenden Referenzdaten aus den Naturmessungen gestatten ebenso den Vergleich der Turbulenzcharakteristika. In Abb. 77 ist entsprechend beispielhaft die horizontale Turbulenzintensität, nach Komponenten aufgelöst, dargestellt. Das PALM-4U Modell kann sehr gut die Struktur der Vertikalprofile wiedergeben und auch die quantitative Übereinstimmung der Werte ist bemerkenswert gut. Die geringen Unterschiede in den Ergebnissen aus der numerischen Simulation und dem

Vergleichsdatensatz sind wahrscheinlich der vereinfachten Abbildung der Gebäudestruktur im numerischen Modell und möglichen Defiziten in der Modellierung wandnaher Strömungen zuzuordnen.



Bildquelle: OpenStreetMap

ABBILDUNG 76: Exemplarische Messstandorte in der HafenCity Hamburg für den Vergleich zwischen Windkanalmessungen und PALM-4U.

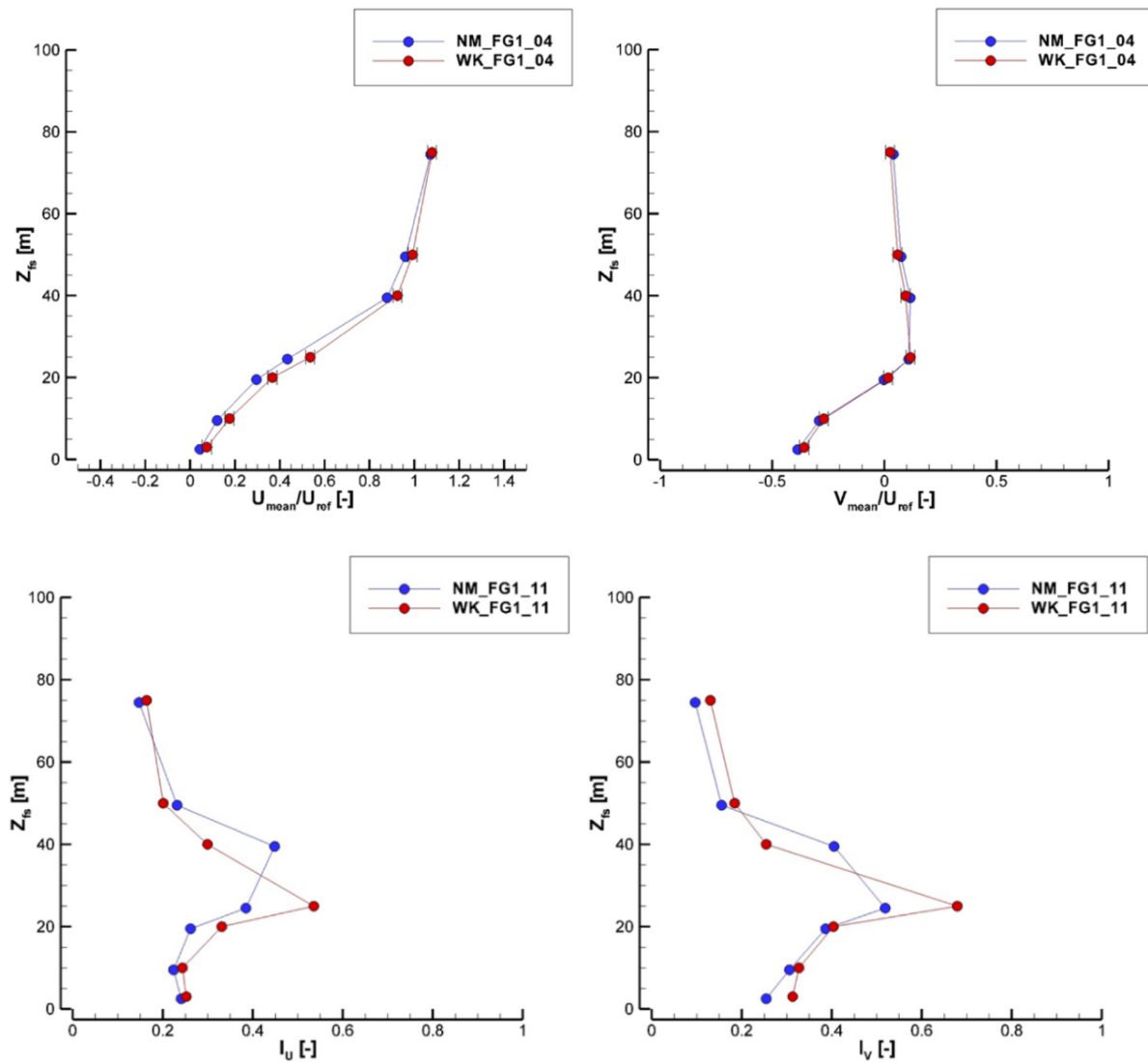


ABBILDUNG 77: Vergleich zwischen Windkanalmessungen (rot) und PALM-4U (blau). Oben: Normierte Windgeschwindigkeit in Ost-West-Richtung (links) und Nord-Süd-Richtung (rechts) am Standort FG1-04. Unten: Richtungsabhängige Turbulenzintensität (links in Ost-West- und rechts in Nord-Süd-Richtung) am Standort FG1-11. Quelle: Ament et al. (2020).

Die Modellevaluierung im Rahmen von 3DO dient der Bewertung der Leistungsfähigkeit, der Unsicherheiten sowie der wissenschaftlichen Anwendungsbereiche von PALM-4U. 3DO zieht zur Evaluierung ausgewählter PALM-4U Simulationen qualitätsgesicherte Referenzdatensätze für atmosphärische und lufthygienische Größen der LTO und IOP der drei Modellstädte Berlin, Hamburg und Stuttgart sowie Ergebnisse anderer Modelle heran.

Knowledge Base

Zur Unterstützung der Zusammenarbeit wurde am Fachgebiet Klimatologie der TU Berlin eine Knowledge Base (KB) als webbasierte, dynamische Informations- und Austauschplattform entwickelt und gepflegt. Die KB ist zugangsbeschränkt und ausschließlich für die am Programm beteiligten Projektpartner sowie die an Modul C beteiligten Praxispartner vorgesehen. Der Zugang wird über die Vergabe von Nutzerrechten durch das Koordinationsbüro Berlin des [UC]² Programms geregelt.

Zugangsberechtigte Nutzer sind in Modulen, Teilprojekten und verschiedenen Gruppen (z.B. AG Modell-evaluierung) organisiert, können auf diese Weise per E-Mail kommunizieren und für sie relevante Informationen erhalten. Die E-Mail-Funktion der KB erspart das aufwendige Listenerstellen für den E-Mail-Versand an Gruppen. Die KB dient als Ablageort für projektrelevante Objekte, wie z.B. Dokumente, Daten, Werkzeuge und Webseiten (Abb. 78). Verschiedene Auswahlfunktionen erleichtern die gezielte Suche nach bestimmten Objekten. Über eine Benachrichtigungsfunktion können Nutzer selbst entscheiden, wann und wie oft sie über Änderungen in der KB informiert werden wollen. Für den gruppeninternen Zugang und Austausch gibt es die Möglichkeit, den Zugang auf einen bestimmten Nutzerkreis zu beschränken. In einem Forum können Ankündigungen auf Konferenzen und Veranstaltungen sowie Diskussionen erfolgen. Die dynamische Gestaltung der KB ermöglicht jederzeit, den Nutzerkreis sowie die enthaltenen Objekte an die Bedarfe anzupassen. Zur Unterstützung der Nutzer der KB gibt es verschiedene Hilfsangebote wie z.B. erklärende Videos und eine Liste häufig gestellter Fragen. Mittels einer Feedback-Funktion können die Nutzer dem Entwicklerteam eine Rückmeldung zu bestimmten Funktionen geben, auf unbeantwortete Fragen hinweisen oder Vorschläge zur funktionalen Verbesserung der KB machen.

The screenshot shows the Knowledge Base [UC]² interface. At the top, there is a header with the [UC]² logo and a cityscape image. Below the header, there is a navigation menu on the left with categories like 'Programme Website', 'Modul A Website', 'Modul B Website', 'Modul C Website', 'Objects', 'Groups', 'Forum', 'Users', 'My profile', 'Literature', and 'Help'. The main content area displays a list of documents, sorted by 'last update'. The list includes documents like 'UC2_data standard_tables_A1_A4_V10 (draft 18.06.2019)', 'Special Issue on Urban Climate and Climate-sensitive Urban Design', and 'Übersicht PALM-4U Simulationen'. The interface also shows filters for 'Creator', 'Group', 'Type', and 'File content'.

ABBILDUNG 78: Ausschnitt aus der Knowledge Base des [UC]² Programms.

TEIL IV – ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der innovative, dem Stand der Technik entsprechende Forschungsansatz von 3DO hat einen essenziellen Beitrag zum Gesamterfolg des Programms „Stadtklima im Wandel – [UC]²“ geleistet. Die 3DO-Partner decken nicht nur die drei Modellstädte ab, sondern zeichnen sich auch durch ihre Expertise in allen für das Programm relevanten Themenbereichen (Stadtwetter, Stadtklima und Luftqualität) und Methoden (Observierungen, Windkanalversuche, numerische Modellierung) sowie der Erfahrung in der Grundlagenforschung und der Durchführung anwendungsbezogener Studien aus. Das große Konsortium von 3DO kombiniert vorhandene, umfassende Datensätze aus Langzeitbeobachtungen mit modernster, hochauflösender Instrumentierung zur Erfassung neuer, dreidimensionaler atmosphärischer Daten in einem Detaillierungsgrad, der in Deutschland bis dato noch nicht realisiert war. Die im Programm ausgebauten wissenschaftlich-technischen Infrastrukturen für Langzeitbeobachtungen atmosphärischer Prozesse in Berlin, Hamburg und Stuttgart werden auch nach dessen Abschluss für wissenschaftliche Studien und in Praxisanwendungen genutzt und langfristig weiterbetrieben. Der Verbund 3DO trägt somit dazu bei, den Mangel an bestehenden Langzeitbeobachtungen in Städten zu beheben und bessere Voraussetzungen im Bereich der Stadtklimaforschung zu schaffen. Die Datensätze der Langzeitbeobachtungen und Intensivmesskampagnen sind nicht nur für den einmaligen Nachweis der allgemeinen Leistungsfähigkeit des neuen Stadtklimamodells PALM-4U einsetzbar (siehe Teil III Modellevaluierung am Beispiel Hamburg), sondern auch für die Evaluierung zukünftiger Modellversionen von PALM-4U. Darüber hinaus besitzen die Daten ein hohes Anwendungspotenzial in den Bereichen Stadtwetter und -klima, Luftreinhaltung sowie Klimaschutz und Anpassungsmaßnahmen.

Auch die von 3DO wesentlich mitentwickelten Konzepte (z.B. Modellevaluierungskonzept, [UC]² Datenstandard) und Werkzeuge (z.B. Software) bieten ebenso wie die entstandenen Kooperationen hervorragende Grundlagen für eine Vielzahl weiterer drittmittelfinanzierter Forschungs- und Anwendungsprojekte sowie für zukünftige Veröffentlichungen in wissenschaftlich begutachteten Fachzeitschriften oder Präsentationen auf Fachkonferenzen. Frei verfügbare Messdaten und Ergebnisse (Stichwort Open Science) können zukünftig über frei zugängliche Portale potenziellen Nutzern für ihre eigenen Anwendungen in der Praxis oder für weitere wissenschaftliche Untersuchungen zur Verfügung gestellt werden.

Eine modulinterne Eigenevaluation mit einer Stärke-Schwächen-Chancen-Risiken-Analyse (SWOT) ergab, dass mit den über langjährige Erfahrungen verfügenden Projektpartnern in 3DO die weitgehende Einbindung der nationalen Kompetenz gelungen ist. Eine hochmoderne Instrumentierung und Technik sowie das bereits etablierte Modell PALM sind eine sehr gute Basis für das Erreichen der Programmziele. Die Entwicklung eines programmweiten Datenstandards, eines Datenmanagementsystems und einer programmweiten Informations- und Austauschplattform sowie das Verfolgen einer Open-Science-Strategie stellen eine wesentliche Voraussetzung für den Erfolg des Programms dar.

In der zweiten Förderphase von "Stadtklima im Wandel - [UC]²" (Oktober 2019 bis September 2022) wird PALM-4U zu einem Produkt weiterentwickelt, das sowohl den Bedürfnissen von Kommunen und anderen Praxisanwendern entspricht als auch für die wissenschaftliche Forschung genutzt werden kann. Teilprojekte von Modul B werden in Phase 2 PALM-4U selbst anwenden und die Modellevaluierung weiterverfolgen. Der neue Titel des Verbundprojekts lautet daher „Dreidimensionale Observierung **und Modellierung** atmosphärischer Prozesse in Städten“ und 3DO wird daher zu **3DO+M**.

Zur Sicherung der Qualität von PALM-4U ist sowohl eine allgemeine als auch eine anwendungsspezifische Evaluierung der neuen Modellversionen im Rahmen dieser Weiterentwicklung notwendig. Für spezifische

Fragestellungen bei der Evaluierung müssen Sondermessungen (z.B. Starkwinde, extreme Luftbelastungssituationen) durchgeführt werden, die in einer ersten Phase nicht möglich waren. Weiterhin muss das in Phase 1 entwickelte Datenmanagementsystem auf der Basis von Open-Source-Software weiterentwickelt und operationalisiert werden. Im Hinblick auf praxisrelevante Fragen zu Genauigkeitsanforderungen und anderen Aspekten des Einsatzes von PALM-4U für spezifische Anwendungsfelder besteht weiterer Forschungsbedarf, da PALM-4U zukünftig als Instrument zur Stadtplanung und der Beurteilung der Konsequenzen für das Stadtklima und die Luftqualität eingesetzt werden soll. Die Entwicklung einer Verstetigungsstrategie sowohl für die langfristige Modellentwicklung als auch einer Infrastruktur zur Bereitstellung einer öffentlich nutzbaren PALM-4U-Umgebung (z.B. mit integrierten Werkzeugen, Konzepten, Daten, nutzerfreundlicher Bedienung usw.) für Praxisanwender ist eine zukünftige modulübergreifende Aufgabe. Hierzu können die Projektpartner von 3DO+M essentielle Beiträge leisten, indem sie auch die anwendungsspezifische Modellevaluierung verfolgen, sowie weitere frei verfügbare Beobachtungsdaten, z.B. für spezifische Anwendungsfälle, Software-Werkzeuge sowie Berichte, Publikationen und Lehrmaterialien bereitstellen.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

3DO	Dreidimensionale Observierung atmosphärischer Prozesse in Städten
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMS	Datenmanagementsystem
DWD	Deutscher Wetterdienst
FU	Freie Universität Berlin
FZ	Forschungszentrum
HATPRO	Humidity And Temperature PROfiler (Temperatur- und Feuchte-Profiler)
HU	Humboldt-Universität zu Berlin
IASS	Institute for Advanced Sustainability Studies (Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung)
IOL	Intense Observation Location (Intensivbeobachtungsgebiet)
IOP	Intense Observation Period (Intensivmesskampagne)
KB	Knowledge Base
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LES	Large-Eddy Simulation
LIDAR	Light Detection And Ranging
LTO	Long-Term Observation (Langzeitbeobachtung)
LUH	Leibniz Universität Hannover
MESZ	Mitteleuropäische Sommerzeit
MEZ	Mitteleuropäische Zeit
PALM	Parallelized Large-Eddy Simulation Model
PALM-4U	PALM for Urban Applications (PALM für städtische Anwendungen; <i>PALM for you</i>)
PBL	Planetary Boundary Layer (planetare bzw. atmosphärische Grenzschicht)
PM	Particulate Matter (Feinstaub)
ppb	parts per billion (10^{-9})
ppm	parts per million (10^{-6})
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
SODAR	Sound Detecting And Ranging

Abkürzungsverzeichnis

SWOT	Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats-Analysis (Stärke-Schwächen-Chancen-Risiken Analyse)
TP	Teilprojekt
TU	Technische Universität
UAV	Uncrewed Aerial Vehicle (Luftfahrzeug ohne Besatzung)
[UC] ²	Urban Climate Under Change (Stadtklima im Wandel)
ü. NN	über Normalnull (über dem Meeresspiegel)
UFP	Ultrafeine Partikel
UTC	Coordinated Universal Time (Koordinierte Weltzeit)
UTCI	Universal Thermal Climate Index (Universeller thermischer Klimaindex)
VOC	Volatile Organic Compounds (Flüchtige organische Verbindungen)

GLOSSAR

Atmosphärische (bzw. planetare) Grenzschicht

Engl. Planetary Boundary Layer (PBL). Unterste Schicht der Atmosphäre. Sie reicht vom Erdboden bis zu einer Höhe von ca. 500-2000 m, wobei die Höhe der Schicht von der Rauigkeit des Untergrundes, der vertikalen Temperaturschichtung und der Windgeschwindigkeit abhängt. Die Höhe der PBL ist für die Luftqualität in Städten von größter Bedeutung, da sie die Ausbreitung von Luftschadstoffen stark beeinflusst.

Autochthone Wetterlage:

Eine autochthone Wetterlage ist geprägt von lokalen und regionalen atmosphärischen Bedingungen. Die Tagesgänge der Lufttemperatur und -feuchte sowie der Strahlung sind stark ausgeprägt.

Azimut

Der Azimut ist der Richtungswinkel eines Himmelsobjekts in der Horizontebene. Sie wird im Uhrzeigersinn um den Horizont des Beobachters von Norden aus gemessen. Dies bedeutet, dass ein Objekt im Norden einen Azimut von 0°, im Osten 90°, im Süden 180° und im Westen 270° hat.

CEDVAL

Bei CEDVAL (Compilation of Experimental Data for Validation of Microscale Dispersion Models) handelt es sich um eine Zusammenstellung von hauptsächlich Windkanal-Datensätzen zur Validierung von numerischen Ausbreitungsmodellen. Primäres Ziel ist es, Validierungsdaten auf einem höheren Qualitätsniveau zu liefern, als die meisten der bisher verfügbaren Daten liefern können. Alle Datensätze innerhalb von CEDVAL folgen einem hohen Qualitätsstandard in Bezug auf die vollständige Dokumentation der Randbedingungen und die Qualitätssicherung bei den Messungen.

COSMO-DE

COSMO-DE ist ein mesoskaliges, numerisches Vorhersagemodell dessen Modellgebiet ganz Deutschland, die Schweiz, Österreich und Teile der übrigen Nachbarstaaten abdeckt. Die horizontale Auflösung des COSMO-DE beträgt 2.8 km.

Cumulus

Cumulus ist eine dichte und abgegrenzte Haufenwolke mit vertikaler Erstreckung. Häufig hat ein Cumulus ein blumenkohlähnliches Aussehen. Die von der Sonne bestrahlten Wolkenteile leuchten weiß, während die Wolkenbasis dunkler ist.

Datenmanagementsystem

Ein Datenmanagementsystem ist ein System zur rechnergestützten Erfassung, Speicherung, Pflege, Verarbeitung, Analyse und Visualisierung von Daten. Es handelt sich um die Software und die Datenbank, die in einem Informationssystem genutzt werden.

ENVI-met

ENVI-met ist ein dreidimensionales, numerisches Simulationsmodell, mit dem mikroklimatische Effekte berechnet werden können, die durch städtische Strukturen und Landbedeckung verursacht werden.

Fesselsondensystem

Bei einem Fesselsondensystem werden Sonden an einem Fesselballon angebracht, der zu Messzwecken in bis zu 1000 m Höhe steigen kann.

Gefühlte Temperatur

Die Gefühlte Temperatur beschreibt das Temperaturempfinden eines Menschen, das neben der Lufttemperatur auch von der Luftfeuchte, dem Wind und der Strahlung abhängt. Sie entspricht der gemessenen Lufttemperatur bei mittlerer Luftfeuchtigkeit und Windstille bei Aufenthalt im Schatten und beim Tragen von der Temperatur angepassten Kleidung.

Globalstrahlung

Globalstrahlung ist die gesamte am Erdboden ankommende Sonnenstrahlung, also die Summe aus direkter Strahlung und diffuser Himmelsstrahlung. Sie ist abhängig von der geographischen Breite, der Tageszeit, der Jahreszeit und der Geländeform.

Grenzschichtwindkanal

In speziell adaptierten Grenzschichtwindkanälen wird die Windströmung in den bodennahen Luftschichten der Atmosphäre nachgebildet und systematisch untersucht. Das "Forschungswerkzeug Grenzschichtwindkanal" ist auch und gerade in Zeiten der Entwicklung immer komplexer werdender Computermodelle von großer Bedeutung. Es hilft, die Informationslücke zwischen Naturmessungen und Computersimulationen zu schließen und trägt zum besseren Verständnis der dynamischen Strömungs- und Transportprozesse in der bodennahen Windströmung bei.

HATPRO

Temperatur- und Feuchte-Profiler sind Mikrowellenradiometer zur Erfassung und kontinuierlichen Bestimmung des Temperatur- und Feuchteprofils in der Atmosphäre.

Hydroxyl-Radikal

Das Hydroxyl-Radikal entsteht aus Ozon und Wassermolekülen unter der Einwirkung von UV-Strahlen und besteht aus einem Wasserstoff- und einem Sauerstoffatom. Es ist eines der häufigsten Radikale in der Atmosphäre und spielt eine wichtige Rolle für den Abbau von Luftverunreinigungen.

In-situ

In-situ ist ein Fachbegriff in verschiedenen Bereichen, der z. B. „unmittelbar am Ort“ oder „in der ursprünglichen Position“ bedeuten kann.

Inversion

Mit einer Inversion ist in der Meteorologie eine Temperaturumkehr gemeint, wobei es mit zunehmender Höhe über Grund wärmer statt kälter wird. Inversionen wirken wie Sperrschichten und stellen oft die Obergrenze von Wolken-, Nebel- oder Dunstschichten dar. Häufig entsteht eine Inversion bei austauscharmen Wetterlagen.

Knowledge Base

Wissensdatenbanken (im Englischen Knowledge Base) im Sinne von gesammelten Dokumenten und Weblinks werden verwendet, um Daten, Informationen und Wissen Personen-, zeit- und raumunabhängig bereitstellen zu können.

Konvektion

Bei Konvektion steigt warme Luft von unten auf, kühlt sich dabei ab und sinkt in der Höhe seitwärts wieder ab. Dieser Prozess transportiert schnell und wirksam Energie vom Boden in höhere Luftschichten. Die Aufwärtsbewegung eines im Vergleich zur Umgebungsluft wärmeren und damit weniger dichten Luftkörpers nennt man Thermik.

Korrelation

Eine Korrelation misst die Stärke einer statistischen Beziehung von zwei Variablen zueinander. Korrelationen enthalten keine Information darüber, ob und welche Variable eine andere bedingt. Beide Variablen sind gleichberechtigt. Der Korrelationskoeffizient zeigt die Stärke des statistischen Zusammenhangs an und liegt zwischen -1 und +1.

Large-Eddy Simulation

Bei der Large-Eddy-Simulation handelt es sich um ein Verfahren zur numerischen Berechnung von großen Wirbelstrukturen (sogenannten Large Eddies), d.h. der Grobstruktur der Turbulenz.

Light Detection And Ranging

Light Detection And Ranging ist eine dem Radar verwandte Methode zur optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung sowie zur Fernmessung atmosphärischer Parameter.

Lokalskala

Atmosphärische Prozesse auf der Lokalskala haben eine horizontale Ausdehnung von einigen hundert Metern bis zu einem Kilometer. Die Lokalskala stellt den Übergang von der Mikroskala zur Mesoskala dar.

Low-Level-Jet

Die am häufigsten verwendete Definition von Low-Level-Jet, auch Strahlstrom oder Grenzschichtstrahlstrom genannt, ist die eines beliebigen Windmaximums in der unteren Troposphäre im vertikalen Profil des horizontalen Windes.

Mesoskala

Mesoskalige atmosphärische Phänomene umfassen etwa eine horizontale Ausdehnung von ca. 1 bis 2000 km und eine typische Lebensdauer von einer Stunde bis hin zu einer Woche.

Metadaten

Metadaten sind strukturierte Daten, welche die eigentlichen Daten (z.B. Messdaten) auf eine bestimmte Art und Weise beschreiben. Metainformationen werden erforderlich, wenn es größere Datenmengen zu verwalten gibt.

Mikroskala

Atmosphärische Prozesse auf der Mikroskala haben eine horizontale Ausdehnung von wenigen Millimetern bis wenigen hundert Metern.

Mischungsschicht

Die Mischungsschicht ist die Schicht der Atmosphäre, in welcher turbulente horizontale und vertikale Durchmischungsprozesse stattfinden. Sie entspricht tagsüber weitgehend der atmosphärischen Grenzschicht. Die Mächtigkeit dieser Schicht wird als Mischungshöhe oder Mischungsschichthöhe bezeichnet.

MUKLIMO_3

MUKLIMO_3 ist ein vom Deutschen Wetterdienst entwickeltes 3-dimensionales, mikroskaliges Stadtklimamodell. Es wird zur Untersuchung von Strömungsverhältnissen und Ausbreitungen von Luftbeimengungen in Städten eingesetzt.

Multikopter

Ein Multikopter ist ein kleiner Helikopter, der mehr als zwei Rotoren hat.

Nesting

Unter Nesting versteht man die Schachtelung eines kleinen Modellgebiets mit hoher Gitterauflösung in ein umfassendes Gebiet mit gröberer Auflösung (Lupenfunktion). Die Simulation im kleineren Modellgebiet wird hierbei durch die Simulation des umfassenden Gebiets angetrieben.

Neuronales Netzwerk

Neuronale Netzwerke sind inspiriert durch das menschliche Gehirn. Sie sind Forschungsgegenstand der Neuroinformatik und Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz. Neuronale Netzwerke werden für maschinelles Lernen eingesetzt, da sich, nachdem sie trainiert wurden, mit ihnen verschiedene Problemstellungen computerbasiert lösen lassen.

Normierung

Normierung ist eine Methode, unterschiedliche Datenreihen vergleichbar zu machen, um sie statistisch auswerten zu können. In der Mathematik versteht man allgemein unter Normierung (auch Normalisierung) die Skalierung eines Wertes auf einen bestimmten Wertebereich, üblicherweise zwischen 0 und 1 (bzw. 0 und 100 %).

Nurflügler

Nurflügler ist ein Fluggerät, bei dem auf ein gesondertes Höhenleitwerk und auf ein Seitenleitwerk verzichtet wird. Nurflügler zeigen häufig einen fließenden Übergang zwischen Rumpf und Tragflächen.

Open Data

Open Data sind für die Öffentlichkeit frei zugängliche und damit für verschiedene Anwendungen in Wissenschaft und Praxis nutzbare Daten (z.B. Messdaten, Daten aus Geographischen Informationssystemen wie Gelände-, Gebäude- oder Vegetationshöhen).

Open Source

Als Open Source (wörtlich offene Quelle) wird Software bezeichnet, deren Quelltext öffentlich ist und von Dritten eingesehen, geändert und genutzt werden kann.

Parallelized Large-Eddy Simulation Model

PALM ist ein fortschrittliches, meteorologisches Modellsystem für atmosphärische und ozeanische Grenzschichtströmungen. Es wurde als turbulenzauflösendes Large-Eddy-Simulationsmodell entwickelt, das speziell für die Durchführung auf massiv-parallelen Rechnerarchitekturen ausgelegt ist. Seit PALM 5.0 wird das Modell zusammen mit mehreren PALM-4U Komponenten ausgeliefert, die es erlauben, das Modell für verschiedene städtische Anwendungen einzusetzen. Das PALM-Modellsystem ist eine freie Software (Open Source). Sie kann unter den Bedingungen der GNU General Public License (v3) weiterverbreitet und/oder modifiziert werden.

Passivsammler

Ein Passivsammler ist eine kostengünstige Messeinrichtung, die ohne Energiezufuhr zur Messung von Luftschadstoffen eingesetzt werden kann. Passivsammler eignen sich zur Überwachung der Innenraum- und Außenluft. Sie stellen eine wichtige Ergänzung zu aufwändigen, kostspieligen Messstationen dar, da mit ihnen räumlich verteilte Daten gewonnen werden können.

Photostationäres Gleichgewicht

In der unteren Atmosphäre entsteht Ozon hauptsächlich über die Spaltung von Stickstoffoxiden (NO_x). Stickstoffdioxid (NO_2) wird durch Sonnenlicht in Stickstoffmonoxid (NO) und ein Sauerstoffatom gespalten. Letzteres reagiert mit Luftsauerstoff (O_2) zu Ozon (O_3), dabei entsteht NO , das wiederum mit O_3 zu NO_2 und O_2 reagieren kann. Es stellt sich daher weitgehend ein Gleichgewicht zwischen Ozonbildung und -abbau ein.

Potenzielle Temperatur

Die potenzielle Temperatur wird in der Meteorologie zum Vergleich der Energieinhalte verschiedener Luftmassen verwendet. Sie berechnet sich aus der aktuellen Lufttemperatur und dem aktuellen Druck. Man versteht darunter die Temperatur, die ein Luftpaket annähme, wenn es adiabatisch (d.h. ohne Wärmezufuhr von außen) von einer bestimmten Höhe mit einem bestimmten Druck auf die Höhe mit dem Luftdruck 1000 hPa, d.h. ungefähr auf Meeresniveau, gebracht würde.

Radiosonde

Eine Radiosonde wird zur Messung von meteorologischen Größen bis in Höhen von etwa 20-35 km ü. NN (Stratosphäre) eingesetzt. Sie übermittelt per Funk Messwerte wie z.B. Luftdruck, Lufttemperatur und relative Luftfeuchte an die Bodenstation.

Regressionsmodell

Mit einem Regressionsmodell werden Zusammenhänge zwischen mehreren Merkmalen durch ein mathematisches Modell dargestellt, wobei zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen unterschieden wird.

Residualschicht

Die Residualschicht ist der Teil der nächtlichen atmosphärischen Grenzschicht, der durch schwache sporadische Turbulenzen und zunächst gleichmäßig gemischte potenzielle Temperatur und Schadstoffe aus der Mischungsschicht des Vortages gekennzeichnet ist.

Reynolds-Averaged Navier-Stokes

Die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (nach Osborne Reynolds) sind eine Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichungen, die in der numerischen Strömungsmechanik zur Berechnung von Strömungen verwendet werden. Dabei muss der Einfluss der Turbulenz auf die Strömung parametrisiert, d.h. näherungsweise berechnet werden.

Simulation

Eine Simulation wird zur Analyse von Systemen eingesetzt, die für die theoretische oder formelmäßige Behandlung zu komplex sind, z.B. bei dynamischen Systemen. Um Erkenntnisse über das reale System zu erhalten, werden Experimente an einem Simulationsmodell durchgeführt, die Ergebnisse der Simulation ausgewertet und auf das reale System übertragen.

Skill Score

Ein Skill Score setzt richtige Vorhersagen ins Verhältnis zu Vorhersagen, die man auch ohne geringstes Vorhersagekönnen hätte machen können (Referenzvorhersage) und liefert somit Hinweise auf die Güte der Vorhersage. Es existieren verschiedene Skill Scores für verschiedene statistische Anwendungen.

SOLWEIG

Das Modell SOLWEIG (Solar LongWave Environmental Irradiance Geometry model) simuliert räumliche Verteilungen der mittleren Strahlungstemperatur und 3D-Flüsse lang- und kurzwelliger Strahlung.

Sound Detecting And Ranging

Ein akustisches Fernmessverfahren, bei dem hörbare Schallimpulse gebündelt in die atmosphärische Grenzschicht abgestrahlt und deren Schallreflektion gemessen werden. Dies liefert Daten zum Windfeld bis in mehrere Hundert Meter Höhe über Grund.

Städtische Grenzschicht

Die städtische Grenzschicht (engl. urban boundary layer; UBL), oder auch Stadtgrenzschicht, ist die durch den Einfluss des Stadtklimas modifizierte atmosphärische Grenzschicht über der Stadt. Die städtische Grenzschicht kann ebenso wie die atmosphärische Grenzschicht eine Höhe bis über 2000 m erreichen.

SWOT

Die SWOT-Analyse ist ein Instrument der strategischen Planung. Sie dient der Positionsbestimmung und der Strategieentwicklung. SWOT ist das englische Akronym für Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Risiken).

Thermischer Index

Ein thermischer Index ist ein Maß für das Temperaturempfinden des Menschen, indem es die thermische Umwelt beschreibt und bewertet. Es gibt thermische Indizes, die Umweltfaktoren in einfachen Verfahren, z.B. über Schwellenwerte der Lufttemperatur, beschreiben, wie z.B. Humidex, Hitzeindex. In komplexen Verfahren wie Gefühlte Temperatur, UTCI oder PET werden mehrere bzw. alle für das Wärme- oder Kälteempfinden relevanten meteorologische Größen (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Wind und Sonneneinstrahlung), körperliche Aktivität und Bekleidung des Menschen sowie dessen physiologische Antwortreaktion auf die Umgebungsbedingungen berücksichtigt (siehe auch UTCI).

Thermodynamik

Die Thermodynamik der Atmosphäre ist eine Anwendung der allgemeinen Wärmelehre auf atmosphärische Prozesse. Dabei stehen Vorgänge in der Troposphäre und der Stratosphäre im Vordergrund.

Trefferquote

Die Trefferquote (in %) gibt auf Basis normierter Modellergebnisse und normierter Vergleichswerte (Referenzdaten) den Anteil der insgesamt richtig vorhergesagten Werte an der Gesamtzahl der Vergleichswerte an.

Tropennacht

Eine Tropennacht ist eine Nacht, in der das Minimum der Lufttemperatur mindestens 20 °C beträgt.

Turbulenz

Turbulenz beschreibt Verwirbelungen in Strömungen in Luft oder anderen Fluiden, welche in einem weiten Bereich von Größenskalen auftreten. Turbulente Strömungen sind gekennzeichnet durch ein dreidimensionales Strömungsfeld mit zeitlich und räumlich scheinbar zufällig variierenden Bewegungen.

Ultraschallanemometer

Ultraschallanemometer erfassen Windgeschwindigkeit und Windrichtung in ein, zwei oder drei Dimensionen. Sie werden vor allem bei turbulenten Strömungen eingesetzt. Ein Ultraschallanemometer hat meist mehrere Messstrecken zwischen Ultraschallsendern und -empfängern, über die abwechselnd die Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Raumrichtungen gemessen wird. Daraus berechnet eine Messelektronik die horizontale und vertikale Windgeschwindigkeit. Vorteile des Ultraschallanemometers sind die höhere Genauigkeit, das Fehlen von Trägheit im System, d.h. die Möglichkeit, auch sehr kleine Windgeschwindigkeiten zu registrieren, sowie die hohe Wiederholrate der Messung (typischerweise 10-20 Messungen pro Sekunde). Letzteres ist für Turbulenzmessungen sehr wichtig, da kleine Wirbel nur kurzfristig auftreten, aber erheblich zum turbulenten Transport von Wärme, Wasserdampf, Spurengasen und Partikeln beitragen.

Universal Thermal Climate Index

Der UTCI ist ein Maß für das Temperaturempfinden des Menschen. Er berücksichtigt alle für das Empfinden relevanten meteorologischen Größen wie die Lufttemperatur, Luftfeuchte, Wind und Sonneneinstrahlung sowie die Bekleidung des Menschen und dessen physiologische Antwortreaktion auf die Umgebungsbedingungen. Der UTCI ist in Deutschland die Revision der bereits etablierten Gefühlten Temperatur, die u.a. seit vielen Jahren vom Deutschen Wetterdienst für amtliche Hitzewarnungen verwendet wird.

Windkomponenten

In der Meteorologie ist es üblich, den Windgeschwindigkeitsvektor $\mathbf{V}$ zu verwenden. Dieser setzt sich aus den drei Komponenten u in West-Ost-Richtung (meist mit x bezeichnet), v in Süd-Nord-Richtung (y) und w aufwärts in vertikaler (z)-Richtung zusammen. Liegen horizontale Windgeschwindigkeit und Windrichtung vor, können die beiden horizontalen Komponenten u und v berechnet werden.

LITERATUR

Ament, F., Leith, B., Wiesner, S., Surm, K., Hansen, A. (2020): Meteorologische Charakterisierung von Antrieb und städtischer Modifikation für die Beurteilung von Klimamodellen. Schlussbericht nach Nr. 3.2 BNBEST-BMBF 98, Meteorologisches Institut, Universität Hamburg.

Angevine, W., Grimsdell, A., Hartten, L.M., Delany, A.C. (1998): The Flatland Boundary Layer Experiments. – *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 79, 419-431.

Arnfield, A.J. (2003): Two Decades of Urban Climate Research: A Review of Turbulence, Exchanges of Energy and Water, and the Urban Heat Island. – *Int. J. Clim.* 23, 1-26. DOI: 10.1002/joc.859.

Barlow, J., Best, M., Bohnenstengel, S., Clark, P., Grimmond, S., Lean, H., A. Christen, Emeis, S., Haeffelin, M., Harman, I., Lemonsu, A., Martilli, A., Pardyjak, E., Rotach, M., Ballard, S., Boutle, I., Brown, A., Cai, X., Carpentieri, M., Coceal, O., Crawford, B., Di Sabatino, S., Dou, J., Drew, D., Edwards, J., Fallmann, J., Fortuniak, K., Gornall, J., Gronemeier, T., Halios, C., Hertwig, D., Hirano, K., Holtslag, A., Luo, Z., Mills, G., Nakayoshi, M., Pain, K., Schlünzen, K., Smith, S., Soulhac, L., Steeneveld, G., Sun, T., Theeuwes, N., Thomson, D., Voogt, J., Ward, H., Xie, Z., Zhong, J. (2017): Developing a Research Strategy to Better Understand, Observe and Simulate Urban Atmospheric Processes at Kilometre to Sub-Kilometre Scales. – *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 98, ES261-ES264. DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0106.1.

Baumüller, J., Hoffmann, U., Reuter, U. (1998): Stadtklima 21 - Grundlagen zum Stadtklima und zur Planung "Stuttgart 21". Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Abteilung Stadtklimatologie.

Bruse, M., Fleer, H. (1998): Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. – *Environ. Model Softw. Environ. Data News* 13, 373-384. DOI: 10.1016/S1364-8152(98)00042-5.

Christen, A. (2019): Vertikale Gliederung der Stadtatmosphäre. Kap. 1.3 in: J.L. Lozán et al. (Hrsg.), Warnsignal Klima: Die Städte. 36-42.

Crewell, S., Löhnert, U. (2007): Accuracy of boundary layer temperature profiles retrieval with multifrequency multiangle microwave radiometer. – *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 45, 2195-2201. DOI: 10.1109/TGRS.2006.888434.

Damay, P.E., Maro, D., Coppalle, A., Lamaud, E., Connan, O., Hébert, D., Talbaut, M., Irvine, M. (2009): Size-resolved eddy covariance measurements of fine particle vertical fluxes. – *Journal of Aerosol Science* 40 (12), 1050-1058. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2009.09.010.

Deventer, M.J., El-Madany, T., Griessbaum, F., Klemm, O. (2015): One-year measurement of size-resolved particle fluxes in an urban area. – *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 67 (1), S. 25531. DOI: 10.3402/tellusb.v67.25531.

Emeis, S. (2015): Observational Techniques to Assist the Coupling of CWE/CFD Models and Meso-Scale Meteorological Models. – *J. Wind Eng. Industr. Aerodyn.* 144, 24-30. DOI: 10.1016/j.jweia.2015.04.018.

Emeis, S., Kalthoff, N., Holst, C., Zeeman, M., Kiseleva, O. (2020): Horizontale Struktur des innerstädtischen Windfeldes, vertikale Struktur der urbanen Grenzschicht, vertikaler Austausch. Schlussbericht nach Nr. 3.2 BNBEST-BMBF 98, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Atmosphärische Umweltforschung und Troposphärenforschung, Karlsruher Institut für Technologie.

- Ehlers, C., Klemp, D., Rohrer, F., Mihelcic, D., Wegener, R., Kiendler-Scharr, A., Wahner, A. (2016): Twenty years of ambient observations of nitrogen oxides and specified hydrocarbons in air masses dominated by traffic emissions in Germany. – *Faraday Discuss.*, 189, 407-437. DOI: 10.1039/C5FD00180C.
- Ehlers, C., Klemp, D., Kofahl, C., Fröhlich, H., Möllmann-Coers, M., Wahner, A. (2017): Untersuchungen zur Luftqualität in Bad Homburg. In: *Energie und Umwelt*, Verlag des Forschungszentrums Jülich, ISBN-Nr.: 978-3-95806-199-6.
- Erbertseder, T., Roiger, A., Fiehn, A., Klausner, T. (2020): Evaluierung durch satelliten- und flugzeuggestützte Messungen. Schlussbericht nach Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98, Institut für Physik der Atmosphäre, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen.
- Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B. (2007): Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment. COST action 732.Brüssel: COST Office. ISBN-Nr: 3-00-018312-4.
- Grimmond, C.S.B. (2006): Progress in Measuring and Observing the Urban Atmosphere. – *Theor. Appl. Climatol.* 84, 3-22. DOI: 10.1007/s00704-005-0140-5.
- Grimmond, C.S.B., Roth, M., Oke, T.R., Au, Y.C., Best, M., Betts, R.C.G., Cleugh, H., Dabbert, W., Emmanuel, R., Freitas, E., Fortuniak, K., Hanna, S., Klein, P., Kalkstein, L.S., Lui, C.H., Nickson, A., Pearlmutter, D., Sailor, D., Voogt, J. (2010): Climate and More Sustainable Cities: Climate Information for Improved Planning and Management of Cities (Producers/Capabilities Perspective). – *Procedia Env. Sci.* 1, 247-274. DOI: 10.1016/j.proenv.2010.09.016.
- 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.
- Held, A., Klemm, O. (2006): Direct measurement of turbulent particle exchange with a twin CPC eddy covariance system. – *Atmospheric Environment* 40, 92-102. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.09.092.
- Hodan, C., Heene, V., Koßmann, M. (2020): Messung und Evaluierung von thermischen Windsystemen und ihre Wirkung auf die Durchlüftung und die Hitzeinseln in Städten. BMBF Schlussbericht, Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- Kalthoff, N., Adler, B., Wieser, A., Kohler, M., Träumner, K., Handwerker, J., Corsmeier, U., Khodayar, S., Lambert, D., Kopmann, A., Kunka, N., Dick, G., Ramatschi, M., Wickert, J., Kottmeier, C. (2013): KITcube - A mobile observation platform for convection studies deployed during HyMeX. – *Meteorol. Z.* 22(6), 633-647. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0542.
- Karl, T., Graus, M., Striednig, M., Lamprecht, C., Hammerle A., Wohlfahrt, G., Held, A., von der Heyden, L., Deventer, M. J., Krismer, A., Haun, C., Feichter R., Lee, J. (2017): Urban eddy covariance measurements reveal significant missing NO_x emissions in Central Europe. – *Scientific Reports* 7, 2536.
- 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). DOI: 10.5445/IR/1000093534 12.01.02.
- Klausner, T., Mertens, M., Huntrieser, H., Baumann, R., Galkowski, M., Kuhlmann, G., Fiehn, A., Jöckel, P., Pühl, M., Roiger, A. (2020): Urban greenhouse gas emissions from the Berlin area: A case study on aircraft-based CO₂ and CH₄ in situ observations in summer 2018. – *Elem. Sci. Anth.* 8(1), p.15. DOI: 10.1525/elementa.411.

Klemp, D., Wegener, R., Dubus, R., Javed, U. (2020): Acquisition of temporally and spatially highly resolved data sets of relevant trace substances for model development and model evaluation purposes using a mobile measuring laboratory. In: *Energy and Environment* 455, Zentralbibliothek, Verlag des Forschungszentrums Jülich, ISBN-Nr: 978-3-95806-465-2.

Langer, I., Ulbrich, U., Werner, J., Sodoudi, S. (2020): Überwachung, Messung und Erstellung einer räumlich-zeitlich hochaufgelösten 2m Temperatur- und relativen Feuchtigkeitsanalyse für Berlin. Schlussbericht nach Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98, Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin.

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, LUBW (2013): Verkehrsstärken an ausgewählten Verkehrs- und Spotmessstellen – Auswertungen 2012. LUBW, Referat 31: Luftreinhaltung, Umwelttechnik.

Löhnert, U., Turner, D., Crewell, S. (2009): Ground-based temperature and humidity profiling using spectral infrared and microwave observations. Part I: Simulated retrieval performance in clear-sky conditions. – *J. Appl. Meteorol. Clim.* 48, 1017-1032. DOI: 10.1175/2008JAMC2060.1.

Mannschreck, K., Klemp, D., Kley, D., Friedrich, R., Kühlwein, J., Wickert, B., Matuska, P., Habram, M., Slemr, F. (2002): Evaluation of an emission inventory by comparisons of modelled and measured emission ratios of individual HCs, CO and NO_x. – *Atmospheric Environment* 36 (Supplement 1), 81-94.

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. (2018): Development of a new urban climate model based on the model PALM - Project overview, planned work, and first achievements. – *Met. Z.* 28(2), 105-119. DOI: 10.1127/metz/2019/0909.

Meusel, G. (2020): Vertikalsondierung von meteorologischen Parametern mittels eines Octocopter-Systems. Schlussbericht nach Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98, Institut für Meteorologie und Klimatologie, Leibniz Universität Hannover.

Möllmann-Coers, M., Klemp, D., Mannschreck, K., Slemr, F. (2002): Determination of anthropogenic emissions in the Augsburg area by the source-tracer-ratio method. – *Atmospheric Environment*, 36 (Supplement 1), 95-107.

Muller, C., Chapman, L., Grimmond, C.S.B., Young, D.T., Cai, X. (2013): Sensors and the City: a Review of Urban Meteorological Networks. – *Int. J. Clim.* 33, 1585-1600. DOI: 10.1002/joc.3678.

Petroff, A., Murphy, J.G., Thomas, S.C., Geddes, J.A. (2018): Size-resolved aerosol fluxes above a temperate broadleaf forest. – *Atmospheric Environment* 190, 359-375. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.07.012.

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.

Queck, R., Goldberg, V. (2020): Kumulative Exposition von Fußgängern und Radfahrern in städtischer Umgebung. Schlussbericht nach Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden.

Rotach, M.W., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, A., Clappier, A., Feddersen, B., Gryning, S.-E., Martucci, G., Mayer, H., Mitev, V., Oke, T.R., Parlow, E., Richner, H., Roth, M., Roulet, Y.A., Ruffieux, D., Salmond, J.A., Schatzmann, M., Voogt J.A. (2005): BUBBLE – An Urban Boundary Layer Meteorology Project. – *Theor. Appl. Climatol.* 81, 231-261. DOI: 10.1007/s00704-004-0117-9.

- Scherer, D., Ament F., Emeis, S., Fehrenbach, U., Leitl, B., Scherber, K., Schneider, C., Vogt, U. (2019a): Three-dimensional observation of atmospheric processes in three German cities. – Met. Z. 28(2), 121-138. DOI: 10.1127/metz/2019/0911.
- Scherer, D., Antretter, F., Bender, S., Cortekar, J., Emeis, S., Fehrenbach, U., Groß, G., Halbig, G., Hasse, J., Maronga, B., Raasch, S., Scherber, K. (2019b): Urban Climate Under Change [UC]² - A National Research Programme for Developing a Building-Resolving Atmospheric Model for Entire City Regions. – Met. Z. 28(2), 95-104. DOI: 10.1127/metz/2019/0913.
- 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]²-Datenstandard "Stadtklima im Wandel" Version 1.3, http://www.uc2-program.org/uc2_datenstandard.pdf (Zugriff: März 2020)
- Scherer, D., Fehrenbach, U., Grassmann, T., Holtmann, A., Krug, A., Meier, F., Philipp A., Scherber, K. (2020): Dreidimensionales Monitoring atmosphärischer Prozesse in Berlin. Schlussbericht nach Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98, Institut für Ökologie, Technische Universität Berlin.
- Schmidt, A., Klemm, O. (2008): Direct determination of highly size-resolved turbulent particle fluxes with the disjunct eddy covariance method and a 12 - stage electrical low pressure impactor. – Atmos. Chem. Phys. 8(24), 7405-7417. DOI: 10.5194/acp-8-7405-2008.
- Schneider, C., Venkatraman Jagatha, J.; Fritz S. (in Vorb.): Urbane Mobile Messsysteme und GIS-Integration (URBMOBI-GIS). Schlussbericht nach Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98, Geographisches Institut, Humboldt-Universität zu Berlin.
- Shuttleworth, W.J. (1988): Macrohydrology – The new challenge for process hydrology. – Journal of Hydrology 100, 31-56. DOI: 10.1016/0022-1694(88)90180-1.
- Slemr, F., Baumbach, G., Blank, P., Corsmeier, U., Fiedler, F., Friedrich, R., Habram, M., Kalthoff, N., Klemp, D., Kühlwein, J., Mannschreck, K., Möllmann-Coers, M., Nester, K., Panitz, H. J., Rabl, P., Slemr, J., Vogt, U., Wickert, B. (2002): Evaluation of modeled spatially and temporarily highly resolved emission inventories of photochemical precursors for the city of Augsburg: The experiment EVA and its major results. – Journal of Atmospheric Chemistry 42(1): 207-233.
- Stewart, I.D., Oke, T.R. (2012): Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. – Bull. Amer. Meteor. Soc. 93, 1879-1900. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
- Stull, R.B. (1988): An Introduction to Boundary Layer Meteorology. – Kluwer Academic Publishers, 442-583.
- Umweltbundesamt, UBA (2018): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990. Stand 14. 2. 2018, Dessau.
- Urban, S. (2010): Charakterisierung der Quellverteilung von Feinstaub und Stickoxiden in ländlichem und städtischem Gebiet. Dissertation, Fachbereich für Mathematik und Naturwissenschaften, Bergische Universität Wuppertal.
- U.S. Environmental Protection Agency (2008): Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Draft. www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium (Zugriff: März 2020).
- Verein Deutscher Ingenieure, VDI (2017): Umweltmeteorologie - Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung. VDI Richtlinie 3783 Blatt 9, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Beuth Verlag.

Vogt, U., Samad, A. (2020): Stadtklima und Luftreinhaltung in Stuttgart unter besonderer Berücksichtigung von thermischen Windsystemen. Schlussbericht nach Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik, Universität Stuttgart.

von Schneidemesser, E., Villena, G., Schmitz, S., Caseiro, A. (2020): Mikrosensoren für hochaufgelöste Luftqualitätsmessungen. Schlussbericht nach Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98, Institute for Advanced Sustainability Studies, Potsdam.

Weber, S., Meyer-Kornblum, A. (2020): Quantifizierung des turbulenten Oberfläche-Atmosphäre Austauschs von größenklassifizierten Partikelanzahlkonzentrationen, Wärme, Wasserdampf und CO₂. Schlussbericht nach Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98, Institut für Geoökologie, Technische Universität Braunschweig.

Wittkamp, N., Adler, B., Kalthoff, N., Kiseleva, O. (eingereicht): Mesoscale wind patterns over the complex urban terrain around Stuttgart investigated with dual-Doppler lidar profiles. – Met. Z..

Zhu, Y., Pudota, J., Collins, D., Allen, D., Clements, A., Denbleyker, A., Fraser, M., Jia, Y., McDonald-Buller, E., Michel E. (2009): Air pollutant concentrations near three Texas roadways, Part I: Ultrafine particles. – Atmospheric Environment 43, 4513-4522. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.018.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 1: STRUKTUR DES PROGRAMMS „STADTKLIMA IM WANDEL“	2
ABBILDUNG 2: LTO-STANDORTE IN BERLIN. DIE LTO-DATEN WERDEN DURCH FOLGENDE INSTITUTIONEN ERHOSEN: SENATSVERWALTUNG FÜR UMWELT, VERKEHR UND KLIMASCHUTZ BERLIN, BERLINER LUFTGÜTE MESSNETZ – BLUME (GELBES PENTAGON), DEUTSCHER WETTERDIENST (TÜRKISER KREIS), FREIE UNIVERSITÄT BERLIN, INSTITUT FÜR METEOROLOGIE (HELLGRÜNES RECHTECK), HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN, GEOGRAPHISCHES INSTITUT (STERN), TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG, INSTITUT FÜR GEOÖKOLOGIE (DUNKELBLAUES DREIECK), TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN, INSTITUT FÜR ÖKOLOGIE, FACHGEBIET KLIMATOLOGIE (ROTE RAUTE). DIE SCHWARZE LINIE MARKIERT DIE STADTGRENZE. KARTENGRUNDLAGE: OPENSTREETMAP – VERÖFFENTLICHT UNTER ODBL 1.0. QUELLE: SCHERER ET AL. (2019A).	10
ABBILDUNG 3: IOLS IN BERLIN. LINKS: TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN, CAMPUS CHARLOTTENBURG, RECHTS: ROTHENBURGSTRASSE, STEGLITZ. ROTE KREISE: AUSSCHNITT FÜR WINDKANALMODELL (MAßSTAB 1:500; RADIUS 875 M), GELBE KREISE: AUSSCHNITT FÜR DIE ANALYSE (RADIUS 675 M). BILDER IN WGS84/PSEUDO-MERCATOR PROJEKTION. KOORDINATEN IN UTM33. KARTENGRUNDLAGE: © 2017 GEOBASIS-DE/BKG (© 2009), GOOGLE. QUELLE: SCHERER ET AL. (2019A).	11
ABBILDUNG 4: AEROSOLRÜCKSTREUPROFILE AUS CEILOMETERMESSUNGEN AM STANDORT TU BERLIN CAMPUS BERLIN-CHARLOTTENBURG WÄHREND DER IOP 4 (OBEN), VOM CEILOMETER (CHM) PROZESSIERTE SOWIE VOM DWD ÖFFENTLICH VERFÜGBARE WOLKENBEDECKUNGSGRAD (MITTE) UND VON DER TU BERLIN DURCHFÜHRTE MESSUNG DER GLOBALSTRAHLUNG (UNTEN). QUELLE: SCHERER ET AL. (2020).	12
ABBILDUNG 5: POSITIONSPUNKTE UND MESSWERTE ZWEIER ZEITGLEICHER BEFLIEGUNGEN BEISPIELHAFT AM 17.07.2018 UM 02:00 UTC AM STANDORT GUTSMUTHS (BERLIN-MOABIT MIT NURFLÜGLER, LINKS) UND HERTZALLEE (BERLIN-CHARLOTTENBURG MIT MULTICOPTER, RECHTS). IM ZENTRUM IST JEWEILS DIE 3D-ANSICHT DES FLUGPFADES ZU SEHEN UND OBEN JEWEILS DIE FLUGHÖHE VERSUS ZEIT; RECHTS JEWEILS DIE LUFTTEMPERATUR VERSUS HÖHE. QUELLE: SCHERER ET AL. (2020).	13
ABBILDUNG 6: ZEIT-HÖHEN-DIAGRAMM DER BEFLIEGUNGSERGEBNISSE FÜR DIE SPEZIFISCHE LUFTFEUCHTE IN IOP 4 VOM 16.-19.07.2018 AN DEN BERLINER STANDORTEN GUTSMUTHS (MOABIT), HERTZALLEE (CHARLOTTENBURG) UND FLUGHAFEN TEMPELHOF. DER ZEITRAUM ZWISCHEN SONNENUNTERGANG UND -AUFGANG IST DUNKEL HINTERLEGT. AM 17. UND 18.07.2018 MUSSTE DER FLUGBETRIEB WEGEN STÄRKERER BÖEN UNTERBROCHEN WERDEN. QUELLE: SCHERER ET AL. (2020).	14
ABBILDUNG 7: MESSSTANDORTE UND AUS HOCHFREQUENTEN MESSUNGEN ABGELEITETE WINDROSEN AM TU BERLIN CAMPUS CHARLOTTENBURG WÄHREND DER IOP 2. QUELLE: SCHERER ET AL. (2020).	15
ABBILDUNG 8: VERTIKALPROFILE DER POTENZIELLEN TEMPERATUR (LINKS) UND DER SPEZIFISCHEN FEUCHTE (RECHTS) VOM 16.07.2018 IN LINDENBERG UND AUF DEM TEMPELHOFFER FELD. QUELLE: HODAN ET AL. (2020).	16
ABBILDUNG 9: SCHEMATISCHE, NICHT MAßSTABSGETREUE DARSTELLUNG DER NACHMITTÄGLICHEN KONVEKTIVEN PBL IN BERLIN UND UMLAND (BLAUE LINIEN) UND VERTIKALPROFILE DER POTENZIELLEN TEMPERATUR $\theta(z)$ FÜR DEN FALL DER HOCHREICHENDEN PBL AM 16.07.2018 MIT HORIZONTALEM VERLAUF DER GRENZSCHICHTOBERGRENZE (DURCHGEZOGENE LINIEN) UND FÜR EINEN HYPOTHETISCHEN FALL MIT INSGESAMT FLACHER, ABER IM STADTGEBIET MÄCHTIGERER PBL (GESTRICHELTE LINIEN), NACH SHUTTLEWORTH 1988, ADAPTIERT FÜR DIE STÄDTISCHE GRENZSCHICHT. QUELLE: HODAN ET AL. (2020).	16
ABBILDUNG 10: TAGESGANG DER GRENZSCHICHTHÖHE AUS CEILOMETERDATEN VOM 16.07.2018. DIE CEILOMETERMESSUNGEN IN LINDENBERG UND IN POTSDAM WURDEN VOM DWD, DIE CEILOMETERMESSUNGEN IM GRUNEWALD UND AM TU HAUPTGEBÄUDE WURDEN VON DER TU BERLIN DURCHFÜHRT. QUELLE: HODAN ET AL. (2020).	17
ABBILDUNG 11: STÜNDLICHE LUFTTEMPERATUR, GEMESSEN VOM HEXAKOPTER-RADIOSONDEN-MESSSYSTEM VOM 16.-17.07.2018 (IOP 4) AUF DEM ERNST-REUTER-PLATZ IN BERLIN-CHARLOTTENBURG. QUELLE: MEUSEL (2020).	18
ABBILDUNG 12: STÜNDLICHE POTENZIELLE TEMPERATUR, GEMESSEN VOM HEXAKOPTER-RADIOSONDEN-MESSSYSTEM VOM 16.-17.07.2018 (IOP 4) AUF DEM ERNST-REUTER-PLATZ IN BERLIN-CHARLOTTENBURG. QUELLE: MEUSEL (2020).	18
ABBILDUNG 13: STÜNDLICHE HORIZONTALWINDE, GEMESSEN VOM HEXAKOPTER-RADIOSONDEN-MESSSYSTEM VOM 16.-17.07.2018 (IOP 4) AUF DEM ERNST-REUTER-PLATZ IN BERLIN-CHARLOTTENBURG. QUELLE: MEUSEL (2020).	19
ABBILDUNG 14: STÜNDLICHE SPEZIFISCHE FEUCHTE, BERECHNET AUS MESSUNGEN DES LUFTDRUCKS, DER LUFTTEMPERATUR UND DER RELATIVE FEUCHTE MIT DEM HEXAKOPTER-RADIOSONDEN-MESSSYSTEM VOM 16.-17.07.2018 (IOP 4) AUF DEM ERNST-REUTER-PLATZ IN BERLIN-CHARLOTTENBURG. QUELLE: MEUSEL (2020).	20

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 15: VERTIKALPROFIL VON WINDGESCHWINDIGKEIT UND LUFTTEMPERATUR DER DLR CESSNA AM 24.07.2018 ÜBER DEM TEMPELHOFFER FELD (DURCHGEZOGENE LINIE), SOWIE VON MESSUNGEN AUS TP11 (GESTRICHELTE LINIEN). QUELLE: EBERTSEDER ET AL. (2020).	21
ABBILDUNG 16: STICKSTOFFDIOXID (NO ₂) VERTEILUNG ÜBER BERLIN AM 24.07.2018, BEOBACHTET VON SENTINEL-5P/TROPOMI (LINKS) UND IN-SITU GEMESSENE STICKSTOFFDIOXID-MISCHUNGSVERHÄLTNISSE AN BORD DER DLR CESSNA (RECHTS). DEUTLICH IST DIE STÄDTISCHE ABGASFAHNE IM LEE DER STADT ZU ERKENNEN. QUELLE: PÜHL (2019).	21
ABBILDUNG 17: GEMESSENE PARTIKELANZAHLKONZENTRATIONEN ENTLANG DER MESSROUTE AM 30.07.2017, GEMITTELT FÜR EIN 50 M X 50 M RASTER IN DER IOL ERNST-REUTER-PLATZ. GEMESSEN WURDE IN DER ZEIT VON 09:30 BIS CA. 11:30 MESZ. QUELLE: WEBER ET AL. (2020).	22
ABBILDUNG 18: ZEITLICHE VARIABILITÄT (LOKALZEIT) DER PARTIKELANZAHLKONZENTRATION (IN TOTALPARTIKELANZAHLKONZENTRATION – TNC) AN DER LTO-MESSSTATION BERLIN-ADLERSHOF WÄHREND DER IOPS 3 UND 4 (WINTER UND SOMMER) IN DEN ZEITRÄUMEN 16.01.-17.04.2018 UND 07.06.-01.08.2018. QUELLE: SCHNEIDER ET AL. (IN VORB.).	23
ABBILDUNG 19: MEDIAN DER LOKALEN PARTIKELANZAHLKONZENTRATION (PNC) ALLER MESSFAHRTEN GEMITTELT PRO 100 M UND IOP. DIE LOKALE PNC WURDE PRO MESSFAHRT ALS DIFFERENZ DER GESAMTPARTIKELANZAHL AM MESSPUNKT UND DER MINIMALEN PNC PRO MESSFAHRT (HINTERGRUNDKONZENTRATION) BERECHNET. QUELLE: SCHNEIDER ET AL. (IN VORB.).	24
ABBILDUNG 20: WIND- (LINKS) UND SCHADSTOFFROSEN (RECHTS) ENTLANG DES FUßWEGES FÜR JEWEILS A) DEN HINTEREN TEIL DES FUßWEGES AUF 150 BIS 250 M, B) DEN VORDEREN TEIL DES FUßWEGES AUF 50 BIS 100 M, C) DEN EINGANG ZUM FUßWEG AUF 25 M, D) -10 BIS 10 M IN DER NÄHE DER STRASSE DES 17. JUNI IN BERLIN-CHAR-LOTTENBURG. MITTE: KARTE DER MESSPUNKTE ENTLANG DES FUßWEGES. KARTENGRUNDLAGE: UMWELTATLAS BERLIN. QUELLE: SCHNEIDER ET AL. (IN VORB.).	25
ABBILDUNG 21: ERGEBNISSE DER STICKSTOFFDIOXID-MESSUNGEN BEI DER DURCHQUERUNG DER STADT BERLIN IN OST-WEST-RICHTUNG UND UNTERSUCHUNGEN IM LUV- UND LEEBEREICH BERLINS UNTER WINTERLICHEN BEDINGUNGEN UND NORDWESTLICHER WINDRICHTUNG (SIEHE BLAUER WINDPFEIL). DIE HIER VORGESTELLTEN MESSUNGEN MIT MOBILAB FANDEN AN EINEM WOCHENTAG WÄHREND DER IOP 1 STATT (20.01.2017 ZWISCHEN 09:00 UND 12:30 UTC). QUELLE: KLEMP ET AL. (2020).	27
ABBILDUNG 22: VORLÄUFIGE ERGEBNISSE DER VERTIKALEN PROFILMESSUNGEN VON STICKSTOFFDIOXID (NITROGEN DIOXIDE) UND OZON (OZONE) WÄHREND IOP 2 (29.07.-28.08.2017) UND IOP 3 (27.01.-23.02.2018) ALS TAGESPROFIL DARGESTELLT. FEHLERBALKEN GEBEN DIE 95 % KONFIDENZINTERVALLE DER DATEN WIEDER. QUELLE: VON SCHNEIDEMESSER ET AL. (2020).	28
ABBILDUNG 23: MITTLERE TAGESGÄNGE DES AUSTAUSCHFLUSSES ULTRAFEINER PARTIKEL (UFP) FÜR EINEN WERKTAG (MO-FR) UND EINEN WOCHENENDTAG (SA-SO). EIN POSITIVER FLUSS KENNZEICHNET EMISSION, WÄHREND EIN NEGATIVER FLUSS DEPOSITION CHARAKTERISIERT. QUELLE: WEBER ET AL. (2020).	29
ABBILDUNG 24: MITTLERE TAGESGÄNGE DER GRÖßENKLASSIFIZIERTEN PARTIKELFLÜSSE FÜR EINEN TYPISCHEN WERKTAG (MO-FR) UND EINEN TAG DES WOCHENENDES (SA-SO). ROTE FARBE SYMBOLISIERT EMISSION, WÄHREND BLAUE FARBE DEPOSITION DEUTLICH MACHT. QUELLE: WEBER ET AL. (2020).	30
ABBILDUNG 25: JAHRES- UND TAGESGANG DES LATENTEN WÄRMESTROMS AN DEN STANDORTEN TU BERLIN CAMPUS CHARLOTTENBURG (RECHTS, GEMESSEN IN 56 M Ü. G.) UND IN DER ROTHENBURGSTRASSE IN BERLIN STEGLITZ (LINKS, GEMESSEN IN 40 M Ü. G.) FÜR DEN ZEITRAUM JUNI 2018 BIS SEPTEMBER 2019. QUELLE: SCHERER ET AL. (2020).	31
ABBILDUNG 26: JULI 2018; LINKS: TIERGARTEN BEWÄSSERT, RECHTS: TEMPELHOFFER FELD UNBEWÄSSERT. FOTOS: ROLAND WINKLER DWD POTSDAM (TIERGARTEN) UND RALF BECKER, DWD LINDENBERG (TEMPELHOFFER FELD).	32
ABBILDUNG 27: MESSRUCKSACK IM EINSATZ VOR DEM HAUPTGEBÄUDE DER TU BERLIN. FOTO: RONALD QUECK, TU DRESDEN.	33
ABBILDUNG 28: LINKS: UTCI AM 31.07.2017 GEGEN 16:00 MEZ, BERECHNET AUS EINER ENVI-MET SIMULATION (FLÄCHE) UND AUS MESSDATEN (BAND), GRAUE FLÄCHEN SYMBOLISIEREN GEBÄUDE. RECHTS: UTCI DIFFERENZ ZWISCHEN ENVI-MET SIMULATION UND MOBILER PLATTFORM. QUELLE: QUECK & GOLDBERG (2020).	34
ABBILDUNG 29: MITTLERE TAGES- UND NACHT-PET IN °C AM 17. UND 18.01.2017 AN DEN EINZELNEN GEBÄUDEFORMEN. QUELLE: LANGER ET AL. (2020).	35
ABBILDUNG 30: LTO-STANDORTE IN HAMBURG. DIE LTO-DATEN WERDEN DURCH FOLGENDE INSTITUTIONEN ERHOBEN: DEUTSCHER WETTERDIENST (TÜRKISER KREIS), UNIVERSITÄT HAMBURG, INSTITUT FÜR METEOROLOGIE; HUSCO-NET UND WETTERMAST HAMBURG (ORANGES DREIECK). DIE SCHWARZE LINIE MARKIERT DIE STADTGRENZE. KARTENGRUNDLAGE: OPENSTREETMAP – VERÖFFENTLICHT UNTER ODbL 1.0. QUELLE: SCHERER ET AL. (2019A).	37

ABBILDUNG 31: IOL IN DER HAMBURGER HAFEN CITY. Roter Kreis: Ausschnitt für Windkanalmodell (Maßstab 1:500; Radius 875 m), Gelber Kreis: Ausschnitt für die Analyse (Radius 675 m). Bild in WGS84/Pseudo-Mercator Projektion. Koordinaten in UTM32. Kartengrundlage: © 2017 GeoBasis-DE/BKG (© 2009), Google. Quelle: Scherer et al. (2019a).....	38
ABBILDUNG 32: Wettermast Hamburg (links) und Husco-Net Messstation in der Hafen City (rechts). Quelle: Ament et al. (2020).....	39
ABBILDUNG 33: Messaufbauten während der IOPs in der Hamburger Hafen City: Referenzwindprofile an einem 30 m Mast (oben links). Standort des Mastes: blaues Rechteck rot umrandet im mittleren Bild. Fesselballon auf dem Dach der Hafen City Universität (oben rechts und Startpunkt des Ballons durch blauen Kreis, rot umrandet im mittleren Bild angezeigt). Gelber Pfeil zeigt auf Gebäude der Hafen City Universität (HCU). Transekt mit sechs Windmasten vor der Hafen City Universität (rote Pfeile im mittleren Bild, Stationen A-F im Bild unten). Entlang der punktierten Linien (mittleres Bild) wurden mobile Messungen des thermischen Komforts durchgeführt. Quelle: Ament et al. (2020).....	40
ABBILDUNG 34: Relativer Fehler re_U eines 3D Ultraschallanemometers (RM Young 81000) für alle drei Windkomponenten ($re_U = (U_{SONIC} - U_{WINDKANAL}) / U_{WINDKANAL}$). Linke Seite: Ergebnisse der Windkanalmessungen. Rechte Seite: nach Anwendung der Kalibrierfunktion. Quelle: Queck & Goldberg (2020).....	41
ABBILDUNG 35: Ablenkung der Windrichtung bei einer Anströmung aus Südost (130° Grundströmung) an den sechs Messpositionen des Transekts neben der Hafen City Universität. In Rot sind die Naturmessungen (OBS), in Blau die Windkanalergebnisse (EWTL) und in Grün die PALM-4U Simulationsdaten dargestellt. Das Balkendiagramm gibt den Datenumfang, der in die statistische Auswertung eingegangen ist, wieder. Quelle: Ament et al. (2020).....	42
ABBILDUNG 36: Böenfaktor an den sechs Standorten A-F des Transekts vor der Hafen City Universität unterteilt nach den vier IOP. Der Böenfaktor ist definiert als das Verhältnis der Windgeschwindigkeit der stärksten Böen in einem 10 min Messintervall zur mittleren Windgeschwindigkeit. Quelle: Ament et al. (2020).....	42
ABBILDUNG 37: Fesselballonmessungen vom Dach der Hafen City Universität, ergänzt durch die Messungen mit dem 30 m Messmast (gelbe Punkte am unteren Rand). Rel. Humidity – relative Feuchte; Wind Speed – Windgeschwindigkeit, Wind Direction – Windrichtung, Altitude – Höhe über Grund. Quelle: Queck & Goldberg (2020).	43
ABBILDUNG 38: LTO Standorte in Stuttgart. Die LTO-Daten werden durch folgende Institutionen erhoben: Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (lila Stern), Amt für Umweltschutz Stuttgart (weiße Raute), Deutscher Wetterdienst (türkiser Kreis), Universität Hohenheim (graues Rechteck), Universität Stuttgart, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (pinkes Dreieck). Die schwarze Linie markiert die Stadtgrenze. Kartengrundlage: OpenStreetMap – veröffentlicht unter ODbL 1.0. Quelle: Scherer et al. (2019a).....	45
ABBILDUNG 39: IOL in Stuttgart. Rotes Rechteck: Ausschnitt für Windkanalmodell (Maßstab 1:500; Ausmaß 875 m), Gelbes Rechteck: Ausschnitt für die Analyse (Ausmaß 675 m). Bild in WGS84/Pseudo-Mercator Projektion. Koordinaten in UTM32. Kartengrundlage: © 2017 GeoBasis-DE/BKG (© 2009), Google. Quelle: Scherer et al. (2019a).	46
ABBILDUNG 40: Stuttgart und umliegende Gemeinden (links). Luftbild des zentral gelegenen Marienplatzes inklusive Standort (roter Kreis) des Messwagens von TP8. Quelle: Baumüller et al. (1988) (links); VOGT & SAMAD 2020 (rechts).....	47
ABBILDUNG 41: Mittlere Windrose von März 2017 bis Dezember 2019 für den Standort Marienplatz. Quelle: VOGT & SAMAD (2020).....	48
ABBILDUNG 42: Temperaturrose (A) und Stickstoffmonoxid-Schadstoffrose (B) von März 2017 bis Dezember 2019 für den Standort Marienplatz. Quelle: VOGT & SAMAD (2020).....	49
ABBILDUNG 43: Tagesgang, Wochengang und Jahresgang der Anzahl der Fahrzeuge, die von März 2017 bis Dezember 2019 an der Messstation Marienplatz vorbeifahren. Quelle: VOGT & SAMAD (2020).....	50
ABBILDUNG 44: Tagesgang, Wochengang und Jahresgang der Geschwindigkeit der Fahrzeuge, die von März 2017 bis Dezember 2019 an der Messstation am Marienplatz vorbeifahren. Quelle: VOGT & SAMAD (2020).	50
ABBILDUNG 45: Mittlerer Tagesgang, Wochengang und Jahresgang als Stundenmittelwert für die Stickstoffmonoxid- (NO), Stickstoffdioxid- (NO ₂) und Ozon (O ₃)-Konzentrationen für die Periode zwischen März 2017 und Dezember 2019. Quelle: VOGT & SAMAD (2020).....	51

ABBILDUNG 46: LINKS: VERTIKALPROFILE DER LUFTTEMPERATUR AUS RADIOSONDENAUFSTIEGEN DES DWD AM ERWIN-SCHÖTTLE-PLATZ (ES) UND MULTIKOPTERAUFSTIEGEN DER LUH IM NESENBACHTAL (NB; STADTTEIL KALTENTAL) AM 14.-15.08.2017. RECHTS: NÄCHTLICHE PROFILMESSFAHRT ENTLANG DES NESENBACHTALS VOM STADTTEIL KALTENTAL BIS ZUM UNTEREN SCHLOßGARTEN AM 15.08.2017. QUELLE: HODAN ET AL. (2020).	52
ABBILDUNG 47: TAGESGÄNGE DER DWD STATIONSMESSUNGEN AM 14.-15.08.2017. OBEN LINKS: LUFTTEMPERATUR AN STATIONEN ENTLANG DES NESENBACHTALS UND AM FLUGHAFEN, OBEN RECHTS: WINDRICHTUNG IM NESENBACHTAL (BÖBLINGER STR., MÖHRINGER STR.) UND AM FLUGHAFEN, UNTEN LINKS: TALPARALLELE WINDKOMPONENTE U_s UND LUFTTEMPERATURDIFFERENZ ΔT ZWISCHEN BÖBLINGER STR. UND MÖHRINGER STR., UNTEN RECHTS: TEMPERATURÄNDERUNG DURCH TALPARALLELE ADVEKTION ZWISCHEN BÖBLINGER STR. UND MÖHRINGER STR. QUELLE: HODAN ET AL. (2020).	53
ABBILDUNG 48: ISOPLETHENDIAGRAMM DER STUNDENWERTE DER HORIZONTALWINDE, GEMESSEN VOM MULTIKOPTER-RADIOSONDEN-MESSSYSTEM AM 14./15.02.2017 IM STUTTGARTER NESENBACHTAL. QUELLE: MEUSEL (2020).	54
ABBILDUNG 49: ISOPLETHENDIAGRAMM DER STUNDENWERTE DER LUFTTEMPERATUR IN °C, GEMESSEN VOM MULTIKOPTER-RADIOSONDEN-MESSSYSTEM VOM 14.-15.02.2017 (IOP1) IM STUTTGARTER NESENBACHTAL. QUELLE: MEUSEL (2020).	54
ABBILDUNG 50: ISOPLETHENDIAGRAMM DER STUNDENWERTE DER RELATIVEN FEUCHTE IN %, GEMESSEN VOM MULTIKOPTER-RADIOSONDEN-MESSSYSTEM VOM 14.-15.02.2017 (IOP1) IM STUTTGARTER NESENBACHTAL. QUELLE: MEUSEL (2020).	55
ABBILDUNG 51: DURCHSCHNITTICHE RÄUMLICHE VERTEILUNG VON STICKSTOFFMONOXID WÄHREND DER IOP 3 (18. – 24.02.2018). KARTENGRUNDLAGE: OPENSTREETMAP. QUELLE: VOGT & SAMAD (2020).	56
ABBILDUNG 52: ERGEBNISSE DER STICKSTOFFDIOXID-PASSIVSAMMLERMESSUNGEN FÜR DIE IOP 3 (21.01.-18.03.2018). QUELLE: VOGT & SAMAD (2020).	57
ABBILDUNG 53: RÄUMLICHE VERTEILUNG VON STICKSTOFFDIOXID-MITTELWERT WÄHREND IOP 4 (14.06.-03.07.2018). KARTENGRUNDLAGE: OPENSTREETMAP. QUELLE: VOGT & SAMAD (2020).	58
ABBILDUNG 54: ERGEBNISSE DER STICKSTOFFDIOXID-PASSIVSAMMLER FÜR DIE IOP 4 (03.06.-30.07.2018). QUELLE: VOGT & SAMAD (2020).	58
ABBILDUNG 55: MISCHUNGSVERHÄLTNIS VON STICKSTOFFDIOXID AUF DER ROUTE RUND UM DAS NECKARTOR IN STUTTGART (IOP 3; 13.02.2018). QUELLE: KLEMP ET AL. (2020).	59
ABBILDUNG 56: KERNERPLATZ MIT BLICK NACH NORDEN HIN ZUM NECKARTOR. RÄUMLICHE VARIABILITÄT DER STICKSTOFFDIOXID-KONZENTRATION (MINIMALER ABSTAND B 14 – KERNERPLATZ: CA. 100 M). FARBSKALA FÜR STICKSTOFFDIOXID SIEHE ABB. 55. QUELLE: KLEMP ET AL. (2020).	60
ABBILDUNG 57: TAGESZEITLICHER VERLAUF DER STICKSTOFFDIOXID-KONZENTRATION WÄHREND DER IOP 3 AM 13.02.2018 AUF DER FESTGELEGTE ROUTE. QUELLE: KLEMP ET AL. (2020).	61
ABBILDUNG 58: ZWEI-MINUTEN-FÜNF-PERZENTIL-TIEFPASSFILTERUNG DER STICKSTOFFDIOXID-KONZENTRATIONEN WÄHREND EINER MESSFAHRT IM VERLAUF DER IOP 1 (20.02.2017) IM WESTLICH GELEGENEN UMLAND VON STUTTGART. QUELLE: KLEMP ET AL. (2020).	62
ABBILDUNG 59: STICKSTOFFDIOXID-KONZENTRATIONEN WÄHREND EINER MESSFAHRT IM VERLAUF DER IOP 4 (09.07.2018, 07:00-09:30 UTC) IM WESTLICH GELEGENEN UMLAND VON STUTTGART. ERKUNDUNGSMESSUNG ZUR PLANUNG VON FLUSSDIVERGENZUNTERSUCHUNGEN IM RAHMEN DER ZWEITEN PROJEKTPHASE: EVALUIERUNG DES EMISSIONS-, TRANSPORT- UND CHEMIEMODULS VON PALM-4U. QUELLE: KLEMP ET AL. (2020).	63
ABBILDUNG 60: GEMESSENE KONZENTRATIONSVERLÄUFE VON KOHLENSTOFFDIOXID (CO_2), STICKSTOFFDIOXID (NO_2), STICKSTOFFMONOXID (NO) UND KOHLENSTOFFMONOXID (CO) WÄHREND DER PASSAGEN DES STUTTGARTER HESLACHER TUNNELS (IOP 2; 02.07.2017). GESTRICHELTE LINIEN MARKIEREN DIE JEWEILIGEN EINTRITTS- UND AUSTRITTSZEITEN DES MOBILEN MESSLABORS. QUELLE: KLEMP ET AL. (2020).	65
ABBILDUNG 61: BEISPIEL FÜR EINEN LINEAREN KORRELATIONSFIT ZWISCHEN KOHLENSTOFFMONOXID (CO) UND DER GLEICHZEITIG GEMESSENEN KOHLENSTOFFDIOXID (CO_2)-KONZENTRATION IM HESLACHER TUNNEL (STUTTGART). DURCHFART DES STUTTGARTER HESLACHER TUNNELS (IOP 2; 02.07.2017 15:14-15:18 UTC). ES GILT: $\text{CO (ppm)} = 7.015 \cdot 10^{-3} \text{ CO}_2 \text{ (ppm)}$; $R^2 = 0.960$. QUELLE: KLEMP ET AL. (2020).	66
ABBILDUNG 62: STICKSTOFFDIOXID (NO_x)/KOHLENSTOFFDIOXID (CO_2)-VERHÄLTNIS IN ABHÄNGIGKEIT DER AUßENTEMPERATUR IM HESLACHER TUNNEL (STUTTGART). DURCHFART DES HESLACHER TUNNELS WÄHREND DER STUTTGARTER IOPs FÜR UNTERSCHIEDLICHE WOCHEN- UND WOCHENENDTAGE. QUELLE: KLEMP ET AL. (2020).	67

ABBILDUNG 63: VERTIKALPROFILE DER METEOROLOGISCHEN PARAMETER (LUFTTEMPERATUR, RELATIVE LUFTFEUCHTE, WINDGESCHWINDIGKEIT, WINDRICHTUNG) UND SCHADSTOFFE (SCHWARZER KOHLENSTOFF UND FEINSTAUB) FÜR EINE SONDIERUNG AM 08.07.2018 UM 20:52 MESZ. DIE BLAUE LINIE ZEIGT DIE ERGEBNISSE WÄHREND DES AUFSTIEGS UND DIE ROTE LINIE WÄHREND DES ABSTIEGS. QUELLE: VOGT & SAMAD (2020).	68
ABBILDUNG 64: BILDUNG (LINKS) UND AUFLÖSUNG (RECHTS) DER INVERSIONSSCHICHT WÄHREND DER IOP 4 – PHASE (08.-09.07.2018). QUELLE: VOGT & SAMAD (2020).	69
ABBILDUNG 65: PM _{2,5} -VERTIKALPROFILE WÄHREND DER BILDUNG (LINKS) UND AUFLÖSUNG (RECHTS) DER INVERSIONSSCHICHT WÄHREND DER IOP 4 VOM 08.-09.07.2018. QUELLE: VOGT & SAMAD (2020).	70
ABBILDUNG 66: PM ₁ -VERTIKALPROFILE WÄHREND DER BILDUNG (LINKS) UND AUFLÖSUNG (RECHTS) DER INVERSIONSSCHICHT WÄHREND DER IOP 4 VOM 08.-09.07.2018. QUELLE: VOGT & SAMAD (2020).	70
ABBILDUNG 67: (A) POTENTIELLE TEMPERATUR AUS HATPRO-MESSUNGEN. (B) HORIZONTALWINDE VOM WINDLIDAR WINDCUBE. (C) HORIZONTALWINDE AN DER FEUERWACHE (MITTELS VIRTUAL-TOWER-TECHNIK AUS DREI WSL200 LIDARGERÄTEN ABGELEITET). (D) INFRAROTTEMPERATUR AUS HATPRO-MESSUNGEN. DIE GESTRICHELTE LINIE ZEIGT DIE MITTLERE KAMMHÖHE AUF 470 M Ü. NN. QUELLE: KISELEVA ET AL. (2020).	72
ABBILDUNG 68: BEFLIEGUNG STUTTGART AM 09.07.2018 AM VORMITTAG. DARGESTELLT SIND DIE IN-SITU-STICKSTOFFDIOXID-KONZENTRATIONEN. IN DER BOX SIND FLUGHÖHEN UND GRENZSCHICHTHÖHE ANGEZEIGT. QUELLE: PÜHL (2019).	73
ABBILDUNG 69: ZEITLICHER VERLAUF DER SPURENGASKONZENTRATIONEN METHAN (CH ₄), KOHLENSTOFFDIOXID (CO ₂), OZON (O ₃) UND STICKSTOFFDIOXID (NO ₂) UND FLUGHÖHE AUF DEM FLUG AM 09.07.2018 AM VORMITTAG ÜBER STUTTGART. DIE GRAUEN KÄSTEN KENNZEICHNEN DEN STADTBEREICH VON STUTTGART. QUELLE: PÜHL (2019).	74
ABBILDUNG 70: WIE ABB. 69, NUR FÜR DEN NACHMITTAGSFLUG. QUELLE: PÜHL (2019).	74
ABBILDUNG 71: VERTIKALPROFILE FÜR DAS MISCHUNGSVERHÄLTNISS VON WASSER IN DER ATMOSPHERE (MIXING RATIO), DIE POTENZIELLE TEMPERATUR, WINDGESCHWINDIGKEIT UND KOHLENSTOFFDIOXID (CO ₂) ÜBER STUTTGART AM 09.07.2018 UM 11:30 UTC. DIE GRENZSCHICHTHÖHE (GRAUE LINIE) LAG ZU DIESEM ZEITPUNKT UMGEFÄHR BEI 1500 M Ü. NN. QUELLE: PÜHL (2019).	75
ABBILDUNG 72: OBEN LINKS: MESSVERGLEICH DER TEMPERATURSENSOREN MIT DEN MESSFAHRZEUGEN DER UNI STUTTGART UND DES DEUTSCHEN WETTERDIENSTES (DWD) WÄHREND DER IOP 4 IN STUTTGART. OBEN RECHTS: MESSVERGLEICH AUF DEM STUTTGARTER MARIENPLATZ: MOBILE FAHRRAD-ANALYTIK UND STATIONÄRE ANALYTIK DES IFK MIT MOBILAB-ANALYTIK. UNTEN LINKS: AUßENLUFT-VERGLEICH FÜR STICKSTOFFMONOXID, STICKSTOFFDIOXID UND OZON MIT TP8 AUF DEM GELÄNDE DES IFK DER UNI STUTTGART. QUELLE: KLEMP ET AL. (2020).	76
ABBILDUNG 73: VORBEREITUNG ZUM AUßENLUFTVERGLEICH AUF DEM FLUGHAFEN SCHÖNHAGEN (17.07.2018, IOP 4) ZUR DATENHARMONISIERUNG BEIDER MESSSYSTEME IM KONTEXT DER GEMEINSAMEN UNTERSUCHUNGEN (TP14 UND TP6) IN STUTTGART UND IN BERLIN (CESSNA UND MOBILAB (MOBILE BODENSTATION)). QUELLE: KLEMP ET AL. (2020).	76
ABBILDUNG 74: DATENBEREITSTELLUNG UND NUTZUNGSMÖGLICHKEIT ENTSPRECHEND DER VORLIEGENDEN DATENNUTZUNGSRICHTLINIE. MODIFIZIERT NACH SCHERER ET AL. (2019b).	81
ABBILDUNG 75: DAS SCHEMA ILLUSTRIERT DEN DATEN- UND INFORMATIONSFLUSS FÜR DIE PRÜFUNG UND ALLGEMEINE EVALUIERUNG VON PALM-4U. DURCHGEZOGENE LINIEN ZEIGEN DEN DATEN- UND INFORMATIONSFLUSS. GEPUNKTETE LINIEN GEBEN DIE JEWEILIGEN PARTNER AN, DIE MODELLSIMULATIONEN UND EVALUIERUNGSROUTINEN DURCHFÜHREN.	85
ABBILDUNG 76: EXEMPLARISCHE MESSSTANDORTE IN DER HAFENCITY HAMBURG FÜR DEN VERGLEICH ZWISCHEN WINDKANALMESSUNGEN UND PALM-4U.	88
ABBILDUNG 77: VERGLEICH ZWISCHEN WINDKANALMESSUNGEN (ROT) UND PALM-4U (BLAU). OBEN: NORMIERTE WINDGESCHWINDIGKEIT IN OST-WEST-RICHTUNG (LINKS) UND NORD-SÜD-RICHTUNG (RECHTS) AM STANDORT FG1-04. UNTEN: RICHTUNGSABHÄNGIGE TURBULENZINTENSITÄT (LINKS IN OST-WEST- UND RECHTS IN NORD-SÜD-RICHTUNG) AM STANDORT FG1-11. QUELLE: AMENT ET AL. (2020).	89
ABBILDUNG 78: AUSSCHNITT AUS DER KNOWLEDGE BASE DES [UC] ² PROGRAMMS.	90

TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 3: ÜBERSICHT DER TEILPROJEKTE IM 3DO VERBUND.....	5
TABELLE 4: ZEITRÄUME DER IOP MESSUNGEN (HAUPTPERIODEN) UND BETEILIGTE PARTNER (TP).....	8
TABELLE 3: ÜBERSICHT DER DATENNUTZUNGSRICHTLINIEN IM [UC] ² PROGRAMM.....	80
TABELLE 4: DATENSTANDARD-TABELLEN UND INHALTE.....	82
TABELLE 5: VEREINBARE SIMULATIONEN ZUR EVALUIERUNG VON PALM-4U.....	86