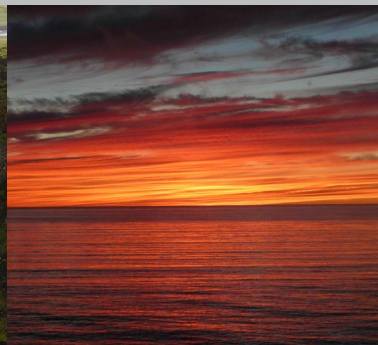


UNIA Universität Augsburg
Wissenschaftszentrum
Umwelt

Jahresbericht 2016



Umweltmonitoring mit unbemannten Luftfahrtsystemen

PROJEKTTEAM

- PD Dr. Andreas Philipp
andreas.philipp@geo.uni-augsburg.de
Tel.: 0821 598 2266
- M. Sc. Erik Petersen
erik.petersen@geo.uni-augsburg.de
Tel.: 0821 598 2765
- M. Sc. Alexander Groos
alexander.groos@giub.unibe.ch
- B. Sc. Pia Ferenci
pia.steckenreuter@student.uni-augsburg.de
- B. Sc. Stefan Engerer
stefan@engerer.net
- B. Sc. Benedikt Fiedler
benedikt.emilian.fiedler@student.uni-augsburg.de
- Prof. Dr. Jucundus Jacobeit
jucundus.jacobeit@geo.uni-augsburg.de
Tel.: 0821 598 2670

PROJEKTPARTNER

- Institut für Meteorologie und Klimaforschung – Institut für Atmosphärische Umweltforschung / Karlsruher Institut für Technologie, IMK-IFU/KIT
- Institut für Informatik, Universität Augsburg, Prof. Dr. Jörg Hähner
- Institute for Software and Systems Engineering, ISSE, Universität Augsburg
- Universitäres Zentrum für Gesundheitswissenschaften am Klinikum Augsburg, UNIKA-T
- Bayerisches Landesamt für Umwelt, LfU
- Betriebsgesellschaft der Umweltforschungsstation

Schneefernerhaus, UFS

- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., DLR, Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum, DFD, Abteilung Atmosphäre
- Technische Universität Berlin, TUB, Prof. Dr. Dieter Scherer
- Max-Planck-Institut Jena, MPI, M. Sc. Martin Kunz

Worum geht es?

Das Wissen über gesundheitsrelevante Umweltparameter der Luftqualität, wie z.B. Schadgaskonzentration, Feinstaub- oder Pollenverteilung, hängt maßgeblich von zuverlässigen Messungen ab. Ein in der geowissenschaftlichen Auswertung von Messdaten bekanntes Problem ist jedoch die Repräsentativität von Messungen im Raum, d.h. ob ein gemessener Wert auch für die mehr oder weniger nähere Umgebung noch Gültigkeit besitzt. Große Unterschiede zwischen Konzentrationen von Luftbeimengungen treten hierbei insbesondere in vertikaler Richtung auf. So können z.B. Feinstaubkonzentrationen in Bodennähe von denen in höheren Luftschichten deutlich abweichen, etwa wenn sich Luft am Boden nachts abkühlt und sich mit der darüberliegenden, wärmeren und somit spezifisch leichteren Luft nicht mehr durchmischt (sog. stabile Schichtung). Aber auch in horizontaler Richtung sind erhebliche Unterschiede zu beobachten, beispielsweise aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften von Oberflächen wie Rauigkeit oder Wärmekapazität oder aufgrund der Lage von Quellen und Senken. Um derartige räumliche Verteilungsmuster der Luftqualität, aber auch der hierfür relevanten meteorologischen Parameter, zu untersuchen, werden unbemannte Luftfahrtsysteme eingesetzt.

Umweltmonitoring mit unbemannten Luftfahrtsystemen

logischen Parameter wie Lufttemperatur, Feuchte und Wind auf der Mikroskala, d.h. mit Veränderungen auf Distanzen unter ca. 2 km, erfassen zu können, reichen fest installierte Instrumente oft nicht aus, da sie aufgrund der Kosten und des Installations- und Betreuungsaufwandes nicht beliebig dicht platziert werden können.

Als Alternative hat sich insbesondere in der Geographie die sog. mobile Messung etabliert, bei der relativ kleine und leichte Sensoren während der Messung durch den Raum bewegt werden und somit räumliche Variabilität direkt erfasst werden kann (siehe z.B. Seidel et al. 2016 für einen aktuellen Überblick). Eine Sonderform der mobilen Messung, die zudem in der Lage ist, die vertikale Dimension zu erkunden, hat sich erst in jüngerer Zeit mit der Verfügbarkeit erschwinglicher Mikroprozessoren und miniaturisierter Sensoren etabliert, die Sondierung mithilfe unbemannter Luftfahrtsysteme (auch als Drohnen bezeichnet). Seit ca. drei Jahren wird auch am Institut für Geographie der Universität Augsburg eine Flotte unbemannter Luftfahrtsysteme (engl. UAS für unmanned aerial systems, auch UAV für unmanned aerial vehicles) entwickelt und betrieben. Während für Film- und Fotoaufnahmen i.d.R. sog. Drehflügler oder Multikopter verwendet werden, kommen am Institut für Geographie Flächenflugmodelle (sog. Starrflügler) zu verschiedenen Messzwecken zum Einsatz, deren Bandbreite zur Verdeutlichung des Potentials dieser neuen Technik im vorliegenden Beitrag dargestellt werden soll.

Technische Grundlagen

In Hinblick auf Robustheit und Flugeigenschaften (auch bei ungünstigen Windverhältnissen) haben sich Nurflüg-

ler aus EPP-Schaumstoff (expanded Polypropylen) mit Spannweiten zwischen 1,40 m und 2,10 m bewährt, die als Eigenbau aus vorgefertigten Einzelteilen am Institut montiert und mit Elektroantrieb ausgestattet werden. Zur manuellen Steuerung wird eine handelsübliche Funkfernsteueranlage installiert, der Kern des Steuerungssystems ist jedoch das am ENAC (École Nationale de l'Aviation Civile, Toulouse) speziell entwickelte Mikroprozessorboard Apogee, das mithilfe verschiedener Flugsensoren sowohl als Autopilot fungiert, aber auch die Ansteuerung meteorologischer Sensoren und die Aufzeichnung und Übertragung der Daten in Echtzeit übernehmen kann. Die Programmierung des Autopilotcontrollers erfolgt über eine hochentwickelte Open-Source Softwareumgebung (PPRZ) und erlaubt sowohl die Vorabfestlegung eines genauen Flugplanes als auch dessen Änderung während des Fluges. Zur Orientierung verfügt das System über einen Navigationssatellitenempfänger (GNSS, engl.: global navigation satellite system), ein Barometer zur Höhenkontrolle und ein Inertialmessmodul (IMU, engl.: inertial measurement unit), das die Fluglage, Beschleunigung und Rotation erfasst. In Kontrollschleifen der Betriebssoftware wird mit deren Hilfe sowohl die Fluglage selbsttätig stabilisiert als auch ein gewünschtes Ziel angefliegen.

Die mitgeführten Lithium-Polymer-Akkus mit 5800 mAh erlauben bei einem Abfluggewicht von ca. 1,4 bis 2,5 kg eine Flugzeit von ca. 45 Minuten, je nach Geschwindigkeit (zwischen 10 und 30 m/s) und Aufstiegs-höhe, die von Freigaben der Deutschen Flugsicherung abhängt und mit Sondergenehmigungen bisher maximal 1000 Meter über Grund betragen hat. Als maximale Zuladung wurden bislang 1,2 kg auf einem Nurflügler mit 2,10 m Spannweite transportiert.

Umweltmonitoring mit unbemannten Luftfahrtsystemen

Rechtliche Rahmenbedingungen

Als sog. unbemannte Luftfahrtsysteme oder UAS gelten unbemannte Fluggeräte, die zu professionellen Zwecken betrieben werden. Davon unterscheiden sich *Flugmodelle* allein durch den Betrieb aus Gründen des Sports und der Freizeitgestaltung. UAS sind immer genehmigungspflichtig und unterliegen, zusammen mit den *Flugmodellen*, dem Luftverkehrsrecht, womit sich auch für den wissenschaftlichen Einsatz einige wichtige Regelungen ergeben: So darf niemals außerhalb des Sichtbereichs der steuernden Person geflogen werden, zum Start und zur Landung (nicht zum Überflug) muss der Grundstückseigentümer um Erlaubnis gefragt werden. Menschenansammlungen und kritische Anlagen dürfen nicht überflogen werden und die rechtlichen Regelungen zum Schutz der Privatsphäre sind uneingeschränkt einzuhalten. Bemannten Luftfahrzeugen ist immer auszuweichen. Zudem ist vor einem Aufstieg stets die Luftfahrtskarte und das Sichtflugbulletin der Deutschen Flugsicherung zu konsultieren, um sicherzustellen, dass nicht in kontrollierten Luftraum eingeflogen wird. Die Missachtung des letztgenannten Punktes ist es, die in jüngerer Zeit mehrmals zu Beinahe-Kollisionen im Bereich u.a. des Münchner Flughafens geführt hat.

Sensorik für das Umweltmonitoring

Die meteorologische Standardinstrumentierung der UAS besteht aus kapazitiven Temperatur- und Luftfeuchtesensoren, Widerstandsthermometern und Prandtl-Staudruckrohren, die die Geschwindigkeit des UAS relativ zur umgebenden Luft (Airspeed) messen, während mit dem GNSS die Geschwindigkeit relativ zum Boden



Abb. 1: Standardmodell der unbemannten Luftfahrtsysteme des Instituts für Geographie. In den grauen Strahlungsschutzrohren befinden sich der Temperatur- und Feuchtesensor.

Umweltmonitoring mit unbemannten Luftfahrtsystemen

(Groundspeed) gemessen wird. Aus der unterschiedlichen Beschleunigung durch Rückenwind und Gegenwind auf einer Kreisbahn lässt sich somit zusätzlich die absolute Windgeschwindigkeit und -richtung bestimmen, was in einer Masterarbeit implementiert und erfolgreich erprobt wurde (Petersen 2016). Darüber hinaus beschäftigt sich aktuell eine weitere Masterarbeit mit der Bestimmung relativer Intensität von Turbulenz aus Versatzdaten der IMU und des GNSS-Moduls, um die für Transportprozesse elementar wichtige Verwirbelung in der planetaren Grenzschicht der Atmosphäre abzuschätzen. Weiterhin werden kürzlich beschaffte, leichte optische Partikelzähler (sog. OPC) zur Erfassung der Aerosolverteilung eingesetzt. Eine bereits getestete Eigenentwicklung ist ein Haftschiichtpollensammler, der aus einem flachen, mittels Schrittmotor langsam rotierenden Zylinder besteht, um den ein Haftschiichtfilm gespannt wird. Eine Öffnung des Zylindergehäuses exponiert jeweils nur ein Segment des Haftfilms, das über den zeitlichen Fortschritt der Drehung jeweils einer bestimmten Flugphase zugeordnet und somit auch räumlich, insbesondere hinsichtlich der Höhenstufe, verortet werden kann. Darüber hinaus werden auch bildgebende Verfahren eingesetzt. Zu nennen sind hier zunächst photogrammetrische Verfahren, bei denen überlappende Senkrechtluftbilder die Kartierung und Höhenbestimmung der Erdoberfläche ermöglichen. Damit werden beispielsweise in fortgeschrittenen Seminaren der Masterstudiengänge Geographie sowie Klima- und Umweltwissenschaften Flussbettformen, z.B. von Iller und Wertach, bestimmt oder es wird ein Oberflächenmodell des Zugspitzplatts inklusive nördlichem Schneeferner errechnet. Weiterhin können Miniaturkameras mit modifizierten Infrarotfil-

tern zur Untersuchung der Photosyntheseleistung von Vegetationsflächen herangezogen werden. Aktuell in der Anschaffung begriffen ist schließlich ein Thermalkamerasystem, das Aufschluss über den Wärmehaushalt verschiedener Oberflächen geben soll. Einen Eindruck zu den inhaltlichen Fragestellungen, die mit derartiger UAS-gestützter Sensorik bearbeitet werden können, vermitteln die im Folgenden vorgestellten ersten Projekte.

UAS-Projekte und Messkampagnen

Intensivmesskampagnen

ScaleX 2015 und 2016 - Fendt

Den bisher umfangreichsten Einsatz hatte die UAV-Flotte in der Messkampagne ScaleX unseres Partnerinstituts IMK-IFU (Institut für Meteorologie und Klimaforschung – Institut für Atmosphärische Umweltforschung) des KIT (Karlsruher Institut für Technologie). Ziel dieser Kampagne unter Beteiligung internationaler Kooperationspartner ist die Schließung von Energie- und Stoffhaushaltsgleichungen anhand gemessener meteorologischer und hydrologischer Größen – ein Thema, das Umweltveränderungen unter Bedingungen des Klimawandels adressiert. Hierzu wurden zahlreiche Bodenstationen und -sensoren auf einer ca. 10 ha großen Messfläche im TERENO- (Terrestrial Environmental Observatories) Gebiet Fendt bei Peißenberg platziert und in Intensivmessperioden mit etlichen Fernerkundungsgeräten ergänzt. Zusätzlich wurden 2015 an drei Positionen im Messgebiet parallel Befliegungen bis 1000 m über Grund mit den Starrflüglern des IGUA (Institut für Geographie der Universität

Umweltmonitoring mit unbemannten Luftfahrtsystemen

Augsburg) durchgeführt, in den ersten 100 Höhenmetern begleitet von Quadrocoptern des ISSE (Institute for Software & Systems Engineering) der Universität Augsburg, die ebenfalls mit Temperatur- und Feuchtesensoren bestückt waren. Ein wesentliches Ergebnis dieser Befliegungen war, dass die UAS-gestützten Messungen Vorteile in der vertikalen und räumlichen Auflösung bringen und in den untersten 1000 Metern deutlich geringere Messungenauigkeiten aufwiesen als Fernerkundungsverfahren. Wie auch aus Abbildung 2 ersichtlich wird, ergab außerdem der Vergleich mit Messungen eines bemannten Ultraleichtflugzeugs sehr gute Übereinstimmungen (Wolf et al. 2016). Im Sommer 2016 wurde die Kampagne auf fünf Standorte ausgedehnt, die jeweils an den Kanten und im Zentrum einer 1 km³ großen Gitternetzbox eines mesoskaligen Klimamodells liegen (s. Abb. 3). Auswertungen und Vergleiche hierzu sind derzeit noch im Gange.

Machbarkeitsstudie Aerosol Supersite - Zugspitze

In Kooperation mit den Partnern Aerosol-Akademie, Umweltforschungsstation Schneefernerhaus UFS, KIT (IMK-IFU), DLR, dem Aerosolmessgerätehersteller Grimm und den kommerziellen UAS-Betreibern Quantum Systems und Dialogis wurde eine vom Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanzierte Studie zur Einrichtung einer sog. Supersite, d.h. eines intensiv beobachteten 10 x 10 km großen Gebietes zur Validierung von satellitengestützten Aerosolmessungen, durchgeführt. Neben dem Betrieb stationärer Messgeräte sollen dabei LIDAR-gestützte Aerosolmessungen neben solchen mit UAS durchgeführt werden, um die Abschätzung der

Profilvergleich Lufttemperatur 8:00 CEST 15.07.2015

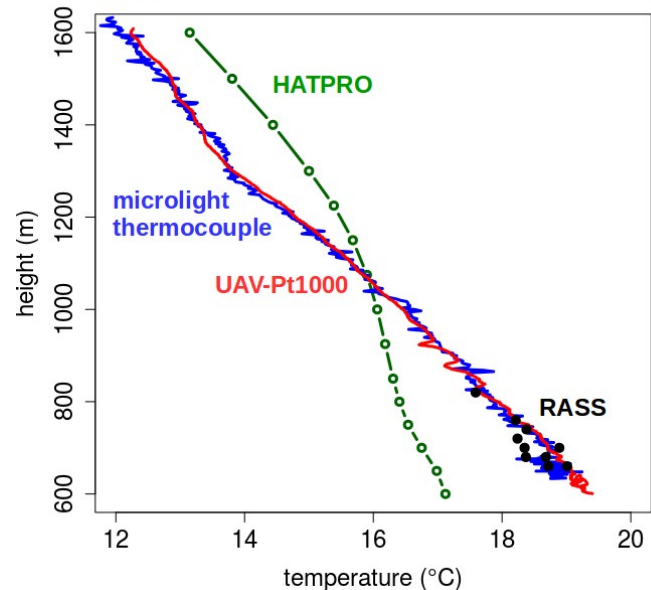


Abb. 2: Vergleich von Vertikalprofilen der Lufttemperatur zwischen 600 und 1000 Metern über dem Meer aufgenommen am 15.07.2015 um 8:00 Uhr CEST mit verschiedenen Messtechniken: grün: HATPRO (Humidity and Temperature Profiler) Mikrowellenspektrometer des IMK-IFU, schwarz: RASS (Radio Acoustic Sounding System) des IMK-IFU, blau: Thermocouple auf dem Ultraleichtflugzeug des IMK-IFU, rot: Widerstandsthermometer auf einem UAS des Instituts für Geographie der Universität Augsburg. Während HATPRO hohe Abweichungen zeigt, reichen die RASS-Daten nur bis ca. 200 Meter über Grund. Im Gegensatz zu diesen beiden Fernerkundungsmethoden zeigen die zwei luftgestützten In-Situ-Messungen hohe Übereinstimmung.

Umweltmonitoring mit unbemannten Luftfahrtsystemen

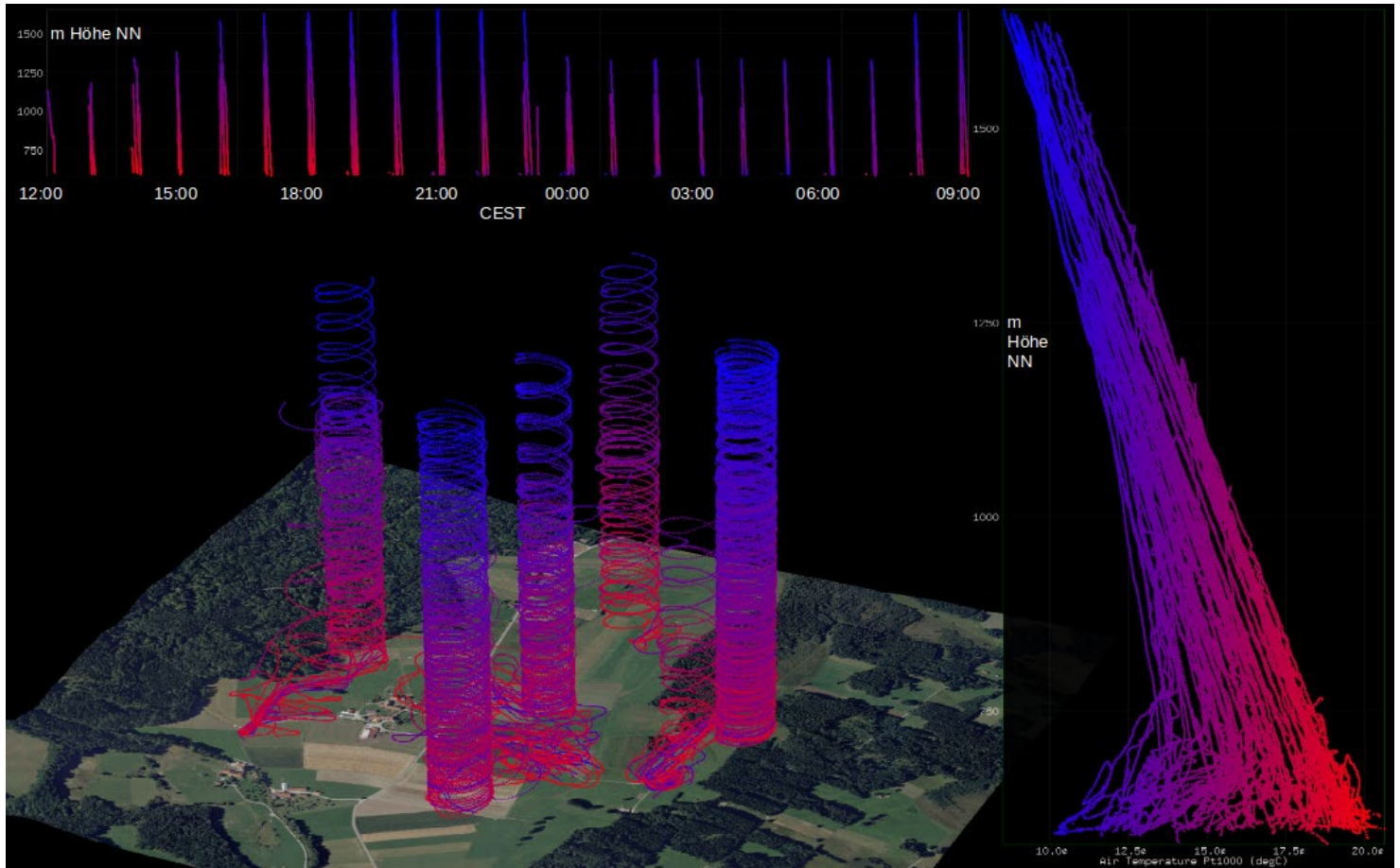


Abb. 3: Temperaturmesspunkte der Sondierflüge in Fendt während der ScaleX-2016 am 6./7.7.2016. Die Farbe der Punkte kennzeichnet die Lufttemperatur (rot: hoch, blau: niedrig). Oben: Zeit-Höhendiagramm der Messungen mit Aufstiegen bis zu 1000 m über Grund zu jeder vollen Stunde. Rechts: Temperatur-Höhendiagramm aller Aufstiege mit generell höheren Temperaturen tagsüber und stark ausgeprägter Bodeninversion nachts und morgens.

Umweltmonitoring mit unbemannten Luftfahrtsystemen



Abb. 4: Start eines UAS vom Dach der Forschungsseilbahn der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus, rechts ist das Fangnetz als Sicherheitsmaßnahme für die Landung zu sehen.

Aerosolkonzentration aus Satellitendaten zu verbessern. Die Vorstudie sollte u.a. zeigen, ob der UAS-Betrieb an der UFS auf der Zugspitze mit den dort herrschenden, z.T. extremen meteorologischen Randbedingungen prinzipiell möglich ist. In einer Reihe von Sondierungsflügen an zwei Terminen, die über das Gipfelniveau bis in die freie Atmosphäre reichten, wurden zwar tatsächlich Windstärken verzeichnet, die eine deutliche Erhöhung des Schubs im Vergleich zum Tiefland nötig machten, die aber noch immer genügend Sicherheitsreserven zuließen. Die Landung auf dem Dach der Forschungsseilbahn, auf einer 8 x 12 m großen Fläche (s. Abb. 4), erwies sich für die Nurflügler mit ihren relativ hohen Anfluggeschwin-

digkeiten als die größte Herausforderung, die aber mittels Fangnetz zu bewältigen war. Tatsächlich konnten, insbesondere bei böigem Wind, die leichtgewichtigen UAS der Universität Augsburg deutlich mehr, höhere, längere und weiter entfernte Flüge demonstrieren als die senkrecht startenden und landenden Modelle zweier kooperierender Firmen, die zu Vergleichszwecken ebenfalls an der Vorstudie teilnahmen.

Pilotstudie zum Einsatz luftgestützter Pollensammler - LfU Augsburg

In Kooperation mit dem UNIKA-T (Universitäres Zentrum für Gesundheitswissenschaften am Klinikum Augsburg) und dem LfU (Landesamt für Umwelt) Augsburg fand im Frühjahr 2016 ein UAS-Experiment auf dem Gelände des LfU statt, um einen selbstentwickelten UAS-gestützten Pollensammler (vgl. Abb. 5) zu testen und erste Proben mit den dort aufgestellten bodengestützten Pollensammlern des UNIKA-T zu vergleichen. Flankierend wurden vom LfU zusätzlich bodengestützte Daten zur Meteorologie und Luftqualität bereitgestellt. Hauptfragestellung dieser Experimente ist der Unterschied zwischen bodennahen und höhergelegenen Pollenkonzentrationen und -zusammensetzungen, um lokale Quellen von Ferntransport in der Höhe unterscheiden zu können. Hierzu wurde in dieser Pilotstudie ein Flugplan mit fünfminütigen Aufenthalten in Kreisbahnen auf Höhenstufen von 300, 200, 100 und 50 Metern abgeflogen. Eine erste Sichtung der Proben lässt brauchbares Datenmaterial erwarten, das jedoch erst noch vollständig unter dem Mikroskop ausgewertet werden muss, um quantitative Aussagen treffen zu können. In einem Antrag zur Finan-

Umweltmonitoring mit unbemannten Luftfahrtsystemen

zierung der Weiterentwicklung dieses vielversprechenden innovativen Messverfahrens wird der Parallelbetrieb der Pollensondierung an mehreren Standorten in Augsburg vorgeschlagen, um die Verteilung allergierelevanter Pollen im urbanen Raum zu untersuchen.

Ausblick

Die UAS-gestützte Sondierung entwickelt sich zur Zeit zu einem neuen, ergänzenden Verfahren in der Umweltforschung, das sich neben bodengestützter Messung und Fernerkundung sicherlich als Standard etablieren wird, sobald die rechtlichen und sicherheitstechnischen Probleme überwunden sind. Am Lehrstuhl für Physische Geographie und Quantitative Methoden des Instituts für Geographie der Universität Augsburg wird die Entwicklung UAS-gestützter Umwelt- und Klimaforschung seit nunmehr drei Jahren stetig vorangetrieben, wobei schon eine Reihe verschiedenartiger Experimente in Hinblick auf aktuelle wissenschaftliche Fragestellungen realisiert werden konnten und auch die Einbindung in die Lehre sich als praktikabel und produktiv erwiesen hat. Weiterhin weist die Zusammenarbeit mit dem Institut für Informatik und dem ISSE in einem Fakultätsprojekt der Fakultät für Angewandte Informatik, deren erste gemeinsame Unternehmung die oben genannten ScaleX-Kampagnen waren, auf hohes Potential zum Ausbau interdisziplinärer Forschung in diesem Kontext hin. Um diese vielversprechenden Entwicklungen weiter voranzutreiben, wurde jüngst – ermöglicht durch die finanzielle Unterstützung der Universitätsleitung – ein weiterer Ausbau der UAS-Flotte in Angriff genommen und insbesondere die Sensorik durch leichtgewichtige optische

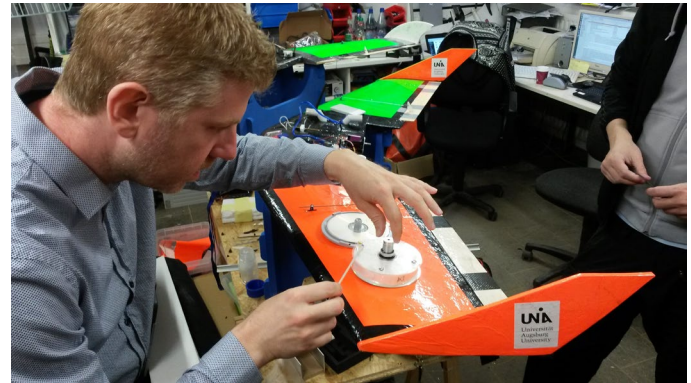


Abb. 5: Prototyp eines Haftschiichtpollensammlers auf einem UAS des Instituts für Geographie

Partikelzähler und ein Thermalkamerasystem erweitert. Dadurch werden die Schwerpunktthemen Luftqualität und Stadtklimaforschung weiter gestärkt werden, die sich in das Konzept der Kompetenzbildung im disziplinübergreifenden Forschungsschwerpunkt Environmental Health Sciences der neuen Medizinfakultät in Augsburg bestens einfügen.

Umweltmonitoring mit unbemannten Luftfahrtsystemen

Literatur

- Petersen, E. (2016): *Abschätzung des Horizontalwindes der planetaren Grenzschicht durch Sondierung mit unbemannten Luftfahrtsystemen*, Masterarbeit am Institut für Geographie der Universität Augsburg.
- Philipp, A. (2015): *Sondierung der atmosphärischen Grenzschicht mit unbemannten Luftfahrtsystemen*, *Abstracts, 34. Jahrestagung des Arbeitskreis Klima der Deutschen Gesellschaft für Geographie*, Hattingen an der Ruhr.
- Philipp, A., Groos, A., Petersen, E., Bischoff, J., Szogs, S., Beck, C., Hähner, J., Jacobeit, J. (2016): *Fixedwing UAV soundings of the boundary layer during the ScaleX 2015 summer campaign in southern Germany*, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 18, EGU2016-11235, Vienna.
- Philipp, A., Groos, A., Petersen, E. (2016): *Fixedwing UAS soundings of the boundary layer during the ScaleX campaign 2015 in southern Germany*, *Abstracts, 4th Conference of the International Society for Atmospheric Research using Remotely-piloted Aircraft ISARRA*, Toulouse.
- Seidel, J., Ketzler, G., Bechtel, B., Thies, B., Philipp, A., Böhner, J., Egli, S., Eisele, M., Herma, F., Langkamp, T., Petersen, E., Sachsen, T., Schlabin, D., Schneider, C. (2016): *Mobile measurement techniques for local and micro-scale studies in urban and topo-climatology*, *Die Erde* 147(1), S. 15-39.
- Wolf, B., Chwala, C., Fersch, B., Garvelmann, J., Junkermann, W., Zeeman, M. J., Angerer, A., Adler, B., Beck, C., Brosy, C., Brugger, P., Emeis, S., Dannenmann M., De Roo, F., Diaz-Pines, E., Haas, E., Hagen, M., Hajnsek, I., Jacobeit, J., Jagdhuber, T., Kalthoff, N., Kiese, R., Kunstmann, H., Kosak, O., Krieg, R., Malchow, C., Mauder, M., Merz, R., Notarnicola, C., Philipp, A., Reif, W., Reineke, S., Rödiger, T., Ruehr, N., Schäfer, K., Schrön, M., Senatore, A., Shupe, H., Völksch, I., Wanninger, C., Zacharias, S., Schmid, H.P. (2016): *The ScaleX campaign: scale-crossing land-surface and boundary layer processes in the TERENO-preAlpine observatory*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, in press.