

SONDIERUNG METEOROLOGISCHER PARAMETER MIT UNBEMANNTEN LUFTFAHRTSYSTEMEN

ANDREAS PHILIPP¹, ERIK PETERSEN¹, JUCUNDUS JACOBEIT¹

¹UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR GEOGRAPHIE, ALTER POSTWEG 118, 86159 AUGSBURG

E-MAIL: A.PHILIPP@GEO.UNI-AUGSBURG.DE

Zusammenfassung: Atmosphärische In-situ-Messungen mit unbemannten Luftfahrtsystemen stellen eine zunehmend wichtige Alternative und Ergänzung zu Fernerkundungsverfahren dar. Am Institut für Geographie der Universität Augsburg wurde hierzu ein leichtgewichtiges Starrflüglersystem für meteorologische Sensorik entwickelt, das sich mittlerweile im produktiven Einsatz bei verschiedenen Umweltmesskampagnen befindet und auch an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) erfolgreich getestet wurde.

Abstract: Atmospheric measurements using unmanned aerial systems are an increasingly important alternative and supplement to remote sensing methods. At the Institute for Geography at the University of Augsburg a light weight fixed wing system has been developed, which is already in operational use for several environmental measurement campaigns and has also been tested successfully at the Environmental Station Schneefernerhaus (UFS).

Einführung

Unbemannte Luftfahrtsysteme (engl. Unmanned aerial systems / UAS) erleben durch die fortschreitende Miniaturisierung leistungsfähiger Steuerkomponenten und Sensoren in den vergangenen Jahren eine rasante Weiterentwicklung, welche auch für umweltwissenschaftliche Anwendungen nutzbar ist (z. B. Reuder et al., 2009). Der entscheidende Vorteil der Verwendung von UAS ist hierbei

die In-situ-Messung, die Umweltparameter direkt am Ort der Datenerhebung erfasst und somit Unsicherheiten aus der Prozessierung indirekter Daten vermeiden kann.

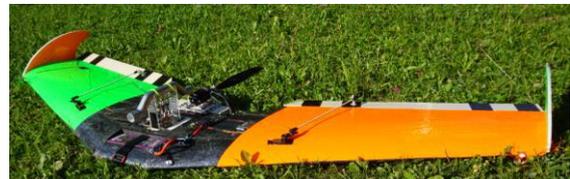


Abb.1: Rumpf und Sensorträger des am Institut für Geographie der Universität Augsburg entwickelten unbemannten Luftfahrtsystems.

Weitere Vorteile ergeben sich aus der Mobilität der Fluggeräte, die eine dreidimensionale Sondierung der unteren Atmosphärenschichten erlaubt. Und schließlich kann bei geringen Material- und Fertigungskosten eine Vielzahl von Geräten im Paralleleinsatz an verschiedenen Standorten betrieben werden, um eine größere räumliche Abdeckung zu erzielen. Ein gezielt klein dimensioniertes System wurde an der Universität Augsburg entwickelt und befindet sich in verschiedenen Projekten seit einigen Jahren erfolgreich im Einsatz.

System-Setup

Während Drehflügler oder Multicopter sich insbesondere für den Schwebflug eignen, zeichnen sich Flächenflugzeuge durch höhere Energieeffizienz und damit längere Flugzeiten aus. Zudem ist die Sichtbarkeit und damit die Aufstiegshöhe von Starrflüglern deutlich höher, was die Entscheidung für letzteren Typ begründet. Das System besteht aus einem Rumpf aus EPP (Expanded Polypropylen) von

160 cm Spannweite und einem Abfluggewicht von ca. 1800 g. Der Antrieb besteht aus einem Elektromotor mit Klappluftschrauben der als Pusher am Heck montiert von einem Lithium-Polymer-Akkumulator mit Strom versorgt wird.

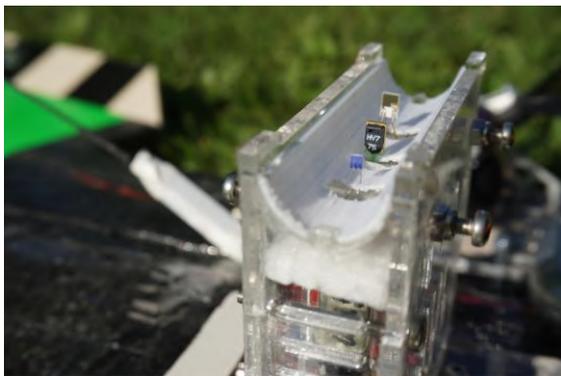


Abb.2: Oben: 3D-gedrucktes Strahlungsschutzrohr (passiv ventiliert). Unten: von vorne nach hinten: der Temod Pt-1000 Widerstands-Temperatursensor (Hersteller B&B), der SHT75-Sensor (Hersteller Sensirion) für Temperatur und Feuchte sowie der P14rapid-Sensor (Hersteller IST) für relative Luftfeuchte bei geringer Ansprechzeit.

Die Steuerung erfolgt in der Regel vollautomatisch über das Open-Source Autopilot-System PPRZ, welches insbesondere von der ENAC (Ecole Nationale de l'Aviation Civile) in Toulouse entwickelt wird (Reuder et al., 2009). Als Funkverbindung während des Fluges stehen sowohl eine Funkfernsteuerung via Handsender als auch eine separate Telemetrie-Verbindung zu einem Groundstation-Computer zur Verfügung. Über beide Verbindungen kann das Gerät gesteuert werden, als auch Flug- bzw.- Sensordaten online abgerufen werden. In der Regel ist ein Eingreifen

durch den Steuerer nur bei der Landung erforderlich. Der Start und Flug erfolgt sonst vollautomatisch nach vorprogrammiertem Flugplan.

Sensorik

In der Grundkonfiguration sind Sensoren für Temperatur und Luftfeuchte zusammen mit dem Autopilotcontroller und dem Telemetriemodem in eine modulare Trägerbox integriert (Abb. 2 und Tab. 1). Die Aufzeichnung erfolgt, neben Telemetriefunk, onboard auf SD-Karte mit 4 Hz. Die Windgeschwindigkeit und -richtung wird berechnet aus der Groundspeeddifferenz zwischen Gegen- und Rückenwind in einem Kreisflug bei konstantem Schub (Bonin et al., 2013)

Tab. 1: Verwendete Standardsensoren für Temperatur und Feuchte. Die Ansprechzeit bezieht sich auf 63 % eines Änderungssignals, ausgenommen bei Temod, hier gibt der Hersteller die Zeit für 50 % Änderung an.

Typ	Variable	Methode	Auflösung	Genauigkeit	Ansprechzeit
SHT75	Temperatur	Bandgap	0,01°	± 0,3	5 s
SHT75	Feuchte	kapazitiv	0,05%	± 1,8%	8 s
Temod	Temperatur	Widerstand	0,008°	± 0,15	3 s
P14r	Feuchte	kapazitiv	0,25%	±1%	1,5 s

Einsatzbereiche

Das vorgestellte System eignet sich insbesondere zur dreidimensionalen Sondierung der meteorologischen Grundparameter Lufttemperatur, Feuchte und Wind. Somit können die wesentlichen Bedingungen der planetaren Grenzschicht der Atmosphäre z. B. für Schadstoffverteilung erfasst werden. Die Eignung für Projekte mit jeweils spezifischen Anforderungen soll im Folgenden anhand einiger ausgewählter Messkampagnen veranschaulicht werden.

- **Operationelle Sondierung an der Universität Augsburg:** In einer Pilotstudie mit über ein Jahr Laufzeit wurde die Eignung des Systems für regulären Einsatz im Dauerbetrieb erfolg-

reich getestet. Ca. zweimal pro Woche wurde jeweils vor Sonnenaufgang ein Spiralförmiges Vertikalprofil bis 300 Meter über Grund sondiert. Der jeweilige Einsatz dauerte ca. 30 Minuten, was die Alltagstauglichkeit des Systems unter Beweis stellt. Die erhobenen Temperatur- und Feuchtedaten der ca. 80 Tage werden zurzeit in einer Abschlussarbeit statistisch ausgewertet.

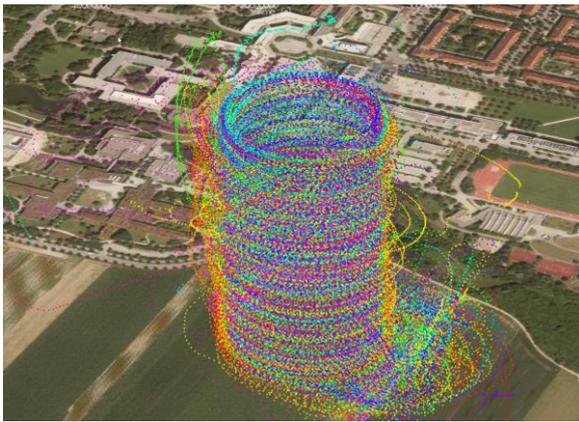


Abb.3: Messpunkte der Spiralförmigen UAS-Aufstiege an ca. 80 Tagen zwischen August 2015 und September 2016 in 3D-Darstellung.

- **Machbarkeitsstudie Aerosol-Supersite an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS):** Eine besondere Herausforderung ergibt sich mit Einsatz von UAS im Hochgebirge durch hohe Windgeschwindigkeiten und reliefbedingte Böen sowie das geringe Platzangebot für ebene Landflächen. Erschwerend kommen Abschattungseffekte in Hinblick auf Navigationssatelliten hinzu. Am 2.12.2015 wurden zusammen mit Projektpartnern der Machbarkeitsstudie „Aerosol Supersite“ (siehe) zur Aerosolsondierung sechs Flüge mit Start und Landung auf dem 12x9 m großem Dach der Forschungsseilbahn erfolgreich absolviert und damit die Hochgebirgstauglichkeit gezeigt. (Siehe Neumann et al., Kapitel 23, Seite 91).



Abb.4: UAS-Start vom Dach der Forschungsseilbahn der UFS am 2.12.2015.

- **ScaleX-Kampagne des IMK-IFU:** Parallelaufstiege mehrerer UAS gleichzeitig an räumlich verteilten Standorten erlauben die Bestimmung räumlicher Gradienten auch über größere Distanzen hinweg. Im Rahmen einer breit angelegten Messkampagne zur Bestimmung von klimatischen Haushaltsgrößen auf verschiedenen räumlichen Skalen (Wolf et al., 2016) wurden an fünf Standorten parallel stündliche Aufstiege über einen Tagesgangzyklus hinweg bis 1000 Meter über Grund durchgeführt. In dieser Höhe sind die Fluggeräte noch ausreichend sicher visuell in Position und Lage zu beurteilen, was jedoch in etwa die maximale Aufstiegshöhe darstellen sollte. Damit wird jedoch schon ein Großteil der üblichen Ausdehnung der planetaren Grenzschicht der Atmosphäre abgedeckt, wie in Abbildung 5 deutlich wird. Neben einem Beispiel für advektive Schichtung (Abb. 5 Mitte) ist hier ein kompletter Tagesgang, beginnend mit der Mischungsschicht im ersten Drittel, einer folgenden einsetzenden Inversion unter einem Residuallayer im Zentrum und mit deren Auflösung am rechten Rand, dargestellt (Abb. 5 unten).

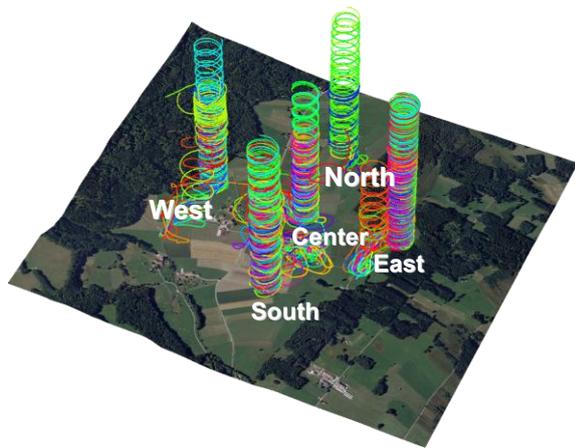
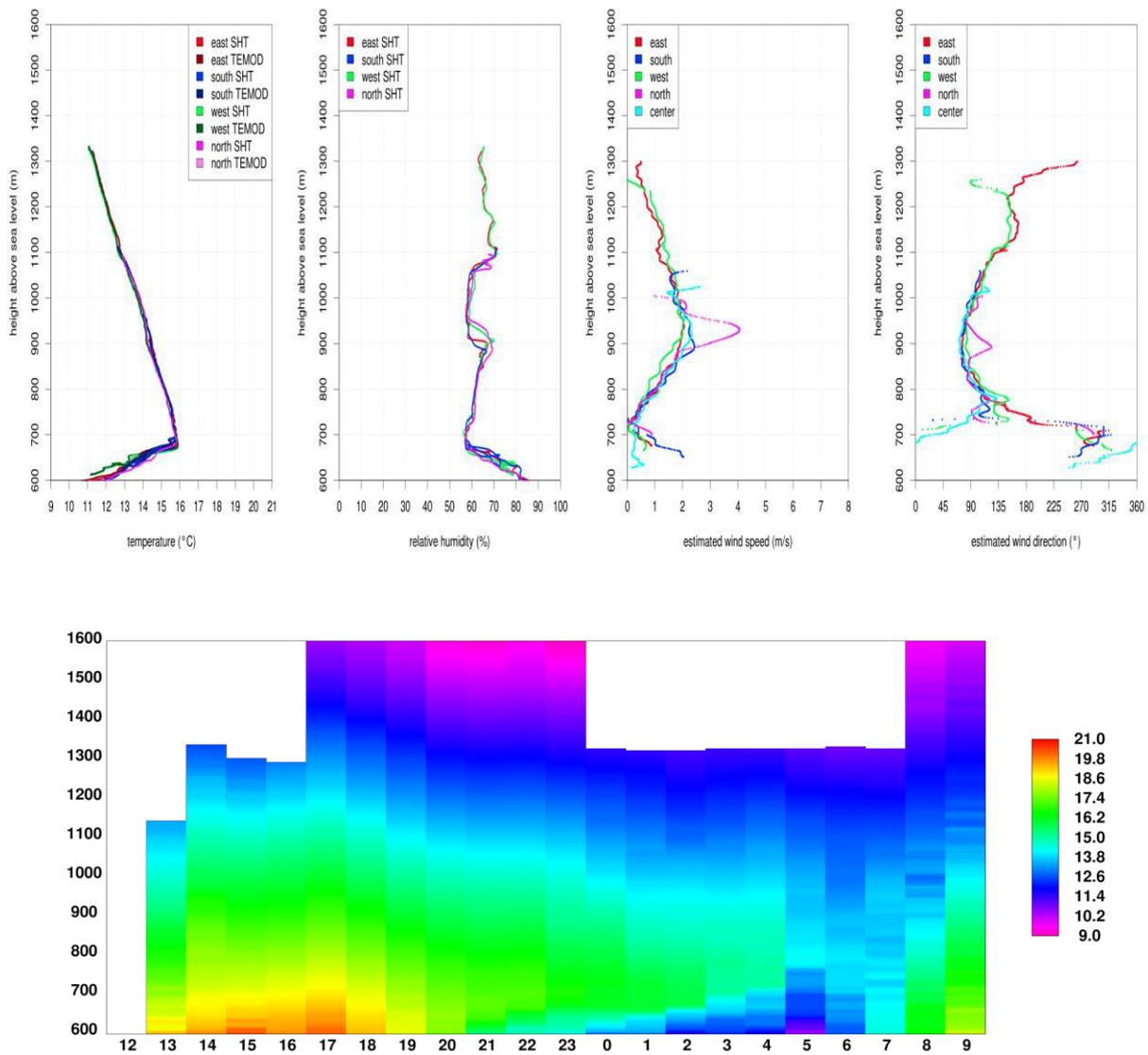


Abb.5: Oben: Aufstiegs spiralen vom 6./7.7.2016 bei Fendt bei Peissenberg. Die Standorte befinden sich auf der Kante bzw. im Zentrum einer 1x1 km großen Modellgitternetzzelle. Mitte: Temperatur und Feuchteprofil für den 7.7.2016 3:00 Uhr MESZ für die verschiedenen Standorte. Unten: Tagesgang der Lufttemperatur für den Standort Ost. Die Abszisse kennzeichnet den Zeitverlauf mit stündlichen Aufstiegen, die Ordinate die Aufstieghöhe.



- **Stadtklimasondierung Berlin:** Der Einsatz von Fixedwing-UAS auch im städtischen Umfeld konnte bisher in zwei Kampagnen in Berlin gezeigt werden. Im BMBF-finanzierten Projekt „Urban Climate under Change“ zur Entwicklung eines neuen leistungsfähigen Stadtklimamodells werden 2017 und 2018 vier Intensivmesskampagnen zur Erhebung dreidimensionaler Validierungsdaten durchgeführt. Obwohl der Genehmigungsaufwand sowie die Logistik einen erheblichen Aufwand darstellen, konnte der UAS-Einsatz auch an den innenstädtischen Standorten Charlottenburg und Tempelhofer Feld durchgeführt werden, während ein dritter Standort im Grunewald gelegen als ruraler Referenzstandort dient. Die Daten hierzu befinden sich noch in der Auswertung.

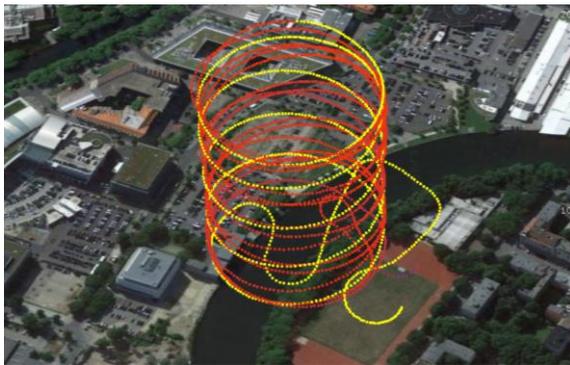


Abb.6: Messpunkte einer Aufstiegsspirale bis 250 Meter über Grund in Moabit/Charlottenburg Berlin.

Ausblick

Das vorgestellte UAS ist, wie gezeigt wurde, für vielfältige Zwecke mit Bedarf an Vertikalprofilen für Temperatur, Luftfeuchte und Wind einsetzbar. In einem im August 2017 angelaufenen Projekt zur Untersuchung der Aerosolverteilung im Bereich der Stadt Augsburg (Smart Air Quality Network) werden in einem neuen Typ zusätzlich optische Partikelzähler integriert. Dies soll dann künftig den direkten Zusammenhang zwischen Schichtungseigenschaften der planetaren Grenzschicht und Umweltparametern wie Feinstaubbelastung erkennen lassen.

Literatur

Bonin, T.A., P.B. Chilson, B.S. Zielke, P.M. Klein und Leeman, J.R. : Comparison and application of wind retrieval algorithms for small unmanned aerial systems. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 2, 177–187, 2013.

Reuder, J., P. Brisset, M. Jonassen, M. Müller und Mayer, S. : The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: A new tool for atmospheric boundary layer research. *Open Access Article Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 18, No. 2, 141-147, 2009.

Wolf B., C. Chwala, B. Fersch, J. Garvelmann, W. Junkermann, M. J. Zeeman, A. Angerer, B. Adler, C. Beck, C. Brosy, P. Brugger, S. Emeis, M. Dannenmann, F. De Roo, E. Diaz-Pines, E. Haas, M. Hagen, . Hajnsek, J. Jacobeit, T. Jadhuger, N. Kalthoff, R. Kiese, H. Kunstmann, O. Kosak, R. Krieg, C. Malchow, M. Mauder, R. Merz, C. Notarnicola, A. Philipp, W. Reif, S. Reineke, T. Rödiger, N. Ruehr, K. Schäfer, M. Schrön, A. Senatore, H. Shupe, I. Voelksch, C. Wanninger, S. Zacharias, und Schmid, H. P.: The ScaleX campaign: scale-crossing land-surface and boundary layer processes in the TERENO-preAlpine observatory. *BAMS* doi:10.1175/BAMS-D-15-00277, 2016.

Danksagung

Unterstützt wird die Entwicklung des Systems in Projekten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (Stadtklima im Wandel) sowie des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (Smart Air Quality Network).