

UAV-basierte Nahfeld-zu-Fernfeld-Transformation zur detaillierten Charakterisierung großer Emissionsquellen unter Betriebsbedingungen

Jonathan Gundlach, Ramesh Raja Subramanyam, David Ulm, Criostoir Gerasch, Christian van Aswegen, Kai Baaske, Stefan Jacob, Thomas Kleine-Ostmann
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig
+49 531-592-2215, jonathan.gundlach@ptb.de

Zusammenfassung

Die Beschreibung der Wellenausbreitung im Raum und insbesondere die Charakterisierung von Emissionsquellen ist von großem Interesse in verschiedenen physikalischen Disziplinen. Große Emissionsquellen, akustischer oder elektromagnetischer Natur, können oft nicht in herkömmlichen Laboren untersucht werden. Wir entwickeln eine innovative Messtechnik, die es ermöglicht, die abgestrahlte Leistung und die Richtcharakteristiken großer Emissionsquellen während ihres Betriebs ohne Modifikation zu charakterisieren. Diese Methode basiert auf der Verwendung von Uncrewed Aerial Vehicles (UAV), die mit modernster Messtechnik ausgestattet sind und sich frei im Nahbereich der Emissionsquellen bewegen können. Anschließend wenden wir eine spezielle Transformationsrechnung an, um aus den diskreten Messdaten auf einer Hüllfläche um die Emissionsquelle, deren Abstrahlungseigenschaften zu extrahieren. Die Prinzipien der wellenförmigen Ausbreitung unterliegen in verschiedenen Disziplinen ähnlichen mathematischen Gesetzmäßigkeiten. Daher ist unsere Methode leicht von elektromagnetischen auf akustische Felder übertragbar. In unserem Projekt demonstrieren wir diese Interdisziplinarität und erwarten Ergebnisse, die in vielfacher Hinsicht von großem Interesse sind. Basierend auf diesen Untersuchungen entwickeln wir Messplattformen unterschiedlicher Komplexität, speziell in Bezug auf Position, Zeit und Messgrößen in Abwägung zu den zu erwartenden Genauigkeiten. Darüber hinaus diskutieren wir potenzielle Schwächen und die Skalierbarkeit der Methode hinsichtlich der Anzahl der eingesetzten UAV und der verwendeten Messtechnik.

Keywords: UAV, Infraschall, elektromagnetische Felder, Antennenmesstechnik, Nahfeld- Fernfeld Transformation

Einleitung

UAVs sind eine aufstrebende Technologie, die besonders rasche Fortschritte in wichtigen Bereichen wie der Quantenkommunikation [1], der Landwirtschaft [2], dem Transportwesen [3], und dem Katastrophenmanagement ermöglicht [4]. Obwohl diese Anwendungen oft in gewissem Maße Überwachung und Sensorik beinhalten, steckt die Verwendung von UAVs als Instrumente für rein messtechnische Zwecke noch in den Kinderschuhen. Präzise Messungen liegen jenseits der Möglichkeiten der meisten kommerziell erhältlichen UAV-Lösungen. Dies liegt vor allem an den technischen Beschränkungen, die luftgestützten Messplattformen im freien Raum auferlegt sind, wie z. B. begrenzte Energieversorgung und Messdauer, kleine zulässige Nutzlasten und ungenaue Positionierung. Die Umgebungsbedingungen in

der Luft sind im Allgemeinen rau, mit stark schwankenden Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit, Wind und Luftdruck. Außerdem erzeugt der Antrieb von Propellern unweigerlich Störungen wie Luftströmungsturbulenzen, Vibrationen, Lärm und elektromagnetische (EM) Störungen.

Eine potenziell wichtige messtechnische Anwendung für UAV ist die Kartierung physikalischer Felder mit hoher Genauigkeit in unzugänglichen oder abgelegenen Gebieten. Die Kartierung physikalischer Felder ist in vielen wissenschaftlichen Disziplinen wichtig, z. B. elektromagnetische Felder von Antennen, Schallfelder, Windgeschwindigkeit und Temperaturverteilungen. Obwohl Forscher bereits Hubschrauber [5] und Flugzeuge [6] mit Besatzung für die Feldkartierung eingesetzt haben, kann die Datenqualität aufgrund der noch größeren Störungen und Rückwirkungen, die von den bemannten Flugzeugen

ausgehen, beeinträchtigt werden. Außerdem ist der Betrieb von bemannten Flugzeugen teuer. Jüngste Experimente mit UAVs zur Messung des elektrischen Feldes [7], zur Messung der Luftqualität [8] und zur Lokalisierung akustischer Quellen [9] unterstreichen das große Potenzial der UAV-gestützten Messtechnik zur Erfassung von Daten, die mit anderen Methoden nicht gewonnen werden können.

Ein interessanter Anwendungsfall ist die Vorhersage von Fernfeldern aus Nahfeldmessungen stationärer harmonischer Wellenfelder unter Verwendung von Oberflächenintegralformulierungen (surface integral formulations – SIFs). SIFs werden in der Physik und im Ingenieurwesen mit Anwendungen in der Elektromagnetik [10, 11], Optik [12,13], und Akustik [14,15] verwendet. Mit ihnen lassen sich Fern- und Nahfelder für harmonische Wellenphänomene genau vorhersagen, indem nur die Feldvariablen entlang einer geschlossenen Fläche um die Quellen verwendet werden. Aufgrund dieser Eigenschaft werden SIF in effizienten numerischen Methoden wie der Boundary-Element-Methode [16] und der Momentenmethode genutzt [17].

Wir nutzen ein Verfahren, das zur Messung von Wellenfeldern über große Flächen verwendet werden kann, um die Fernfeld-Wellenabstrahlung mit SIF vorherzusagen. Die Methode wird durch die jüngsten Fortschritte in der UAV-technologie in Bezug auf Flugzeit, Stabilität und Positionierung ermöglicht [18].

Die vorgeschlagene Methode baut auf der experimentellen Nahfeld-zu-Fernfeld-Transformation (NFFT) auf, die üblicherweise verwendet wird, um die Fernfeldabstrahlung elektromagnetischer Antennen für kleine und mittelgroße Antennen aus Nahfeldmessungen in Laborumgebungen zu extrahieren [19]. NFFT wird verwendet, wenn direkte Auswertungen von Nahfeldmessungen nicht empfehlenswert sind, weil sich das Wellenfeld noch nicht vollständig entwickelt hat. In solchen Fällen kann die Richtwirkung der Quelle die lokalen Messergebnisse erheblich beeinflussen. NFFT-basierte Methoden lösen dieses Problem durch die Anwendung eines zweistufigen Verfahrens. Zunächst wird das Wellenfeld an diskreten Punkten entlang einer Fläche gemessen, die die Antenne im Nahfeld umschließt. Diese Daten werden zur numerischen Anpassung einer äquivalenten Quellendarstellung auf der Oberfläche verwendet. Im zweiten Schritt wird diese äquivalente Quellenverteilung für eine SIF zur Berechnung der Fernfeldstrahlung verwendet.

Erst kürzlich wurde die UAV-gestützte NFFT eingeführt und erfolgreich an großen Antennen getestet [7, 20], was das große Potenzial des Verfahrens für eine genaue Fernfeldvorhersage belegt. Dabei wurde ein UAV mit Hochfrequenz-Glasfaser-Verbindungen zu einem bodengestützten Netzwerk-Vektoranalysator (VNA) verwendet, um die Amplitude und Phase der elektrischen Feldstärke im Nahfeld zu erfassen. Trotz vielversprechender Ergebnisse schränken die optischen Fasern die Auswahl der Flugbahnen ein. Außerdem lässt sich die Methode nicht ohne Weiteres auf mehrere UAV übertragen, da eine aufwändige Verfolgungs- und Analyseausrüstung erforderlich ist. Andere Ansätze verwenden phasenlose Messverfahren in Kombination mit einem Real-Time-Kinematic(RTK)-System, das den Bedarf an teuren und einschränkenden Komponenten reduziert, aber Messungen an mindestens zwei Oberflächen [21]. Im akustischen Bereich werden Verfahren eingesetzt, die ähnliche Methoden wie die elektromagnetische NFFT verwenden, um äquivalente Quellen und Fernfelder zu berechnen. Tatsächlich weisen die in diesen Methoden verwendeten Gleichungen viele Ähnlichkeiten mit ihren elektromagnetischen Gegenstücken auf, wie von anderen Gruppen gezeigt wurde [22-24]. Beispielsweise können äquivalente Quellen durch akustische Nahfeldholographie-Methoden [25] oder Multimode-Techniken bestimmt werden [26]. Diese Techniken beinhalten eine systematische Abtastung einer geschlossenen Oberfläche (oder einer "Holographie") um eine Schallquelle herum. Bei den meisten Anwendungen erfolgt die Abtastung der Oberflächen mit Mikrofonarrays oder Roboterarmen. Dies schränkt die Anwendbarkeit der derzeitigen Methoden auf kleine und mittelgroße Emissionsquellen ein. Sobald eine äquivalente Quellendarstellung bestimmt ist, kann das Fernfeld mit den Kirchhoff-Helmholtz-Integrals oder ähnlichen akustischen Analogien berechnet werden [27,28].

Infraschall und Niederfrequenter Schall

Eine Vielzahl industrieller Großgeräte und Prozesse, insbesondere in strategischen Sektoren wie der Energieversorgung (Windkraftanlagen, Biogasanlagen), dem Transportwesen (Schiffe, Züge), dem Katastrophenschutz (Erdbeben, Stürme) sowie der Verteidigung (Explosionen, Raketenstarts), erzeugt niederfrequenten Schall (<200 Hz) und Infraschall (<20 Hz). Diese Schallquellen können aufgrund ihrer Größe und der

erforderlichen Umgebungsbedingungen nicht im Labor vermessen werden.

Akustische Messdrohnen eignen sich besonders für die Erfassung niederfrequenten Schalls großer Quellen (und nicht für hochfrequenten Schall). Dies hat einen wesentlichen Grund: Der Eigenlärm der Drohne für Frequenzen bis etwa 100 Hz vernachlässigbar. Dies zeigen unsere Untersuchungen sowohl im Freifeld als auch im Labor [29, 30]. Beispielsweise erzeugen Windkraftanlagen tonale Komponenten bei der Blattdurchlauffrequenz von etwa 1 Hz sowie deren Harmonischen, ebenso wie bei der Drehfrequenz von Getriebe und Generator (20–50 Hz) [31].

In unserem Projekt demonstrieren wir, dass Drohnen tatsächlich für akustische Messungen niederfrequenten Schalls eingesetzt werden können. Hierzu haben wir zunächst den Eigenlärm der Drohne in einem Freifeldraum präzise vermessen (Abbildung 1) [30]. Es zeigte sich, dass die Drohne im niederfrequenten Bereich keinen signifikanten Eigenlärm erzeugt. Erst ab der ersten Blattdurchlauffrequenz tritt Eigenlärm auf, der akustische Messungen überlagern kann. Abhängig von Größe und Beladung der Drohne sind somit Messungen bis etwa 150–200 Hz möglich.

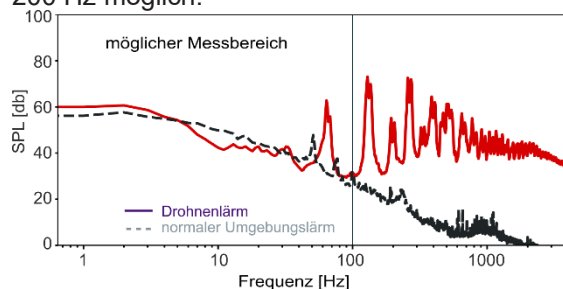


Abbildung 1: Akustischer Eigenlärm einer Drohne, verglichen mit typischen atmosphärischen Hintergrundlärm an einem ruhigen, windstillen Tag.

Auch wenn der Eigenlärm der Drohne im niederfrequenten Bereich vernachlässigbar ist, stellt der durch atmosphärischen Wind induzierte Lärm in der praktischen Anwendung ein wesentliches Problem dar. Experimente mit verschiedenen Windschutzkonzepten haben gezeigt, dass die Verwendung eines Mikrofonpaares in Kombination mit einer Kohärenzanalyse die effektivste Windunterdrückung ermöglicht [32].

Ein möglicher Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Abstand der Mikrofone betrug in diesem Aufbau etwa 2 m und ermöglichte damit eine effektive Windunterdrückung bis ungefähr 10 Hz. Mit diesem Aufbau konnten präzise Schalldruck-

und Schalleistungsmessungen aus der Luft durchgeführt werden. Hierzu wurde eine spezielle Schallquelle installiert, bei der während des Betriebs die abgegebene Schalleistung bei einer Frequenz von 10 Hz bestimmt werden kann [33]. Eine Abbildung des Versuchsaufbaus mit Messdrohne und Schallquelle ist in Abbildung 3 dargestellt. In diesem Versuch konnte die Schalleistung mit einer Unsicherheit von <1 dB bestimmt werden.



Abbildung 2: Versuchsaufbau einer Hexacopter-Drohne mit Mikrofonpaar.



Abbildung 3: Messung der Schalleistung einer kalibrierten Schallquelle.

Nach der Verifizierung der Messmethode wurden erste Messungen an realen Emittoren durchgeführt. Abbildung 4 zeigt eine Messdrohne auf Nabenhöhe einer Windkraftanlage. Dieses Experiment diente der Aufnahme von Richtcharakteristiken des Generatorlärms, der diskrete Töne bei etwa 20 Hz emittierte. Die Durchführung sowie die Ergebnisse des Tests sind detailliert in Ref. [30] beschrieben.



Abbildung 4: Messung des Lärms einer Windkraftanlage, hier gemessen aus der Luft auf Nabenhöhe.

Elektromagnetische Emitter

Die Charakterisierung von elektromagnetischen Emittlern bzw. Antennen im Labor wird bereits seit langem erfolgreich durchgeführt. Zu diesem Zweck werden Antennenscanner verwendet, welche die Übertragung zwischen der zu vermessenden Antenne (Antenna under Test - AUT) und der Messantenne bzw. Sonde messen. Diese Messung erfolgt wiederholt während eine der Antennen von einem Positioniersystem auf einer Kugel- oder Zylindermantelfläche oder einer Ebene relativ zu der anderen Antenne bewegt wird. Aus diesen Transmissionsmessungen und deren Position kann mittels Nahfeld-Fernfeld-Transformation (NFFT) nun die Richtcharakteristik der zu Untersuchenden Antenne rekonstruiert werden [34]. Unter Laborbedingungen können sowohl die Positions- und Lage-, als auch die Transmissionsmessungen zwischen den Antennen mit höchster Genauigkeit durchgeführt werden. Durch eine Computersteuerung finden die Messungen autonom über viele Stunden statt. Probleme durch Reflexionen und Mehrwegausbreitung der EM-Wellen zwischen den Antennen können durch EM-Absorber an allen relevanten Oberflächen um die Messstrecke herum auf ein Minimum reduziert werden. Die Messung unter Laborbedingungen ist jedoch nicht möglich, wenn die zu vermessende Antenne zu groß für den jeweiligen Antennenscanner wird oder die Antenne an ihrem Bestimmungsort charakterisiert werden soll, z.B. um Ihre Eigenschaften unter Einfluss aller realen Umgebungsbedingungen zu bestimmen. Zur Lösung dieses Problems bietet es sich an, moderne UAVs zu nutzen. In diesem Projekt soll das erprobte Prinzip des Antennenscanners aus dem Labor auf eine fliegende Plattform im Freien übertragen werden. Auch wenn das grundlegende Messprinzip bereits erprobt ist, ergeben sich diverse neue Herausforderungen, die im Folgenden näher diskutiert und

Lösungsansätze vorgestellt werden. Es wird angestrebt den Frequenzbereich von 100 MHz bis 3 GHz abzudecken.

Um eine Nahfeld-Fernfeld-Transformation durchführen zu können, muss an diversen, genau bekannten Positionen im Raum Betrag und Phase des EM-Feldes ermittelt werden. Bei einer Frequenz von 3 GHz ergibt sich eine Wellenlänge von ca. $\lambda=10$ cm. Für eine erfolgreiche NFFT ist eine Positionsgenauigkeit von $< \lambda/20$ anzustreben [35], was 0,5 cm entspricht. Gleichzeitig ergibt sich durch die Ausbreitung der EM-Welle mit der Lichtgeschwindigkeit c eine nötige Genauigkeit der Zeitsynchronisierung von 17 ps für die Synchronisation der Messung von ausgesendeter zu empfangener Welle. Verfahren zu entwickeln diese Genauigkeiten auf einer fliegenden Messplattform unter Einfluss von Umweltbedingungen zu erreichen ist einer der Schwerpunkte des Forschungsprojektes.

Die Transmissionsmessung zwischen den Antennen erfolgt mittels eines Vektor Netzwerk Analysators (VNA), welcher sowohl das Signal für die Sendeantenne mit bekanntem Betrag und bekannter Phase generiert als auch das Signal der Empfangsantenne in Betrag und Phase misst. Signallaufzeiten und Dämpfungen der Kabel können, sofern sie konstant sind, mittels einer Systemfehlerkorrektur bestimmt und korrigiert werden. Die Übertragung des Messsignals von der an dem UAV montierten Antenne zum bodengebunden VNA ist nicht mit einem klassischen Koaxialkabel möglich, da dieses zu schwer und unflexibel ist. Stattdessen wird das Signal mittels elektrooptischer Konverter in ein optisches Signal gewandelt, welches per Glasfaserkabel übertragen, und anschließend wieder in ein elektrisches Signal konvertiert wird. Die Kabelverbindung ist nach aktuellem Kenntnisstand nötig, um kohärente Messungen zu ermöglichen.

Positionsbestimmung

Kenntnis über die Position des UAV im Raum ist sowohl für die Steuerung und Flugführung als auch in Form der eigentlichen Messung bzw. zur Interpretation der Feldmessungen nötig. Da diese Anwendungen unterschiedliche Anforderungen haben, werden zwei Positionsmesssysteme eingesetzt. Diese sind ein Real Time Kinematik Global Navigation Satellite System (RTK-GNSS) und ein Lasertracker. Das UAV ist mit einem dualen RTK-fähigen GNSS ausgestattet welches zwei Antennen und Empfangskanäle hat. Der Aufbau des Messsystems ist in Abbildung 5 und die geometrischen Verhältnisse am UAV sind

in Abbildung 6 dargestellt. Am Boden befindet sich ein weiteres GNSS welches als lokale RTK-Basisstation dient. Diese bestimmt aus ihren gemessenen GNSS-Positionsdaten und ihrer bekannten realen Position Korrekturdaten, welche zum GNSS des UAVs geschickt werden. Dort kann mittels der Korrekturdaten die Position des UAV mit einer Unsicherheit von wenigen cm bestimmt werden. Aus der Positionsdivergenz der beiden Antennen des UAV kann außerdem die Orientierung um die Hochachse bestimmt werden, was ein Magnetometer zur Richtungsbestimmung ersetzt. Falls keine Korrekturdaten zur Verfügung gestellt werden, erhöht sich die Positionsunsicherheit auf, für normales GNSS übliche Werte von wenigen Metern [36], während die sonstige Funktion beibehalten wird. Das System ist robust gegenüber Umgebungseinflüssen und liefert Positionsdaten direkt an den Flugcontroller im UAV.

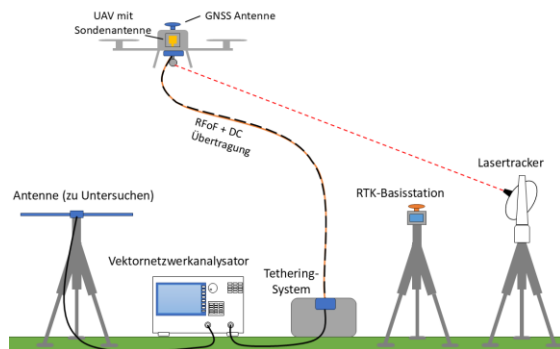


Abbildung 5: Messaufbau für Elektromagnetische Emittter.

Da die Genauigkeit des RTK-GNSS für die Auswertung der Messergebnisse bei EM-Messungen ab ca. 500 MHz nicht ausreicht, wird die Position des UAV für diese Messungen zusätzlich noch mit einem Lasertracker mit einer Unsicherheit von deutlich unter einem mm bestimmt. Dieser erfordert eine direkte Sichtverbindung zum, am UAV montierten Reflektor und hat in unseren Tests eine maximale Reichweite von bis zu 70 m. Außerdem hat der Retroreflektor nur einen typabhängigen, eingeschränkten Sichtbereich und die Messdatenerfassung des Lasertrackers erfolgt am Boden. Aufgrund dieser Einschränkungen muss das Messsystem Unterbrechungen der Positionsmessung per Lasertracker in bestimmten Manövern tolerieren können. In solchen Fällen wird, die per RTK-GNSS ermittelte Position genutzt, um den Lasertracker automatisch und schnell wieder zum Reflektor auszurichten.

Für die eigentliche Auswertung der Messungen ist die Position des Phasenzentrums der Messantenne (P_{SONDE}) und nicht die des Laserreflektors (P_{LT}) nötig. Somit muss noch eine Korrektur, der Positionsmessung mit einem Differenzvektor ($\vec{v}_{\text{LT,SONDE}}$) und einer Rotation dessen um die drei Lagewinkel des UAVs, dem Roll-, Nick- und Gierwinkel erfolgen, welche vom Flugcontroller ausgelesen werden können.

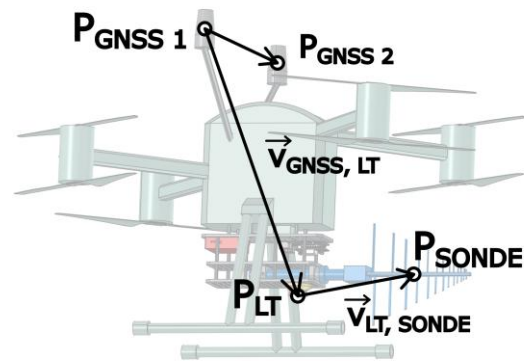


Abbildung 6: Geometrische Verhältnisse am UAV.

Zur Verifikation der beiden Positionsmesssysteme und zur Bestimmung des Offsetvektors zwischen dem Antennenreferenzpunkt (ARP) des GNSS ($P_{\text{GNSS 1}}$) und dem optischen Zentrum des Laserreflektors (P_{LT}) an dem UAV wurde eine Vergleichsmessung durchgeführt. Beide Positionsmessungen wurden sowohl am Boden als auch in der Luft sehr oft durchgeführt, wobei signifikante Rotationen um alle Achsen vorgekommen sind. Zur Auswertung stehen somit sehr viele Messpunkte zur Verfügung, welche beide Positionen zur gleichen Zeit bei diversen Orientierungen des UAV beschreiben. Anschließend wird mittels Optimierungsalgorithmus ein Offsetvektor ($\vec{v}_{\text{GNSS,LT}}$) im Koordinatensystem des UAV bestimmt, der beide Punkte verbindet und entsprechend der Lagewinkel des UAVs rotiert wird. Mit diesem Offsetvektor wird aus jeder Position der RTK-GNSS Messung eine Schätzung der Position des Laserreflektors bestimmt. Es verbleibt eine residuale Differenz zwischen zeitgleich per RTK-GNSS geschätzter und per Lasertracker gemessener Position des Laserreflektors. Mittels des Optimierungsalgorithmus wird der Offsetvektor so optimiert, dass über alle Messpunkte, d.h. auch über alle Lagewinkel eine möglichst kleine residuale Differenz zur jeweiligen Positionsmessung des Lasertrackers verbleibt. Konstante Differenzen, d.h. solche unabhängig von Fluglage und Messzeitpunkt werden durch

konstante Korrekturen der Lasertrackerposition im globalen Weltkoordinatensystem ausgeglichen. Das arithmetische Mittel aller residualen Differenzen ist somit Null.

Der ermittelte Offsetvektor beschreibt dann den realen Offset zwischen ARP und Laserreflektor. Die verbleibende residuale Differenz ist ein Indikator für die kombinierte Messunsicherheit von RTK-GNSS-, und Lasertrackerposition sowie den Lagewinkeln des UAV. Dieser Vergleich in Abbildung 7 zeigt, dass die residualen Differenzen der Positionsmessungen mehrheitlich deutlich kleiner als 5 cm sind.

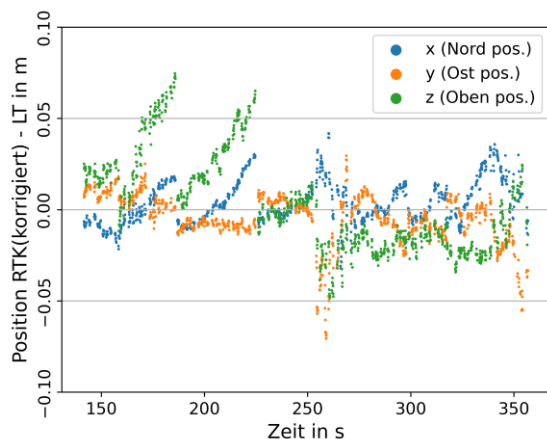


Abbildung 7: Vergleich von Lasertracker und RTK-GNSS Positionsmessung.

Die Standardabweichung liegt für die horizontalen x- und y-Richtungen im globalen Koordinatensystem bei 1,2 bzw. 1,4 cm und für die vertikale z-Position bei 2,6 cm. Diese Werte entsprechen der zu erwartenden Messunsicherheit für RTK-GNSS [36], sowohl in ihrer Größenordnung als auch der Tatsache, dass die Höhenmessung mittels GNSS ungenauer ist als die der lateralen Position.

Dieser Vergleich zeigt, dass RTK-GNSS- und LT-Positionsmessung sowie die Lagesensoren des Flugcontrollers entsprechend ihrer technischen Möglichkeiten funktionieren. Die residuale Differenz entsteht vermutlich größtenteils durch die Unsicherheit der RTK-GNSS Messung. Auch die Bestimmung des Offsetvektors zwischen GNSS-Antennenreferenzpunkt und Laserreflektor war erfolgreich und liefert zuverlässig plausible Ergebnisse. Mit einem ähnlichen Verfahren kann folglich in den Antennenmessungen aus der LT-Positionsmessung und dem Offsetvektor zur Sondenantenne ($\vec{r}_{LT,SONDE}$), die genaue Position des Phasenzentrums der Sondenantenne am im Raum bestimmt werden. In Kombination mit den Lagewinkeln des Flugcontrollers die, entsprechend dem

Versuch als ausreichend genau eingeschätzt werden können, stehen somit alle wichtigen Geometriedaten für die NFFT zur Verfügung.

Zusammenfassung

Erste Ergebnisse unseres Projekts zeigen, dass Drohnen zur Bestimmung von Wellenfeldern eingesetzt werden können. Diese Felder können sowohl elektromagnetischer als auch akustischer Natur sein. Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

1. Aufgrund der schwierigen Messbedingungen aus der Luft müssen gezielte Maßnahmen zur Reduktion von Messfehlern ergriffen werden.
2. Ein entscheidender Faktor ist die Lagegenauigkeit. Mithilfe moderner RTK-Technik kann eine Positionsgenauigkeit im Bereich weniger Zentimeter erreicht werden.
3. Für die Messung akustischer Felder stellt atmosphärischer Wind die größte Störgröße dar, die durch den Einsatz von Mikrofonpaaren reduziert werden kann.
4. Erste Testflüge zeigen, dass Messungen im Nahfeld Rückschlüsse auf die Quellcharakteristik erlauben und somit eine Abschätzung des Fernfelds ermöglichen.

Wir erwarten, dass unsere Messmethoden eine breite Anwendung sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie finden werden. Beispiele hierfür sind die Validierung atmosphärischer Ausbreitungsmodelle, die Untersuchung komplexer Quellen sowie die Planung und Umsetzung von Großprojekten wie Windparks und Antennenfeldern.

Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) Projekt – G:(GEPRIS) 541019206.

Literaturnachweise

- [1] Kumar, A., Augusto de Jesus Pacheco, D., Kaushik, K. & Rodrigues, J. J. P. C. Futuristic view of the Internet of Quantum Drones: Review, challenges and research agenda. Vehicular Communications 36, 100487 (2022). doi:10.1016/j.vehcom.2022.100487

- [2] Murugan, D., Garg, A. & Singh, D. Development of an Adaptive Approach for Precision Agriculture Monitoring with Drone and Satellite Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 10, 5322–5328 (2017). doi:10.1109/JSTARS.2017.2746185
- [3] Kellermann, R., Biehle, T. & Fischer, L. Drones for parcel and passenger transportation: A literature review. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 4, 100088 (2020). doi:10.1016/j.trip.2019.100088
- [4] Mohd Daud, S. M. S. et al. Applications of drone in disaster management: A scoping review. *Science & Justice* 62, 30–42 (2022). doi:10.1016/j.trip.2019.100088
- [5] Stehle, R. H., DesBrisay, G. A., Whitson, A. L. & Hagn, G. H. RELEDOP: a full-scale antenna pattern measurement system for high-powered HF transmitting antennas. *IEEE Transactions on Broadcasting* 34, 210–220 (1988).
- [6] Bärffuss, K., Schulz-Stellenfleth, J. & Lampert, A. The Impact of Offshore Wind Farms on Sea State Demonstrated by Airborne LiDAR Measurements. *Journal of Marine Science and Engineering* 9, 644 (2021). doi:10.3390/jmse9060644
- [7] Punzet, S. et al. Fully Coherent UAV-Based Near-Field Measurement and Transformation of the S67-15 m Ground Station Antenna at the German Space Operations Center in Weilheim. in 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 1–5 (2022). doi:10.23919/EuCAP53622.2022.9769018.
- [8] Rohi, G., Ejofodomi, O. & Ofualagba, G. Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones. *Heliyon* 6, e03252 (2020). doi:10.1016/j.heliyon.2020.e03252
- [9] Go, Y.-J. & Choi, J.-S. An Acoustic Source Localization Method Using a Drone-Mounted Phased Microphone Array. *Drones* 5, 75 (2021). doi:10.3390/drones5030075
- [10] Neitz, O., Mauermayer, R. A. M., Weitsch, Y. & Eibert, T. F. A Propagating Plane-Wave-Based Near-Field Transmission Equation for Antenna Gain Determination from Irregular Measurement Samples. *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 65, 4230–4238 (2017). doi:10.1109/TAP.2017.2712180
- [11] Xu, Y., Tan, Q., Erricolo, D. & Uslenghi, P. L. E. Fresnel-Kirchhoff integral for 2-D and 3-D path loss in outdoor urban environments. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 53, 3757–3766 (2005). doi:10.1109/TAP.2005.858572
- [12] Aalipour, R. Calculation of Fresnel diffraction from 1D phase step by discrete Fourier transform. *Optics Communications* 382, 651–655 (2017). doi:10.1016/j.optcom.2016.08.031
- [13] Sabatyan, A. & Tavassoly, M. T. Application of Fresnel diffraction to nondestructive measurement of the refractive index profiles of optical fibers. *Optical Engineering* 46, 128001 (2007). doi:10.1117/1.2819745
- [14] Dolcetti, G., Alkmim, M., Cuenca, J., De Ryck, L. & Krynkina, A. Robust reconstruction of scattering surfaces using a linear microphone array. *Journal of Sound and Vibration* 494, 115902 (2021). doi:10.1016/j.jsv.2020.115902
- [15] Evans, D., Hartmann, M. & Delfs, J. Beamforming for point force surface sources in numerical data. *Journal of Sound and Vibration* 458, 303–319 (2019). doi:10.1016/j.jsv.2019.05.030
- [16] Kirkup, S. The Boundary Element Method in Acoustics: A Survey. *Applied Sciences* 9, 1642 (2019).
- [17] Gibson, W. C. The Method of Moments in Electromagnetics. (Chapman and Hall/CRC, 2021). doi:10.1201/9780429355509.
- [18] Emimi, M., Khaleel, M. & Alkrash, A. The Current Opportunities and Challenges in Drone Technology. *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)* 74–89 (2023). doi:10.65998/ijeess.v1i3.47
- [19] Cicchetti, R. et al. Near-Field to Far-Field Transformation Techniques with Spiral Scannings: A Comprehensive Review. *International Journal of Antennas and Propagation* 2014, e143084 (2014). doi:10.1155/2014/143084

- [20] Eibert, T. F., Punzet, S., Mittereder, T., Faul, F. T. & Paulus, A. H. UAV-Based Near-Field Measurements at a Doppler Very High Frequency Omnidirectional Radio Range. in 2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 1–5 (2023). doi:10.23919/EuCAP57121.2023.10133603
- [21] Fernández, M. G., Álvarez López, Y. & Andrés, F. L.-H. Advances in Antenna Measurement and Characterization Using Unmanned Aerial Vehicles. in 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 1–5 (2019).
- [22] Wei, L. & Rodríguez-Fortuño, F. J. Far-field and near-field directionality in acoustic scattering. *New J. Phys.* 22, 083016 (2020). doi:10.1088/1367-2630/ab9fb
- [23] Sun, T., Li, G. & Wang, K. A Near-to-far-field Transformation Method for Acoustic Scattering Problems. in 2007 International Conference on Mechatronics and Automation 304–308 (2007). doi:10.1109/ICMA.2007.4303559
- [24] Plotnick, D. S., Marston, P. L. & Marston, T. M. Fast nearfield to farfield conversion algorithm for circular synthetic aperture sonar. *The Journal of the Acoustical Society of America* 136, EL61–EL66 (2014). doi:10.1121/1.4885486
- [25] Maynard, J. D., Williams, E. G. & Lee, Y. Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH. *The Journal of the Acoustical Society of America* 78, 1395–1413 (1985). doi:10.1121/1.392911
- [26] Lavrentjev, J. & Åbom, M. Characterization of fluid machines as acoustic multi-port sources. *Journal of Sound and Vibration* 197, 1–16 (1996). doi:10.1006/jsvi.1996.0514
- [27] Godin, O. A. The Kirchhoff–Helmholtz integral theorem and related identities for waves in an inhomogeneous moving fluid. *The Journal of the Acoustical Society of America* 99, 2468–2500 (1996). doi:10.1121/1.415524
- [28] Kirchhoff, G. Zur Theorie der Lichtstrahlen. *Annalen der Physik* 254, 663–695 (1883). doi:10.1002/andp.18832540409
- [29] Raja Subramanyam, Ramesh, Rafael Castro-Mota, Kevin Picker, Volker Wittstock, and Stefan Jacob. ‘Can Drones Serve as Carriers for Acoustic Measurement Equipment?’ 27 November 2024. doi:10.17866/rd.salford.27913320.v1
- [30] Subramanyam, Ramesh Raja, Johan Christian van Aswegen, Criostoir Gerasch, Volker Wittstock, and Stefan Jacob. ‘A Comprehensive Approach to Airborne Low-Frequency Acoustic Field Measurement Using a Drone-Based System’. *Sensors International* 7 (January 2026): 100384. doi:10.1016/j.sintl.2026.100384
- [31] Blumendeller, Esther, Ivo Kimmig, Gerhard Huber, Philipp Rettler, and Po Wen Cheng. ‘Investigations on Low Frequency Noises of On-Shore Wind Turbines’. *Acoustics* 2, no. 2 (2020): 343–65. doi:10.3390/acoustics2020020
- [32] Ramesh Raja Subramanyam, Criostoir Gerasch, Stefan Jacob. ‘Application of Atmospheric Wind Filter Arrays for Acoustic Monitoring UAVs’. *Forum Acusticum, Euronoise conference, 2025, Malaga, Spain*. doi:10.61782/fa.2025.0141
- [33] Subramanyam, Ramesh Raja, Rafael Castro-Mota, Volker Wittstock, and Stefan Jacob. ‘Synergizing Mode Decomposition and Numerical Analysis for Creating Sound Sources with Known Power Output: Application to an Outdoor Infrasound Source’. *Measurement* 255 (November 2025): 117956. doi:10.1016/j.measurement.2025.117956
- [34] Faul, F., Near-Field Measurement and Transformation of Modulated Electromagnetic Fields using Uncrewed Aerial Vehicles. *Dissertation, Technische Universität München* (2024), 80-81.
- [35] Ulm, D., Kleine-Ostmann, T. & Schrader, T. Antenna calibration based on near-field to far-field transformation algorithms. 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) (2019).
- [36] Datenblatt: mosaic-X5 Compact multi-constellation GNSS receiver, Septentrio (2025).