

Stellungnahme zur öffentlichen Anhörung des Ausschusses für Verkehr und digitale Infrastruktur des Deutschen Bundestages

**Entwurf eines Gesetzes zur Anpassung nationaler Regelungen an die
Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24.
Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb
unbemannter Luftfahrzeuge**

PD Dr. Thomas Kirschstein

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

12. April 2021

1 Präambel

Diese Stellungnahme fasst die wissenschaftliche Literatur zum Thema Energieeffizienzanalysen von Paketdrohnensystemen zusammen. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf stationsbasierten Distributionssystemen bei denen Pakete von zentralen Depots aus zu den Endkunden transportiert werden. Im folgenden werden Studien zusammengefasst, die den Energiebedarf verschiedener Verkehrsträger bei der Paketdistribution vergleichend gegenüberstellen. Die Analyse des Energiebedarfs bildet den Ausgangspunkt für die Analyse potentieller Umweltwirkungen der betrachteten Verkehrsträger.

2 Anwendungsszenarien von Drohnen in der Paketlogistik

Im Rahmen der Erbringung logistischer Dienstleistungen können Drohnen in vielfältiger Weise eingesetzt werden. Die Anwendungsgebiete lassen sich dementsprechend vielfältig gliedern, z.B. nach Einsatzszenarien wie Such-, Überwachungs-, oder Transportaufgaben (Otto et al., 2018). Im folgenden soll nur das Einsatzgebiet der Transportdienstleistungen im Rahmen der Letzten-Meile-Distribution von Paketen betrachtet werden. Distributionssysteme für Letzte-Meile-Transporte bestehen aus einem Depotnetzwerk von denen

Pakete per Kleintransporter zu Endkunden transportiert werden ([Bundesverband Paket & Expresslogistik, 2017](#)).

Für das Anwendungsfeld der drohnen-basierten Paketdistribution können zwei Grundtypen unterschieden werden: mobile und stationsgebundene Systeme. In mobilen Systemen werden Drohnen von Kleintransportern gestartet (für einen Überblick, vgl. [Chung et al., 2020](#); [Khoufi et al., 2019](#)). In stationsgebundenen Systemen starten Drohnen direkt von Depots und kehren nach der Auslieferung zu diesen zurück. Je nach Anwendungsfeld variieren die zum Einsatz kommenden Drohnen. Während in mobilen Systemen hauptsächlich leichte Multikopter mit vergleichsweise geringer Reichweite (ca. 10-15 km) verwendet werden, kommen in stationsgebundenen Systemen größere, z.T. starrflüglige Drohnen mit hoher Reichweite (ca. 30-50 km) zum Einsatz ([Poikonen and Campbell, 2020](#)). Entsprechend variiert auch das Gewicht der verwendeten Drohnentypen von wenigen Kilogramm bis zu 20-30 kg. Gemein ist den meisten Drohnentypen ein relativ geringes Nutzlastgewicht von ca. 1-8 kg und die Fähigkeit autonom zu fliegen, d.h. ohne direkte Steuerung durch einen Piloten. Weiterhin müssen die Drohnen in der Lage sein Pakete beim Endkunden abzugeben. Dies geschieht bei kleineren Modellen indem die Drohne landet und das Paket entkoppelt wird. Bei größeren, starrflügligen Modellen werden Pakete z.B. per Seil oder Fallschirm abgegeben, da eine Landung dieser Modelle ohne spezielle Vorkehrungen i.d.R. nicht möglich ist.

Der Einsatz von Drohnen in der Paketlogistik kann je nach Anwendungsfall ökonomische Vorteile haben. Im Fall mobiler Systeme ergeben sich Potentiale für geringere Paketzustellkosten i.d.R. durch eine Verkürzung der Fahrstrecke des Trägerfahrzeugs (d.h. Kleintransporters) bzw. eine Erhöhung der Anzahl zustellbarer Pakete pro Tour ([Chung et al., 2020](#); [Boysen et al., 2018](#)). Im Fall stationsgebundener Systeme ergeben sich Einsparpotentiale zum einen durch geringere Personalkosten sofern keine oder hinreichend wenige Piloten für den Betrieb der Drohnen nötig sind und zum anderen durch möglicherweise geringere Kraftstoffkosten aufgrund energieeffizienterer Distribution ([Stolaroff et al., 2018](#); [Baloch and Gzara, 2020](#)). Der Energiebedarf von Drohnen hat dabei auch einen möglicherweise positiven Umwelteffekt, da Drohnen elektrische Fahrzeuge sind, die ggf. diesel-betriebene Auslieferfahrzeuge verdrängen könnten. Voraussetzung ist u.a., dass der Energiemix für die Versorgung der Drohnen aus erneuerbaren Quellen erzeugt wird. Darüber hinaus müssen bestimmte Konstellationen von Umweltparametern vorliegen, die im folgenden näher erläutert werden.

3 Vergleichende Analysen der Energieeffizienz von Drohnen

Bei der Analyse der Energieeffizienz verschiedener Paketdistributionssysteme müssen Energiebedarfsmodelle der betrachteten Verkehrsträger verwendet werden. Für ein gegebenes Bewegungsprofil eines Fahrzeugs kann damit der Energiebedarf eines Fahrzeugs ermittelt werden (für einen Überblick zu Energiebedarfsmodellen von Drohnen und Kleintransportern vgl. [Zhang et al. \(2020\)](#) und [Demir et al. \(2014\)](#)). Für eine gegebene Menge an Transportaufträgen sowie den Routen der Fahrzeuge können dann die Energiebedarfe der verschiedenen Fahrzeuge ermittelt werden. Neben den Transportaufträgen und Routen beeinflussen eine Reihe weiterer Faktoren die Energieverbräuche der Fahrzeuge. Diese lassen sich in *technologische* (wie Leergewicht, Antriebsart, Aerodynamik, etc.), *umweltbedingte* (Verkehr, Wind, Straßennetz, etc.) und *geographische* Faktoren (Anzahl und Verteilung der Kundenstandorte, Distanzen zwischen Depot und Kunden, etc.) unterteilen.

Verschiedene Studien untersuchen unter welchen Faktorkonstellationen bei stationsgebundene Drohnensysteme eine energieeffiziente Paketdistribution ermöglichen ([Goodchild and Toy, 2017](#); [Figliozi, 2017](#); [Stolaroff et al., 2018](#); [Kirschstein, 2020](#)). Gemein ist allen Studien, dass szenario-basierte Simulationen durchgeführt werden bei denen eine bestimmte Menge an Paketen entweder per Drohne oder per Kleintransporter ausgeliefert werden (d.h. alle Pakete sind von allen Verkehrsträgern transportierbar). Weiterhin wird davon ausgegangen, dass Drohnen direkt zu Kundenstandorten fliegen können (euklidische Distanz). Ein prinzipieller Vorteil von Drohnen ist ihr geringes Leergewicht (verglichen mit Kleintransportern), sodass der Energieverbrauch bei Leertransporten relativ gering ist. Auf der anderen Seite ist die Ladekapazität von Drohnen begrenzt auf ein Paket (im Vergleich zu mehreren hundert in einem Kleintransporter). Zusammenfassend lassen die Studien erkennen, dass folgende Situationen die komparative Energieeffizienz von stationsgebundenen Drohnensystemen begünstigen:

- Die Distanz zwischen Depot und Kundenstandorten ist gering (je nach Studie zwischen 4 und 10 km).
- Die Anzahl der insgesamt zu transportierenden Pakete ist gering (kleiner als 50).
- Kundenorte sind räumlich relativ weit verteilt (in einem Radius von mehr als 5 km).
- Windgeschwindigkeiten sind gering (weniger als ca. 25 km/h).
- Die Verkehrsdichte ist hoch (viel Stop-&-Go-Verkehr).

Im Vergleich mit konventionellen oder batterie-elektrisch betriebenen Kleintransportern zeigt die Literaturanalyse, dass Drohnen eine energieeffizientere Paketdistribution ermög-

lichen, wenn die Anzahl der Pakete und die Kundendichte gering ist, sowie geringe Windgeschwindigkeiten vorherrschen. In urbanen Räumen sind die erste Bedingung i.d.R. nicht erfüllt, sodass meist batterie-elektrische Kleintransporter energieeffizientere Verkehrsträger darstellen. In eher ländlich geprägten Gebieten mit geringer Bevölkerungsdichte könnte die Paketdistribution mit Drohnen Vorteile gegenüber der konventionellen Paketdistribution aufweisen. Allerdings erfordert die vergleichsweise geringe Reichweite der Drohnen den Aufbau einer geeigneten Hub-Infrastruktur, was mit erheblichen Investitionsaufwendungen verbunden ist. Eine integrierte Paketdistribution, die eine gemischte Flotte von Drohnen und batterie-elektrischen Kleintransporter einsetzt, kann die Vorteile beider Verkehrsträger ggf. kombinieren. Eine erste unveröffentlichte Studie zeigt Energieeinsparpotentiale einer gemischten Fahrzeugflotte von im Schnitt 1-5% (max. 10-15%) gegenüber einer Flotte aus batterie-elektrischen Kleintransportern ([Kirschstein, 2021](#)).

4 Zusammenfassung

Die aktuelle wissenschaftliche Literatur zur Energieeffizienz der Paketdistribution mit Drohnen lässt erkennen, dass Drohnen potentiell helfen können, den Energiebedarf für die Paketdistribution zu reduzieren. Dieses Einsparpotential existiert sehr wahrscheinlich vorrangig bei Anwendungen in ländlichen Gebieten. Die Ergebnisse der Simulationsstudien deuten darauf hin, dass Energieeinsparpotentiale von 1-10% gegenüber der konventionellen Paketdistribution möglich sind. Allerdings sind diese Simulationsergebnisse mit erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der ökonomischen und ökologischen Bewertung drohnen-basierter Paketdistributionssysteme behaftet.

Bei einer ganzheitlichen Bewertung unterschiedlicher Distributionssysteme sind die Investitionen in Equipment und Infrastruktur sowie die Vorkettenprozesse mit zu betrachten. Vergleichende Studien, die den kompletten drohnen-basierten Paketdistributionsprozess modellieren, fehlen jedoch noch (Ansätze zur systemischen Lebenszyklusanalyse finden sich in [Stolaroff et al., 2018](#); [Baloch and Gzara, 2020](#)). Weiterhin bestehen erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Modellierung des Energiebedarfs von Drohnen. Dies ist sowohl der technischen Heterogenität der verwendeten Drohnenmodelle, als auch der verwendeten Energiebedarfsmodelle geschuldet (vgl. [Zhang et al., 2020](#)). Vergleichende Validierungsstudien mit realen Messdaten von praxisrelevanten Paketdrohnen fehlen zur Zeit noch. Weitere unzureichend untersuchte Aspekte der Paketdistribution mit Drohnen sind der Einfluss der Wetterbedingungen (z.B. Thermik/Fallwinde in Innenstädten), die genaue Routenplanung (z.B. Orientierung am Straßennetz vs. Direktflug) sowie verschiedene technische (z.B. Verlässlichkeit, Absturzrisiko), rechtliche (z.B. Haftung bei Unfällen) und organisatorische Aspekte (z.B. Autonomieniveau).

Insgesamt deuten die aktuellen Entwicklungen darauf hin, dass Paketdrohnen vorerst

in spezialisierten Logistikdienstleistungen Anwendung finden. Dies betrifft z.B. die Versorgung mit medizinischen Materialien wie Proben, Medikamenten und Versorgungsgütern oder die Versorgung unzugänglicher Gebiete wie Inseln oder Bergregionen. Diese Anwendungsfelder zeichnen sich durch hohe Anforderungen hinsichtlich Flexibilität und Geschwindigkeit sowie durch aufwändige Alternativprozesse aus (z.B. Kurierdienste). In diesen Anwendungsfeldern deuten aktuelle Studien darauf hin, dass Drohnen Beiträge zur (energie-)effizienten Umgestaltung der Logistikprozesse liefern können.

Literatur

- Baloch, G. and Gzara, F. (2020). Strategic network design for parcel delivery with drones under competition. *Transportation Science*, 54(1):204–228.
- Boysen, N., Briskorn, D., Fedtke, S., and Schwerdfeger, S. (2018). Drone delivery from trucks: Drone scheduling for given truck routes. *Networks*, 72(4):506–527.
- Bundesverband Paket & Expresslogistik (2017). Nachhaltigkeitsstudie 2017 - Bewertung der Chancen für die nachhaltige Stadtlogistik von morgen.
- Chung, S. H., Sah, B., and Lee, J. (2020). Optimization for drone and drone-truck combined operations: A review of the state of the art and future directions. *Computers & Operations Research*.
- Demir, E., Bektaş, T., and Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 237(3):775–793.
- Figliozzi, M. A. (2017). Lifecycle modeling and assessment of unmanned aerial vehicles (Drones) CO₂e emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57:251–261.
- Goodchild, A. and Toy, J. (2017). Delivery by drone: An evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO₂ emissions in the delivery service industry. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*.
- Khoufi, I., Laouiti, A., and Adjih, C. (2019). A survey of recent extended variants of the traveling salesman and vehicle routing problems for unmanned aerial vehicles. *Drones*, 3(3):66.
- Kirschstein, T. (2020). Comparison of energy demands of drone-based and ground-based parcel delivery services. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 78.

- Kirschstein, T. (2021). Energy demand of parcel delivery services with a mixed fleet of electric vehicles. *preprint*.
- Otto, A., Agatz, N., Campbell, J., Golden, B., and Pesch, E. (2018). Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (uavs) or aerial drones: A survey. *Networks*, 72(4):411–458.
- Poikonen, S. and Campbell, J. F. (2020). Future directions in drone routing research. *Networks*.
- Stolaroff, J. K., Samaras, C., O’Neill, E. R., Lubers, A., Mitchell, A. S., and Ceperley, D. (2018). Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery. *Nature communications*, 9(1):409.
- Zhang, J., Campbell, J. F., II, D. C. S., and Hupman, A. C. (2020). Energy consumption models for delivery drones: A comparison and assessment. *preprint*.