

Drohnennetzwerke zur Suche und Rettung¹

Samira Hayat²

Abstract: Diese Arbeit befasst sich mit dem komplexen Problem des Entwurfs von Drohnennetzwerken. Drohnenanwendungen sind sehr vielfältig und können mit traditionellen Netzwerkdesignmethoden nicht erfolgreich bewältigt werden. Alternativ schlagen wir vor, die grundlegenden Fragen für Drohnennetzwerkanwendungen zu beantworten: Welche Daten müssen übertragen werden? Wie werden die Daten von Punkt A zu Punkt B im Netzwerk übertragen? Wann (zu welchen Zeitpunkten) müssen die Daten übertragen werden? Wir stellen fest, dass Kommunikation in einem Drohnennetzwerk sowohl dem Missionsziel (für die Übertragung von Sensordaten) als auch der Missionsdurchführung (Missionskoordination) dient, weshalb wir eine abstimmbare und modulare Systemarchitektur vorschlagen. Abhängig von den Missionsanforderungen können verschiedene Kommunikations- und Koordinationsmodule hinzugefügt werden, ohne dass das gesamte System geändert werden muss. Die Systemarchitektur wird für einen Such- und Rettungseinsatz implementiert, wobei bestehende Kommunikationstechnologien im Experiment getestet und neuartige Koordinationsalgorithmen vorgeschlagen werden.

1 Einleitung

Drohnennetzwerke sind sehr vielseitig einsetzbar Hayat et al. [HYM16]. Jeder Drohneinsatz unterliegt unterschiedlichen Anforderungen und ist abhängig von der Anzahl und dem Typ der Fluggeräte, der Größe des Einsatzgebiets, der Nutzlast und der Flugzeit, dem Datenverkehr und dem Grad an Autonomie. Um die unterschiedlichen Einsatzanforderungen für Drohnenanwendungen zu veranschaulichen, verwenden wir beispielhaft verschiedene Drohnenanwendungen.

1. Gebietskartierung erfordert die Sensorabdeckung eines bestimmten Gebiets, z. B. eines landwirtschaftlich genutzten Feldes, mit nicht mehr als zehn Drohnen, die ferngesteuert sein können. Sie sammeln Sensordaten während des Flugs und übertragen sie nach Abschluss der Mission zur Analyse an eine Bodeneinheit; diese Art der Datenübertragung ist verzögerungstolerant.
2. Bei der Netzbereitstellung besteht das Ziel der Mission darin, dem Bodenpersonal Netzkonnektivität unter unterschiedlichen Bedingungen bereitzustellen. Eine einzelne autonom fliegende HALE-Drohne (High Altitude, Long Endurance) kann eine Netzabdeckung von mehreren Kilometern gewährleisten. Alternativ können mehrere Drohnen Messwerte von Sensoren am Boden sammeln.

¹ Englischer Titel der Dissertation: "Drone Networks for Search and Rescue"

² Lakeside Labs GmbH, B04b, Lakeside Park, 9020, Klagenfurt, Österreich. hayat@lakeside-labs.com

3. In Katastrophensituationen, wie bei Such- und Rettungseinsätzen (Search and Rescue — SAR), ist das zu erfassende Gebiet kilometergroß. Bei manchen Missionen müssen die Drohnen dynamisch planen und autonom fliegen. Für solche Fälle wird man möglicherweise Drohnen brauchen, die sowohl Sensordaten sammeln als auch in Echtzeit an die Bodenstation übermitteln. Abhängig von der Größe des zu überwachenden Gebiets und von der Zeit, bis zu welcher eine Rückmeldung erfolgen muss, können mehrere Dutzend Drohnen nötig sein.

Wir kommen zu dem Schluss, dass das Drohnennetzwerk als auftragszentriert behandelt werden muss, in dem eine oder mehrere Drohnen eine Reihe von Aufgaben in einem bestimmten Gebiet mit einem bestimmten Grad an Autonomie ausführen. Die Missionsanforderungen haben direkten Einfluss auf das Netzwerkdesign. Die Anzahl der Drohnen im Netzwerk, das Erkundungsgebiet und die Aufgaben sowie der Grad an Autonomie variieren je nach Mission, und das gilt auch für das zugrundeliegende Netzwerkdesign.

Die oben genannten Anwendungen zeigen einen weiteren wichtigen Aspekt: In einem Drohnennetzwerk spielt die Kommunikation unterschiedliche Rollen. Sie hilft einem Team von Drohnen bei der Koordinierung und der gemeinsamen Durchführung von Missionsaufgaben, d. h., die Kommunikation ermöglicht die Koordinierung mehrerer Drohnen. Die Kommunikation ist auch ein Missionsziel, beispielsweise in den oben genannten Fällen 2 und 3. Bei allen Drohnenanwendungen wird die hohe 3D-Mobilität der Drohnen genutzt, um Daten zu sammeln, zu übertragen und zu verbreiten. Diese Übertragung kann in Echtzeit oder periodisch erfolgen oder verzögerungstolerant sein.

Um ein Drohnennetzwerk zu konzipieren, müssen wir daher die Anforderungen bestimmter Anwendungen an Kommunikation kennen und ihre Rolle in der jeweiligen Anwendung richtig einschätzen. Der herkömmliche Ansatz, die Schichten des Protokollstapels zu verbessern, kann für einige Anwendungen genügen, ist aber für andere nicht ausreichend Bashir; Mohamad Yusof [BM19]. Wir schlagen daher einen alternativen Ansatz für das Design von Drohnenkommunikationsnetzwerken vor, welcher auf den Anforderungen der Mission basiert, wobei uns SAR als implementierter Anwendungsfall dient.

2 Demonstrationen

Für den von uns vorgeschlagenen Ansatz, der als missionsorientiertes Netzwerkdesign bezeichnet wird, ergibt sich die Lösung aus der Beantwortung dreier grundlegender Fragen zur Datenübertragung:

1. Welche Daten müssen übertragen werden?
2. Wie sollten Daten zwischen den Netzwerkeinheiten übertragen werden?
3. Wann sollten Daten übertragen werden?

Um 1 zu beantworten, untersuchen wir die *missionsorientierten Kommunikationsanforderungen* von Drohnenanwendungsdomänen. Diese Domänen umfassen Anwendungen, die ähnliche Missionsziele verfolgen. Zur Beantwortung von Frage 2 untersuchen wir *experimentell die vorhandenen Kommunikationstechnologien*, um ihre Stärken und Schwächen bei der Anwendung in Drohnennetzwerken zu ermitteln. Dies vermeidet Neuerfindungen und zeigt, wieviel Aufwand für die Anpassung der Technologien an die Anforderungen von Drohnenanwendungen nötig ist. Schließlich wird zur Beantwortung von Frage 3 ein neuartiger, *mehrdimensionaler Algorithmus zur (Neu-)Planung von Pfaden* für Multidrohnen-systeme vorgeschlagen. Die sich daraus ergebenden Lösungen bilden die drei Teile der vorliegenden Doktorarbeit.

2.1 Literaturverzeichnis

Eine detaillierte Literaturübersicht zu den drei Teilen der Arbeit findet sich in Hayat [Ha21]. Im Folgenden wird nur die relevanteste Literatur vorgestellt.

Missionsorientierte Kommunikationsanforderungen Der Großteil der Literatur zum Design von Drohnennetzwerken geht von verallgemeinernden Annahmen über Kommunikationsanforderungen aus Yang et al. [Ya18]. So hat beispielsweise das Third Generation Partnership Project (3GPP) die grundlegenden Anforderungen an Drohnennetzwerke für Uplink und Downlink in Bezug auf Datenraten, Zuverlässigkeit und Latenzzeit festgelegt, die als Richtlinie für die Integration von Drohnen in zukünftige Mobilfunknetze dienen Zeng et al. [ZLZ19]. Dennoch kommen viele Artikel zu dem Schluss, dass die Gestaltung von Luftverkehrsnetzen missionspezifisch sein muss; die Herausforderungen für das Netz hängen in hohem Maße von der Rolle der Drohne im Netz ab (Netznutzer*innen versus Netzbetreiber*innen) Mozaffari et al. [Mo19]. Die Auswirkungen der Missionsziele auf die Gestaltung von Drohnennetzwerken werden auch in Shah; Kim [SK14] hervorgehoben. Im Rahmen dieser Arbeit haben wir eine umfassende Untersuchung durchgeführt, um die missionspezifischen qualitativen und quantitativen Kommunikationsanforderungen zu ermitteln.

Experimentelle Untersuchung bestehender Drahtlostechnologien Ein umfassendes Tutorial zur analytischen, simulativen und experimentellen Bewertung der drahtlosen Kommunikation in Drohnen wird in Vinogradov et al. [Vi18] vorgestellt. Es wird gezeigt, dass die drei Ansätze einander ergänzen, da jeder gewissen Einschränkungen unterliegt. Obwohl Simulationen der beliebteste Ansatz zur Netzwerkanalyse sind Zhang et al. [ZZZ19], stützen sie sich stark auf Kanalmodelle. Die Kanalmodellierung für Drohnennetzwerke ist aufgrund der hohen Mobilität der Drohnen und der daraus resultierenden hochdynamischen Funkbedingungen sehr mühsam und daher Experimente in der realen Welt erforderlich machen. Es gibt keine formale Neuzuweisung von Frequenzen speziell für Netze in der Luft Marcus [Ma14]; Experimente haben sich hauptsächlich auf Technologien im unlicenzierten Spektrum konzentriert Asadpour et al. [As13]. Die Nutzung von Drohnen im Zusammenhang mit zellularen Netzen wie Long Term Evolution (LTE) ist relativ neu Zhang

et al. [ZZZ19]. Unsere Arbeit zeigt eine bessere Performanz sowohl im unlizenzierten (vgl. Asadpour et al. [As13] als auch im lizenzierten Spektrum (vgl. Marques et al. [Ma19]).

Mehrdimensionale Pfadplanung Die meisten Forschungsarbeiten zur Zielsuche mit mehreren Drohnen berücksichtigen eine scheibenförmige Konnektivität zwischen den Drohnen (siehe [YP12]). Ein solch restriktiver Ansatz (eingeschränkte Konnektivität zur Bodenstation) — sei es kontinuierliche [La19] oder periodische Konnektivität [Ce15] — führt zu einer Verschlechterung der Abdeckungsleistung. Für unseren Pfadplanungsansatz behandeln wir Konnektivität als Ziel und nicht als Einschränkung. Im Vergleich zu den oben genannten Arbeiten ermöglicht unser Ansatz eine flexible Pfadplanung in Bezug auf die Parameter Abdeckung und Konnektivität. Basierend auf den Anforderungen der Mission erlaubt der Algorithmus einen Kompromiss zwischen den beiden Parametern. Die Arbeit [Fl13] beschreibt eine Lösung, die unserer am ehesten entspricht. Die Autoren schlagen einen Ansatz der Mixed-Integer Linear Programming (MILP) vor, bei dem die Drohnen nur als Relais fungieren. In [Ma17] wird ein MANET-Algorithmus vorgestellt, der optimale Durchsatzpfade gewährleistet, aber spezielle Relaisknoten erfordert, die nicht an der Suche beteiligt sind. In ähnlicher Weise werden Drohnen zur Optimierung der Dienstgüte (Quality-of-service — QoS; Netzwerkkonnektivität und Durchsatz) als Basisstationen in der Luft in [LZZ19] eingesetzt. Die Zuweisung spezieller Aufgaben an eine Reihe von Drohnen im Netz kann zu einer ineffizienten Ressourcennutzung führen. Wir nutzen daher alle Drohnen für die Abdeckung. Kommunikationsaufgaben (Relaying/Datenübermittlung) werden den Drohnen zugewiesen, wenn eine Informationsübertragung erforderlich ist. Der Algorithmus stellt die bestmöglichen QoS-Pfade am Ende der Mission sicher.

2.2 Kommunikationsanforderungen

Wir haben eine umfassende Untersuchung von Hayat et al. [HYM16] durchgeführt, um die Kommunikationsanforderungen in Drohnennetzwerken systematisch zu ermitteln. Wir kommen zu dem Schluss, dass diese Anforderungen abhängig sind von: (i) Anwendungen und (ii) Systemdesign. Für die SAR-Anwendung wird an die Kommunikation eine größere Anforderung gestellt als für die Gebietskartierung. Das Systemdesign beeinflusst auch die im Netzwerk übertragenen Daten; unterschiedliche Teamkoordinationsmethoden (zentralisiert oder verteilt) wirken sich auf das zugrundeliegende Netzwerkdesign sowie auf die Menge der übermittelten Daten aus. Wir haben die minimalen quantitativen Datenübertragungsanforderungen für verschiedene Anwendungsbereiche sowie die qualitativen Anforderungen der verschiedenen Systemimplementierungen dargestellt und sind zu dem Schluss gekommen, dass keine einzelne Kommunikationslösung die Anforderungen der verschiedenen Drohnenanwendungen und der verschiedenen Koordinationslösungen erfüllen kann. Dies motivierte die Entwicklung einer Proof-of-Concept-Architektur. Die vorgeschlagene Architektur behandelt Kommunikation, Koordination, Sensorik und die Drohnenhardware als Systemmodule mit klar definierten Interaktionen zwischen den Modulen. Eine solche modulare Architektur würde es den Systementwickler*innenn ermöglichen, ein einzelnes

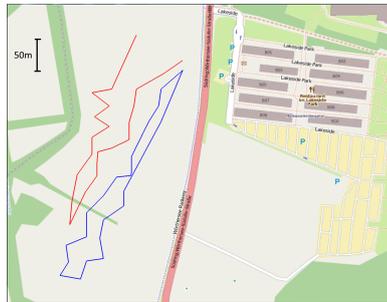
Modul entsprechend den Missionsanforderungen zu modifizieren, ohne dass ein komplettes System neu entwickelt werden müsste. Wir haben das System für SAR getestet.

2.3 Kommunikationsexperimente

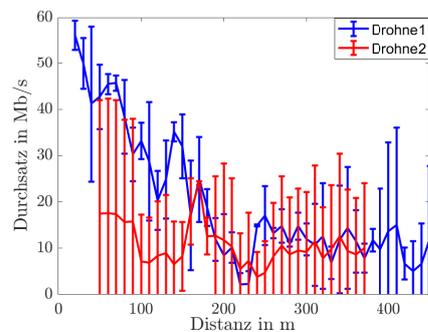
Mit genau definierten System- und Missions-QoS-Anforderungen im Hinterkopf haben wir bestehende mobile Netzwerktechnologien mit Drohnen evaluiert. Die Testtechnologien stammen sowohl aus dem unlizenzieren (IEEE 802.11a/n/ac) als auch aus dem lizenzierten (LTE-Advanced oder LTE-A) Spektrum und haben keine drohnenspezifischen Verbesserungen erfahren. Eine solche Bewertung anhand von Experimenten führt zu wertvollen Schlussfolgerungen. Wir können eine Neuerung vermeiden, wenn die bestehenden Technologien den Anforderungen bestimmter Drohnenanwendungen genügen, oder wir können die Mängel der aktuellen Lösungen erkennen und – wo erforderlich – unser Augenmerk auf Änderungen und Verbesserungen legen.

Unlizenzirtes Spektrum

Wir haben eine Reihe von Experimenten mit 802.11a/n/ac durchgeführt. Eine Drohne flog auf einem geraden Weg von einer Basisstation (BS) weg und übertrug Daten entweder direkt oder über eine Relais-Drohne an die BS. Wir analysierten sowohl Zugangspunkte (AP) als auch Mesh-Netzwerke zur Reichweitenerweiterung. Die Experimente lieferten umfassende Einblicke in die reale Leistung der unlizenzierten Technologien. Da der Zweck der Experimente darin bestand, zu verstehen, wie die Technologien für SAR abschneiden könnten, stellen wir in dieser Zusammenfassung die Ergebnisse für ein Ad-hoc-Szenario mit mehreren Drohnen vor, bei dem zwei Drohnen (Drohne1 und Drohne2) ein Gebiet abdecken und die erfassten Daten an eine BS senden (siehe Abbildung 1).



(a) Flugwege der beiden Drohnen (blaue und rote durchgezogene Linien).



(b) Durchsatz.

Abb. 1: Abdeckungsszenario mit zwei Drohnen (Drohne1 und Drohne2), die Luft-Boden-Verkehr im Ad-hoc-Modus mit 802.11n senden.

In mehreren Durchläufen beanspruchte Drohne1, welche näher an der BS war, zu Beginn des Tests einen größeren Teil des Kanals: Der durchschnittliche Durchsatz von Drohne1 war

Höhe	RSSNR Korrelation	SIR Korrelation
10 m	0.40	0.31
50 m	0.58	0.27
100 m	0.59	0.36
150 m	0.78	0.63

Tab. 1: Kreuzkorrelation des Durchsatzes mit dem Signal-Rausch- (RSSNR) und Signal-Störungs-Verhältnis (SIR) (Durchschnittswerte über vier Messreihen)

mit 45 Mb/s mehr als doppelt so hoch wie der von Drohne2. Im weiteren Verlauf des Tests näherten sich die Abstände der Drohnen zum BS immer mehr an: Bei 100 s waren beide Drohnen 200 m von der BS entfernt. Der durchschnittliche Durchsatz der beiden Geräte glich sich nach 200 m an (Abbildung 1). Das Experiment wurde beendet, als Drohne1 450 m erreicht hatte.

Das Experiment zeigt, dass 802.11n über kurze Entfernungen einen beträchtlichen Durchsatz bieten kann (im Durchschnitt mehr als 10 Mb/s für beide Sender). Dieser Wert ist zufriedenstellend, wenn man die durchschnittlichen Durchsatzanforderungen des Großteils des Echtzeitverkehrs berücksichtigt. Der momentane Durchsatz schwankt aufgrund der Mobilität erheblich. Die Netzfairness scheint in einem realen Übertragungsszenario mit mobilen Sendern zu gelten.

Lizenziertes Spektrum

Die Technologien im unlizenzierten Spektrum sind dann von Vorteil, wenn keine Netzinfrastruktur vorhanden ist. Für Anwendungen mit Drohnenschwärmen oder für die Zustellung per Drohne sind sie nicht geeignet. Im ersten Fall können die Drohnen im Schwarm viel höhere Anforderungen an die Kommunikation stellen (Durchsatz, Zuverlässigkeit, Fairness usw.), als sie mit Wi-Fi erfüllt werden können. Im zweiten Fall muss eine Infrastruktur vorhanden sein, um die Mobilität der Drohnen über sehr große Entfernungen zu verfolgen. Um die Sicherheit des Drohnenetzes zu gewährleisten, wurden lizenzierte Technologien für die Kommunikation genutzt. Bei den Experimenten mit lizenzierten Frequenzen haben wir LTE-A verwendet. Solche Experimente sind für die Entwickler*innen von Drohnenetzen interessant, da die Mobilfunknetze für terrestrische Nutzer*innen optimiert sind und die Hauptkeule der Antennen nach unten gerichtet ist.

Die Experimente zeigten, dass der durchschnittliche Durchsatz mit der Höhe abnimmt und eine starke Kreuzkorrelation zwischen dem momentanen Durchsatz und der RSSNR besteht, die mit der Höhe zunimmt (siehe Tabelle 1). In großen Höhen (150 m) ist der Durchsatz auch mit dem SIR korreliert. Die Anzahl der Basisstationen (eNBs in LTE-A) mit Sichtverbindung zu einer Drohne nimmt mit der Höhe zu [BCP16]. Die Störsignale dieser eNBs werden von der Drohne mit einer Signalleistung (RSRP) empfangen, das dem des beabsichtigten Signals ähnelt, was wiederum den Signal-Störungs-Verhältnis (SIR)-Wert senkt.

Eine weitere Beobachtung in großen Höhen ist, dass die Drohnen von eNB-Antennen-Nebenkeulen bedient werden, die über eine enge Winkelabdeckung verfügen; in größeren Höhen erleben die Drohnen sehr häufige Handover, was ebenfalls zum Durchsatzrückgang beiträgt. Zelluläre Netze sind eine für Drohnenanwendungen wünschenswerte Technologie, jedoch gibt es was die Integration von Drohnen betrifft noch offene Fragen wie Antennenneigung und Strahlformung.

2.4 Mehrdimensionale Pfadplanung

Drohnennetzwerke unterscheiden sich von anderen in der einzigartigen Mobilitätscharakteristik von Drohnen. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimente haben gezeigt, dass die bestehenden Kommunikationstechnologien nicht in der Lage sind, die hohe Mobilität von Drohnen zu bewältigen. Das Routing von Daten durch ein solches Netzwerk ist eine Herausforderung, insbesondere, wenn bestimmte Prioritäten bei der Datenübertragung (periodisch, in Echtzeit) erfüllt werden müssen. Wir haben einen Pfadplanungsalgorithmus für die Anwendungsschicht entwickelt, der die hohe Mobilität von Drohnen für das Datenrouting in einem Drohnennetzwerk nutzt und die Frage beantwortet, *wann* Daten übertragen werden sollen. Wir haben festgestellt, dass die meisten Drohnenanwendungen Abdeckung und/oder Konnektivität als Missionsziele haben. Unser Algorithmusentwurf zielt sowohl auf Abdeckung als auch auf Konnektivität. Dieser Mehrzielalgorithmus ist mit einem Parameter λ abstimmbare, d.h. ein Missionsziel kann je nach den Anforderungen der Mission mit folgender Gleichung priorisiert werden:

$$\tau = \lambda \tau_{cov} + (1 - \lambda) \tau_{conn} \quad (1)$$

Wobei τ die Gesamtzielfunktion darstellt, τ_{cov} die Abdeckungsfunktion und τ_{conn} die Konnektivitätsfunktion. Wenn die Abdeckung eine höhere Priorität hat als die Konnektivität gilt $\lambda > 0,5$ und umgekehrt.

Mit Blick auf die SAR-Mission haben wir dann die Aufgaben der Mission identifiziert. Diese sind: (i) Suchaufgabe, um ein Ziel zu lokalisieren, (ii) Informationsaufgabe, um die BS über den Standort des Ziels zu informieren, und (iii) Überwachungsaufgabe, um eine Relaisverbindung zwischen dem Ziel und der BS herzustellen, um das Ziel kontinuierlich zu überwachen. Die Suchaufgabe sorgt für die Gebietsabdeckung, während die Informations- und Überwachungsaufgaben die Netzwerkkonnektivität ermöglichen. Der Algorithmus nutzt die Netzwerkressourcen optimal aus, d. h. alle Drohnen beteiligen sich an der Ausführung aller verfügbaren Aufgaben, und die wichtigsten Aufgaben werden zuerst ausgeführt. SAR-Missionen sind zeitkritisch, ein schnellerer Abschluss ist wünschenswert. Daher steht τ in Gleichung 1 für die Missionszeit, τ_{cov} für die Zeit zur Erfüllung der Aufgaben der Abdeckung und τ_{conn} für die Zeit zur Erfüllung der konnektivitätsbezogenen Aufgaben. Genetic Algorithm (GA) Optimierung um Gleichung 1 zu minimieren.

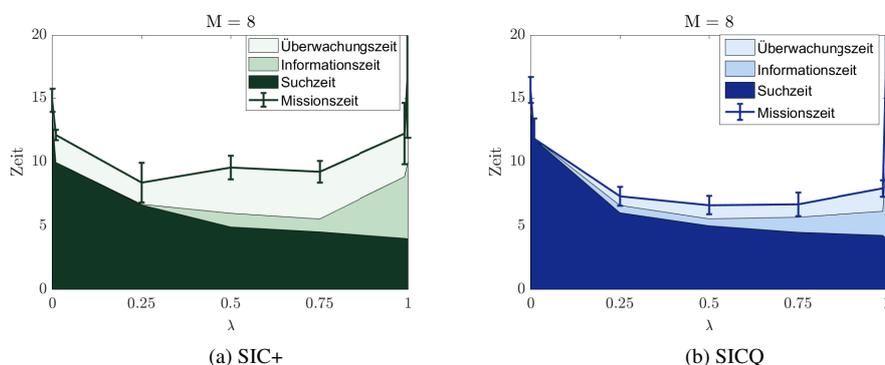


Abb. 2: Zeit versus λ für (a) SIC+ und (b) SICQ. SAR mit acht Drohnen ($M = 8$). Zeit in Schritten.

Wir haben dann mehrere Strategien vorgeschlagen, die auf der Datenübermittlung (inform-first; IF), der Weiterleitung (connect-first; CF) und einer Hybridstrategie (simultaneous-inform-and-connect; SIC+) basieren. Die Hybridstrategie übertraf die beiden anderen Strategien. Wir haben auch gezeigt, dass die Gesamtzeit für den Abschluss der Mission im Vergleich zu Pfaden ohne QoS (SIC+) reduziert wurde, wenn die Drohnenpfade QoS (SICQ) gewährleisteten. Dies ist in Abbildung 2 zu sehen. Mit SICQ wird die Konnektivität verbessert, ohne dass die Abdeckung im Vergleich zu SIC+ stark beeinträchtigt wird.

3 Schlussbemerkungen

Die Fokussierung auf das *Was*, *Wie* und *Wann* von Drohnennetzwerken soll Entwickler*innen von Multidrohnennetzwerken und -systemen helfen

- die Kommunikationsanforderungen von Drohnennetzwerken mit Hilfe von Anwendungsbeispielen und Implementierungslösungen zu verstehen,
- die vorgeschlagene modulare Systemarchitektur zu nutzen, um ihre eigenen Kommunikations- und Koordinationslösungen zu testen, ohne dass ein komplettes System-Redesign erforderlich ist,
- die Vorteile und Schwächen der bestehenden Kommunikationstechnologien im lizenzierten und unlizenzierten Spektrum bei der Anwendung auf Drohnennetze zu verstehen und zu erkennen und
- den abstimmbaren Pfadplanungsalgorithmus und die Strategien der Anwendungsschicht zu nutzen, um bestimmte Garantien in Bezug auf die Dienstgüte und die Missionserfüllungszeiten unter den gegebenen Bedingungen (Gebiet, Technologie und Drohnedichte) zu gewährleisten.

Obwohl SAR als Anwendungsfall gewählt wurde, kann unser Ansatz den Systementwickler*innen für jede beliebige Multi-Drohnen-Mission von Nutzen sein.

Literatur

- [As13] Asadpour, M.; Giustiniano, D.; Hummel, K. A.; Heimlicher, S.: Characterizing 802.11n Aerial Communication. In: Proc. ACM MobiHoc Workshop on Airborne Networks and Communications. 2013.
- [BCP16] Bergh, B. V. D.; Chiumento, A.; Pollin, S.: LTE in the Sky: Trading off Propagation Benefits with Interference Costs for Aerial Nodes. *IEEE Communications Magazine*, 2016.
- [BM19] Bashir, M. N.; Mohamad Yusof, K.: Green Mesh Network of UAVs: A Survey of Energy Efficient Protocols across Physical, Data Link and Network Layers. In: Proc. Intl. Conf. on Big Data and Smart City (ICBDSC). 2019.
- [Ce15] Cesare, K.; Skeelee, R.; Yoo, S.; Zhang, Y.; Hollinger, G.: Multi-UAV exploration with limited communication and battery. In: Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). 2015.
- [Fl13] Flushing, E. F.; Kudelski, M.; Gambardella, L. M.; Caro, G. A. D.: Connectivity-aware planning of search and rescue missions. In: Proc. IEEE Intl. Symp. on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR). 2013.
- [Ha21] Hayat, S.: Drohnennetze für Suche und Rettung, Dissertation, Klagenfurt University, 2021.
- [HYM16] Hayat, S.; Yanmaz, E.; Muzaffar, R.: Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Viewpoint. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 18/, 2016.
- [La19] Lamine, A.; Mguis, F.; Snoussi, H.; Ghedira, K.: Coverage Optimization using Multiple Unmanned Aerial Vehicles with Connectivity Constraint. In: Proc. Intl. Wireless Communications Mobile Computing Conf. (IWCMC). 2019.
- [LZZ19] Liu, L.; Zhang, S.; Zhang, R.: CoMP in the Sky: UAV Placement and Movement Optimization for Multi-User Communications. *IEEE Transactions on Communications* 67/, 2019.
- [Ma14] Marcus, M.: Spectrum policy challenges of UAV/drones [Spectrum Policy and Regulatory Issues]. *IEEE Wireless Communications* 21/, 2014.
- [Ma17] Magán-Carrión, R.; Camacho, J.; García-Teodoro, P.; Feo Flushing, E.; Di Caro, G.: A Dynamical Relay node placement solution for MANETs. *Computer Communications* 114/, 2017.
- [Ma19] Marques, H.; Marques, P.; Ribeiro, J.; Alves, T.; Pereira, L.: Experimental Evaluation of Cellular Networks for UAV Operation and Services. In: Proc. IEEE 24th Intl. Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD). 2019.

- [Mo19] Mozaffari, M.; Saad, W.; Bennis, M.; Nam, Y.; Debbah, M.: A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems. *IEEE Communications Surveys Tutorials* 21/, 2019.
- [SK14] Shah, B.; Kim, K.: A survey on three-dimensional wireless ad hoc and sensor networks. *Intl. Journal of Distributed Sensor Networks* 10/, 2014.
- [Vi18] Vinogradov, E.; Sallouha, H.; Bast, S. D.; Azari, M. M.; Pollin, S.: Tutorial on UAVs: A Blue Sky View on Wireless Communication. *Journal of Mobile Multimedia* 14/, 2018.
- [Ya18] Yang, G.; Lin, X.; Li, Y.; Cui, H.; Xu, M.; Wu, D.; Rydén, H.; Redhwan, S. B.: A Telecom Perspective on the Internet of Drones: From LTE-Advanced to 5G, 2018.
- [YP12] York, G.; Pack, D. J.: Ground Target Detection Using Cooperative Unmanned Aerial Systems. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 65/, 2012.
- [ZLZ19] Zeng, Y.; Lyu, J.; Zhang, R.: Cellular-Connected UAV: Potentials, Challenges and Promising Technologies. *IEEE Wireless Communications* 26/, 2019.
- [ZZZ19] Zhang, S.; Zeng, Y.; Zhang, R.: Cellular-Enabled UAV Communication: A Connectivity-Constrained Trajectory Optimization Perspective. *IEEE Transactions on Communications* 67/, 2019.



Samira Hayat wurde 1981 in Pakistan geboren. Im Jahr 2011 schloss sie ihr Masterstudium Telekommunikation an der Universität Trient ab (Note 109/100) und begann als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Vernetzte und Eingebettete Systeme der Universität Klagenfurt. Dort schloss sie im Jahr 2021 ihr Doktorat der Technischen Wissenschaften mit einer Dissertation im Bereich der Multidrohnenysteme mit ausgezeichnetem Erfolg ab. Eine ihrer **Publikationen** als Erstautorin wird mittlerweile mehr als 850 Mal zitiert. Während ihres Doktoratsstudiums war sie Gastwissenschaftlerin an der Carnegie Mellon University (USA, 2016) und beschäftigte sich mit ethischen Aspekten von Drohnen.

Im Zusammenhang mit ihrer Forschung hielt sie Vorträge bei TedxCERN, re:publica, Ars Electronica Festival und wurde 2018 als Change Maker zu den Goalkeepers der Gates' Foundation eingeladen. Sie arbeitet seit einigen Jahren als Senior Researcher bei der Lakeside Labs GmbH. Außerdem gründet sie ein Unternehmen, das auf ihrer Doktorarbeit basiert. Ihre Unternehmensidee wurde ausgewählt, um auf dem Europäischen Forum und in Forbes (Deutschland) präsentiert zu werden. Zudem wurde sie für die Teilnahme am Falling Walls Festival in Berlin (2018) eingeladen.