

# Urbane und Regionale Lieferdrohnen



Technologiedossier

Nr.1 / März 2026

# Abbildungsverzeichnis

S.1, *Foto*: Demonstrationsvorhaben "Stadt-Land-Drohne" zur Verbesserung der ländlichen Nahversorgung mit Lieferdrohnen © Luftlabor

S.6, *Abbildung 1*: Säulendiagramm zu den Erscheinungsjahren der Publikationen aus dem Scoping

S.7, *Abbildung 2*: Säulendiagramm zum Vorkommen der sozial-ökologischen Dimensionen in den Scoping-Ergebnissen

S.9, S.11, S.14, *Fotos*: Projektteam Stadt-Land-Drohne, © Gemeinde Wusterhausen/ Dosse, Dronegy Inh. Sven Jürß, Luftlabor GbR. Dr. Kellermann und Biehle

# Inhalt

**01**

**Einleitung in die  
Technologie**

S.5

**05**

**Akzeptanz und  
Konfliktpotenzial**

S.13

**02**

**Möglicher  
Klimaschutzbeitrag**

S.8

**06**

**Regulatorische  
Hebel und  
Steuerungsbedarfe**

S.15

**03**

**Wirtschaftliche  
Relevanz**

S.10

**07**

**Empfehlungen zur  
Forschungsagenda**

S.16

**04**

**Reifegrad und  
Skalierbarkeit**

S.12

**08**

**Referenzen**

S.19

# Zusammenfassung

Die Entwicklung von Advanced Air Mobility (AAM) tritt in eine entscheidende Phase: Nationale Marktprognosen gehen von einer Verdopplung des Umsatzes bis 2030 aus, wobei ein Großteil der Wertschöpfung im Anwendersegment stattfinden soll. Das Dossier fokussiert batteriebetriebene Flugsysteme für die Warenlogistik (bis 8 kg Nutzlast / 50 km Reichweite). Technologischer Zielhorizont ist der vollautonome Betrieb im U-Space. Während Deutschland in der Systemintegration stark positioniert ist, besteht bei Hardware-Komponenten wie Prozessoren und Akkus eine deutliche Importabhängigkeit.

Ökologische Vorteile entstehen vor allem dort, wo emissionsintensive Verkehrsträger in der Hochwertlogistik oder bei langen Einzelzustellungen im ländlichen Raum ersetzt werden. In Städten bleiben konventionelle Lieferwagen aufgrund von Bündelungseffekten oft effizienter, zumal Reboundeffekte und die Batterieproduktion die Bilanz negativ beeinflussen können. Gesellschaftlich stoßen medizinische Notfalltransporte auf breite Zustimmung, während kommerzielle Services in Wohngebieten Fragen zur Verteilungsgerechtigkeit sowie Bedenken von Anwohnern und Lokalpolitik hervorrufen. Eine funktionale Lücke besteht zudem zwischen hoheitlicher Regulierung und lokalen Auswirkungen.

Basierend auf den Ergebnissen des Dossiers liegt ein zentraler Hebel zur Verbesserung nationaler Vermarktungschancen von AAM im Fokus auf Anwendungen mit einem wahrgenommenen gesellschaftlichen Nutzen. Vorgeschlagen wird weiterhin, einen förderpolitischen Schwerpunkt auf die Minderung der gesellschaftlichen Risikowahrnehmung bzw. den Vertrauensaufbau zu legen. Die Forschung zeigt weiterhin, dass die Klimaneutralität von Drohnen kein rein technisches Attribut ist.

Das Erbringen entsprechender Nachweise in konkreten Anwendungsfällen sollte gezielt gefördert und zur Qualifizierung der fachpolitischen Debatte bzw. öffentlichen Kommunikation genutzt werden.

In Hinblick auf Hebel der transdisziplinären Forschung zur Entwicklung Deutschlands zum Leitmarkt wird die Entwicklung von Systemkompetenzen empfohlen, d. h. die Umsetzung eines an städtisch-industriellen Wertschöpfungsketten ausgerichteten Luftraummanagements (U-Space) unter umfassender Stakeholderbeteiligung. Hier besteht aktuell eine historisch einmalige Chance, die Multi-Level-Governance-Strukturen zwischen der hoheitlichen Regulierung (Bund/EASA) und den lokalen Ebenen zu gestalten. Die aktuelle Forschung argumentiert, dass Deutschland im europäischen Vergleich zum Vorreiter für eine integrierte Drohnenlogistik werden kann, indem Kommunen befähigt werden, die hoheitlichen Vorgaben zur Nutzung des bodennahen Luftraums (u. a. § 21h LuftVO) an den lokalen Kontext anzupassen. In diesem Zusammenhang sollte auch die administrative Handlungsfähigkeit bzw. der Aufbau von Kompetenzen in der rechtssicheren und gesellschaftlich akzeptierten Planung und Verwaltung des bodennahen Luftraums als harter Standortfaktor begriffen und gefördert werden.

Für den weiteren Technologietransfer wird die gezielte Einbindung weiterer Kommunen bzw. regionaler Cluster in das deutsche AAM-Ökosystem vorgeschlagen, beispielsweise durch Wissenstransfer und Schulungsprogramme. Zudem bietet die Förderung von Reallaboren die Möglichkeit, technische, rechtliche und planerische Innovationen im Bereich der Lieferdrohnen praxisnah zu testen, zur Gestaltung der öffentlichen Wahrnehmung von AAM beizutragen und Marktakteuren zu helfen, Services an die Erwartungen und Wünsche der Konsumenten anzupassen.

# Einleitung in die Technologie

# 01

Die hier betrachteten Technologien werden unter dem Begriff Advanced Air Mobility (AAM) gefasst. Dieser englische Begriff wird vom Bundesverkehrsministerium (BMV) konsequent auch im Deutschen verwendet und legt den Fokus auf ein flächendeckendes, intermodales Luftmobilitätssystem mit Lieferdrohnen und Flugtaxis (Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, 2025). Gegenstand dieses Dossiers sind ausschließlich unbemannte Flugsysteme (Unmanned Aircraft Systems, UAS) für die Warenlogistik im urbanen und ländlichen Raum. Betrachtet werden batteriebetriebene, manövrierfähige Koptersysteme mit Reichweiten bis circa 25 km (vgl. Titelbild) und Kippflügel- beziehungsweise Starrflügelfluggeräte für Distanzen bis circa 50 km. Bei maximal 25 kg Abflugmasse beträgt die Nutzlast der meisten Systeme bis 8 kg (Poikonen & Campbell, 2021), wenngleich auch Fluggeräte für deutlich höhere Lasten in der Entwicklung und Anwendung sind, die beispielsweise im Baugewerbe oder für die Warendistribution auf der „mittleren Meile“ an Relevanz gewinnen.

Das technologische Zielbild ist jeweils der Übergang vom aktuell bereits etablierten, automatisierten Betrieb des UAS außerhalb der Sichtweite des Fernpiloten (Beyond Vision Line of Sight, BVLOS), bei dem das UAS fernüberwacht wird, hin zum autonomen Betrieb, in dem das UAS situativ entscheidet. Dies erfordert eine technische Evolution von der Verfolgung vorprogrammierter Flugpfade hin zu Fähigkeiten zur Konflikterkennung und -lösung (Detect-and-Avoid) durch Systeme am Boden oder an Bord der UAS. Eine hohe Verkehrsdichte von UAS in einem mit anderen Nutzern geteilten Luftraum erfordert zudem eine koordinierende Instanz. Perspektivisch dient in Europa der U-Space als Infrastruktur für die digitale Verkehrsüberwa-

chung und -leitung, nicht zuletzt, um den autonomen Betrieb von UAS sicher in den bestehenden Luftverkehr zu integrieren (Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, 2025).

Punktuell bereits etablierte Anwendungsfälle lassen sich nach ihrer Einsatzumgebung und Wertschöpfungstiefe klassifizieren.

- Die Hochwert-Logistik umfasst Kurier-Dienstleistungen per Drohne im öffentlichen Raum, wie beispielsweise der zeitkritische Transport von Ersatz- und Bauteilen, Dokumenten, Laborproben oder Notfallmedikamenten. Aufgrund des wahrgenommenen gesellschaftlichen Nutzens erhalten vor allem medizinische Drohnenlieferungen den höchsten Zuspruch in der deutschen Bevölkerung (Kellermann et al., 2023).
- Die Intralogistik umfasst automatisierte Werksverkehre auf nicht-öffentlichem oder kontrolliertem Grund. Drohnen entkoppeln dabei den Materialfluss vom Bodenverkehr und sollen Effizienzgewinne oder größere Resilienz in der Just-in-Time-Versorgung realisieren.
- Die Letzte-Meile-Logistik umfasst Transportstrukturen für eine automatisierte Belieferung an variable Endkundenadressen. Lieferdrohnen könnten hier zu Effizienzsteigerungen, beispielsweise im E-Commerce oder bei Lebensmittellieferdiensten führen und zur Entwicklung neuer Geschäftsmodelle beitragen. National erprobt wurde unter anderem der Einsatz der Technologie zur Sicherung der Daseinsvorsorge in strukturschwachen Regionen, wo stationärer Handel zurückgeht und traditionelle Lieferdienste nicht wirtschaftlich agieren können (Biehle & Kellermann, 2023; Federmann, 2024).

Zentrale Akteure für das Deutsche AAM-Ökosystem sind Hardware-Hersteller (OEMs) und Zulieferer, die Flugplattformen und Komponenten fertigen, sowie Technologie- und Softwareanbieter für Flugsteuerung und Autonomie. Die operative Leistung erbringen Betreiber, darunter Logistikdienstleister oder spezialisierte Drone-as-a-Service Unternehmen. Privatwirtschaftlich orientierte U-Space Service Provider (USSP) treten an, um den Flugverkehr im unteren Luftraum zu koordinieren. Rechtlich-administrativ ist die European Aviation Safety Agency (EASA) von der Europäischen Kommission mit der Definition von Gesetzen und Standards zur Entwicklung eines AAM-Leitmarktes beauftragt. In Deutschland setzt das Luftfahrtbundesamt (LBA) diese Vorgaben mit Mandat des zuständigen Ministeriums um und hat, gemeinsam mit den Landesluftfahrtbehörden, die Prüfverantwortung. Zunehmend relevant für die vorgestellten Anwendungsfälle sind kommunale Akteure als strategische Planer und gesellschaftliche Vermitt-

ler einer lokalen Luftraumnutzung (vgl. Biehle, 2025).

Methodisch basiert dieses Technologiedossier auf einer Kombination aus systematischer Literaturliteraturauswertung (Scoping-Review) und qualitativen Experteneinschätzungen. Aufbauend auf einem ganzheitlichen transdisziplinären Ansatz wurden fünf zentrale Dimensionen der sozial-ökologischen Transformation hin zu einer klimaneutralen Mobilität konzeptionell abgegrenzt: Klimaschutzbeitrag, Standortrelevanz, Reifegrad, gesellschaftliche Akzeptanz und regulatorische Rahmenbedingungen.

Im Rahmen des Scopings wurden wissenschaftliche Publikationen und weitere relevante Quellen mit Bezug zu Deutschland identifiziert, gescreent und entlang ausgewertet. Die Scoping-Analyse der Forschungsliteratur mit direktem Bezug zu Deutschland ergab 201 Einträge, von denen 41 nach einer Begutachtung von Titel und Abstract als relevant befunden wurden. Davon waren 37 vollständig. Diese zeigen bereits einige besonders aktive Institutionen, allen voran

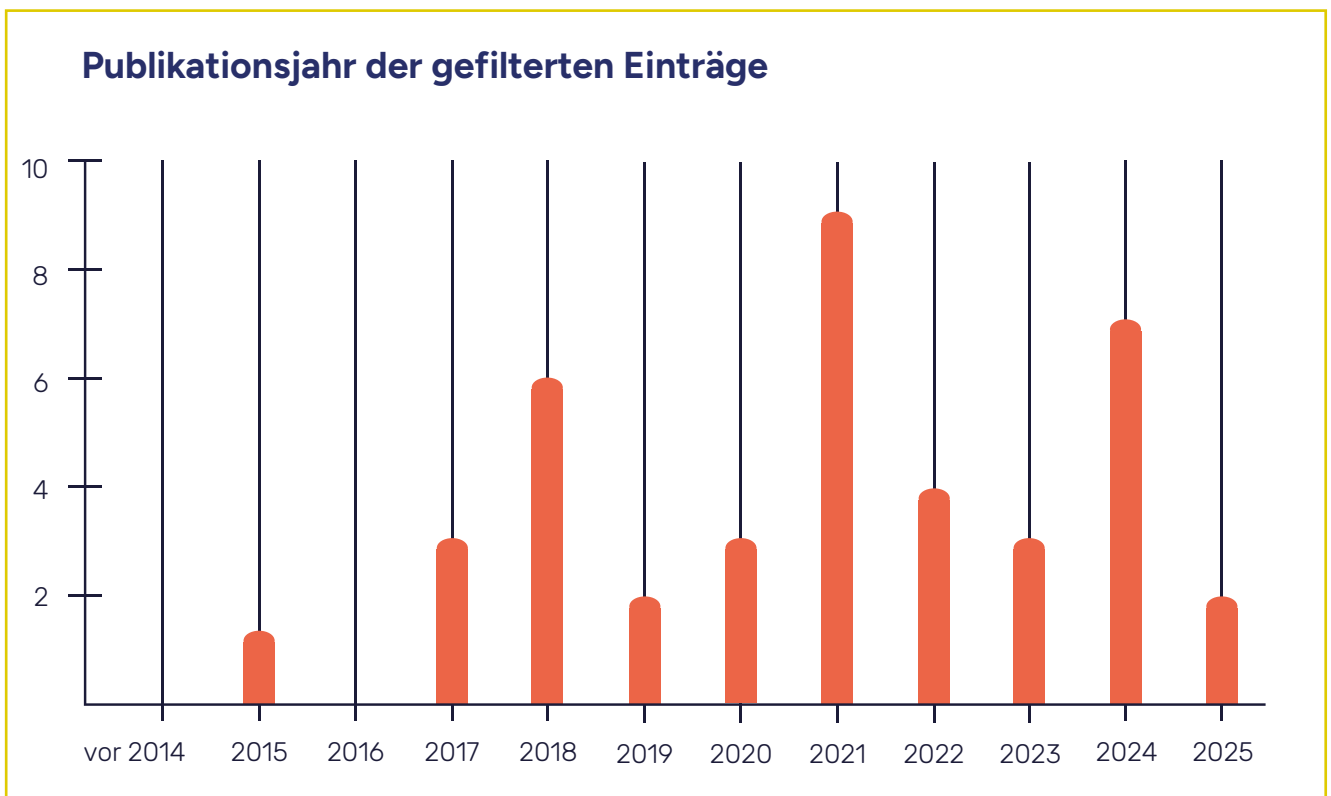


Abbildung 1: Säulendiagramm zu den Erscheinungsjahren der Publikationen aus dem Scoping

das Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), auf, welche neben den technischen Universitäten und Hochschulen in Berlin, München und Aachen, den größten Publikationsoutput mit Deutschlandbezug habe. Allerdings können mögliche Lücken im Datensatz oder zwischenzeitliche Veränderungen in den angegebenen institutionel-

len Zugehörigkeiten der Autorinnen und Autoren nicht ausgeschlossen werden. Die Zuordnung der identifizierten Artikel erfolgt reproduzierbar durch einr der fünf sozial-ökologischen Analysedimensionen statt. So wird ein erster Überblick über die sozial-ökologischen Forschungsschwerpunkte geschaffen.

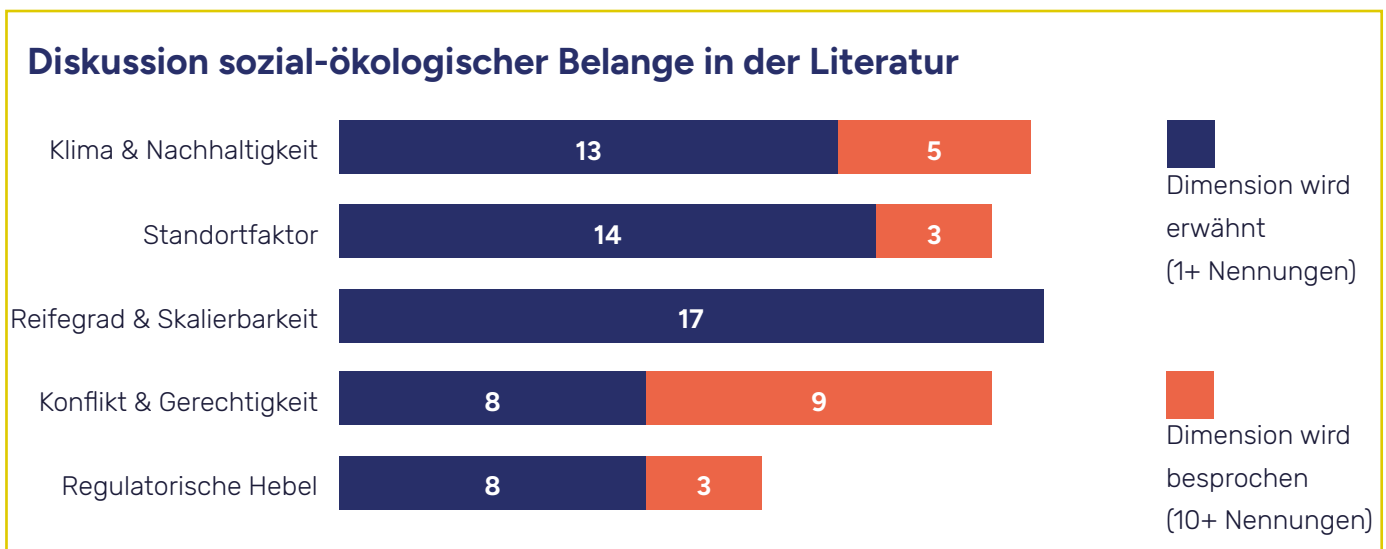


Abbildung 2: Säulendiagramm zum Vorkommen der sozial-ökologischen Dimensionen in den Scoping-Ergebnissen

Die erste Übersicht der Scoping-Ergebnisse deutet bereits an, dass vor allem die Konflikt- und Gerechtigkeitsdimension sowie regulatorische Angelegenheiten in der deutschen Forschung eine herausragende Rolle spielen, während der Standortfaktor und der technologische Reifegrad in Bezug auf Deutschland weniger explizit beforscht werden.

Ergänzend wurden Expertinnen und Experten aus Forschung, Industrie und Verbänden konsultiert. Deren Einschätzungen dienten insbesondere der Validierung, Kontextualisierung und punktuellen Ergänzung der aus der Literatur gewonnenen Ergebnisse. Im Fall dieses Dossiers wurde eine Arbeitsversion unter anderem vom Markt-

forschungsinstitut Drone Industry Insights UG sowie dem Industrieverband für unbemannte Luftfahrt UAV DACH e.V. kommentiert. Die Rückmeldungen sind in die Überarbeitung des Dossiers eingeflossen, insbesondere in die Einordnung von Markt- und Technologieentwicklungen sowie die Bewertung von Reifegrad und Skalierungsperspektiven. Aufbauend auf dieser Übersicht zum aktuellen Stand der transdisziplinären Forschung zur urbanen und ruralen Drohnenlogistik entwickelt das vorliegende Dossier konkrete Hebel, um die deutsche AAM-Wirtschaft nachhaltig zu stärken. Diese basieren auf der Notwendigkeit, technologische Entwicklung mit sozialer Akzeptabilität und administrativer Handlungsfähigkeit zielgerichtet zu verknüpfen.

# Möglicher Klimaschutzbeitrag

# 02

Auf konzeptioneller Ebene ist das ökologische Potenzial von Lieferdrohnen stark durch ihr Substitutionspotenzial emissionsintensiverer Verkehrsträger bestimmt. Literaturstudien zeigen, dass energetische Vorteile gegenüber bodengebundener Logistik primär bei geringer Stoppdichte und langen Distanzen bestehen, da die Drohne idealerweise eine direkte Luftlinie nutzt. Entsprechende Substitutionseffekte können daher tendenziell eher in der Hochwert-Logistik als auch bei der Intralogistik auftreten, wenn konventionelle, bodengebundene Verkehrsträger abgelöst werden (Raghunatha et al., 2023). Für den Anwendungsfall der Letzte-Meile-Logistik quantifizieren aktuelle Studien, unter welchen räumlichen Bedingungen dieser Effekt wahrscheinlicher eintritt. So bleibt in hochverdichteten Räumen (> 4.000 Einwohner/km<sup>2</sup>) der klassische Zustellwagen aufgrund der hohen Stoppdichte und Bündelungseffekte ökologisch überlegen. In semi-urbanen und ländlichen Räumen (500 bis 2.000 Einwohner/km<sup>2</sup>) ist ein ökologischer Vorteil von Drohnen in der Letzte-Meile-Logistik wahrscheinlich, wenn ineffiziente, lange Anfahrtswege für Einzelzustellungen entfallen (Aurambout et al., 2019; Kumar et al., 2025).

Demgegenüber steht das Risiko von Rebound-Effekten. Die Akzeptanzforschung identifiziert „Zeitersparnis“ und eine „Bestimmbarkeit des Lieferzeitpunktes“ als zentrale Kundenmehrwerte (Kellermann et al., 2023). Die Etablierung entsprechender Services in der Letzte-Meile-Logistik birgt die Gefahr, dass die Technologie eine Veränderung des Konsumverhaltens bewirkt und zusätzliche Nachfrage für spontane Kleinstlieferungen

induziert (Applin, 2016). Wenn gebündelte Einkaufsfahrten durch eine Vielzahl einzelner Drohnenflüge ersetzt werden, belastet dies den Klimaschutzbeitrag der Technologie und des Verkehrssektors insgesamt.

Eine valide Nachhaltigkeitsbewertung erfordert jedoch nicht nur die Betrachtung des Flugbetriebes, sondern des gesamten Lebenszyklus (LCA). Die Analyse realer Daten zeigen, dass die Herstellung der Drohnenkomponenten signifikant zur Umweltbelastung beiträgt, während der operative Betrieb über den Nutzungshorizont oft den geringeren Anteil ausmacht. Ein kritischer Faktor ist hier die Batteriealterung, da Akkus von Transportdrohnen aufgrund der hohen Entladeströme häufig ersetzt werden müssen. Ohne eine etablierte Kreislaufwirtschaft und Recycling-Infrastruktur belastet die Entsorgung von Lithium-Ionen-Akkus den Klimaschutzbeitrag der Drohnenlogistik erheblich (Koiwanit, 2018). Trotz dieser wissenschaftlich klar herausgestellten Zusammenhänge kritisieren aktuelle Metastudien, dass die Vergleichbarkeit von realdatenbasierten LCA-Studien in der Drohnenlogistik kaum gegeben ist. Einheitliche Methodenstandards bei der Ökobilanzierung fehlen (Aster et al., 2025).

Umweltbezogene Kollateral-Effekte von Lieferdrohnen umfassen insbesondere den Schutz vor Immissionen. Im positiven Sinne tragen Drohnen lokal zur Reduktion von Schadstoffen bei. Im Vergleich zur Verbrenner-Logistik im urbanen Raum zeigen Daten, dass pro 1.000 Lieferungen ca. 0,42 kg Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und 0,15 kg Feinstaub (PM<sub>2.5</sub>) vermieden werden können (Kumar et al., 2025). Demgegenüber hat die empirische Sozialforschung die Besorgnis vor Lärmimmissionen als den stärksten negativen Einflussfaktor auf die Ak-

zeptanz in der deutschen Gesellschaft herausgestellt. Zudem wird die permanente Sichtbarkeit von Drohnenverkehr im unteren Luftraum als Störung bewertet, welche die Aufenthaltsqualität im öffentlichen Raum mindert (vgl. Kellermann et al., 2023). Interessanterweise suggeriert die Auswertung einer aktuellen Metastudie ein regulatorisches Paradoxon in Märkten mit hohen Umweltstandards. Gemäß der Autoren wirken strenge Lärmschutzaufgaben bislang nicht als Innovationsbremse, sondern führten dazu, dass Unternehmen ihre Flugpfade und Drohnen-Designs so optimierten, dass die Lärmbelastung um 30 % sank und die betriebliche Effizienz zugleich um 25 % stieg (Kumar et al., 2025).

Die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber AAM korreliert nachweislich mit dessen wahrgenommenem ökologischen Mehrwert. Je stärker Menschen in Deutschland von den energetischen und ökologischen Vorteilen von Lieferdrohnen gegenüber dem bodengebundenen Verkehr überzeugt sind, desto besser entwickelt sich die Einstellung gegenüber der Technologie (Kellermann et al., 2023; Schmidt & Saraceni, 2024). Nach Jahren einer anfänglichen Technik-euphorie, in denen die ökologischen Mehrwerte von Lieferdrohnen und Flugtaxi ohne ausreichende Evidenz postuliert wurden (vgl. Kellermann et al., 2020), hat die sozial-ökologische Forschung inzwischen zu einer evidenzbasierten und damit vertrauenswürdigeren Debatte in Deutschland beigetragen (Biehle, 2022; Kirschstein, 2020, Straubinger et al., 2022).



Projektteam Stadt-Land-Drohne, © Gemeinde Wusterhausen/Dosse, Droney Inh. Sven Jürß, Luftlabor GbR. Dr. Kellermann und Biehle

# Wirtschaftliche Relevanz

## 03

Bei konsequenter Marktentwicklung erwartet das BMV, dass sich das nationale Marktvolumen für AAM – inklusive des Flugtaxi-Segments – zwischen 2024 und 2030 verdoppeln wird: von 955 Millionen Euro auf über 1,7 Milliarden Euro Umsatz jährlich (Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, 2025). Die starke Wachstumsprognose baut maßgeblich auf der europäischen und nationalen Forschungsförderung, dem traditionell starken Luftfahrtcluster in Deutschland (Aurambout et al., 2019) und dem bisherigen Engagement einiger Vorreiterkommunen und -regionen (u. a. Hamburg, Berlin, Aachen, Ingolstadt, Nordhessen), die durch Clusterentwicklung und Modellprojekte als Inkubatoren für die nationale AAM-Industrie agieren (vgl. Fraske et al., 2024).

Hinsichtlich der OEMs im Liefersegment handelt es sich bei den meisten Unternehmen aus Deutschland um vergleichsweise junge Akteure. Die globale Dominanz bei der Herstellung von Flugplattform-Komponenten liegt jedoch seit längerem bei asiatischen und teilweise US-amerikanischen Akteuren. Studien prognostizieren eine anhaltende Importabhängigkeit insbesondere von Prozessoren, elektrischen Antrieben sowie Energiespeichersystemen (Fraunhofer ISI, 2025). Es gilt kritisch zu prüfen, inwiefern die deutsche Zulieferer- und Fertigungsindustrie diesen Vorsprung im Segment kleinerer Drohnen (<25 kg) oder einzelner Bauteile (z. B. Sensoren) kurzfristig aufholen kann. In der Hoffnung auf ein baldiges Kriegsende könnte beispielsweise die Stärkung wirtschaftlicher Kooperationen mit der ukrainischen Drohnenindustrie ein Baustein werden, um die strategische Abhängigkeit von Bauteilen aufzufangen. National können mögliche Synergien zwischen der militärischen und der zivil ausgerichteten Forschung und Entwicklung von Bauteilen untersucht werden.

Mit Blick auf das Gesamtökosystem liegt ein exportfähiges Wertschöpfungspotenzial in der systemischen Integration von Hardware-, Software- und Infrastrukturkomponenten (U-Space als ermöglichende Verkehrsinfrastruktur für den bodennahen Luftraum) zu einem sicheren, skalierbaren und umweltfreundlichen AAM-Ökosystem (Fraske et al., 2024; Verband Unbemannte Luftfahrt (VUL), 2023). In diesem liegt das größte Downstream-Potenzial wenig überraschend in der Anwendungsebene. Es wird prognostiziert, dass der Betrieb automatisierter Drohnen in groß angelegten Logistiknetzwerken, bereitgestellt durch Drone-as-a-Service-Unternehmen, die größte Wertschöpfung erzielen kann (Filiopoulou et al., 2025). Aus Betreibersicht liegen die Herausforderungen aktuell in der Senkung der Kosten für die Fernüberwachung sowie in der Gewährleistung einer hohen Servicezuverlässigkeit bei gleichzeitiger Bewältigung kundenspezifischer Logistikanforderungen, um die passgenaue Integration von Drohnenlogistik in bestehende Wertschöpfungsketten zu gewährleisten (Alwateer & Loke, 2020; Meincke, 2022).

Global betrachtet ist eine Ausdifferenzierung des Betreibermarktes erkennbar. Einige etablierte Logistikunternehmen und E-Commerce-Konzerne haben ihre eigenen Drohnenlieferprogramme. Dazu zählen auch Ansätze, bei denen der Einsatz von Drohnen mit Lieferfahrzeugen kombiniert wird, um den Lieferprozess auf der letzten Meile zu optimieren (Lyons & McDonald, 2023). Die meisten Drone-as-a-Service-Unternehmen streben hingegen strategische Kooperationen mit etablierten Marktteilnehmern im Einzelhandel, in der Paketlogistik oder im öffentlichen Gesundheitswesen an. Insbesondere die Vernetzung von Laboren und Kliniken (z. B. für Eilproben) kann perspektivisch durch Zentralisierungseffekte von Standorten signifikante Kosteneinsparungen ermöglichen (Karpstein et al., 2024; Röper et al., 2023). In einem Interview at-

testiert ein Experte des Marktforschungsinstitutes *Drones Industry Insights* den großen deutschen Marktakteuren eine gewisse Risikoaversität. Hiesige Logistikkonzerne, Luftfahrtunternehmen oder Einzelhandelsketten hätten mindestens abwartende Haltung gegenüber der Einbindung und Nutzung von Lieferdrohnen.

Das Beschäftigungsvolumen im deutschen AAM-Sektor wurde 2023 auf 15.200 Erwerbstätige beziffert. Strukturell dominiert der Dienstleistungssektor (ca. 76 %), insbesondere in den Bereichen Inspektion kritischer Infrastrukturen, Vermessung und spezialisierter Logistik. Eine Schlüsselqualifikation für OEMs und Drone-as-a-Service-Anbieter stellt aktuell die Expertise für bzw. Beratung bei Zulassungs- und Genehmigungsverfahren dar, da die Einhaltung von Regularien eine Markteintrittsbarriere darstellt. Mit der Skalierung logistischer Anwendungen wächst zudem der Bedarf an Betriebspersonal, wie anwendungserprobten Fernpiloten (EASA A2/STS) und spezialisierten Wartungstechnikern (Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, 2025). Rund 21 % der Beschäftigten in der Drohnenwirtschaft arbeiten im Marktsegment Hardware. Nur 3 % der Beschäftigten sind im Marktsegment Software tätig, d. h. sie entwickeln

und implementieren Softwarelösungen für u. a. Flugsteuerung, Flugplanung, Datenauswertung und Training (VUL, 2023).

In der Systementwicklung besteht ein Bedarf an spezialisierten Ingenieuren (Luft- und Raumfahrt, Robotik, Informatik). Die Rekrutierung erfolgt primär aus traditionell männerdominierten Disziplinen. Der Frauenanteil in der technischen F&E liegt bundesweit bei nur ca. 18 % (Destatis, 2024), eine Unterrepräsentanz, die sich in der Drohnenwirtschaft widerspiegelt. Gezielte Maßnahmen zur Förderung von Frauen in der AAM-Branche scheinen angemessen, um die absehbaren Auswirkungen des Fachkräftemangels für die Branche abzuschwächen. In der Hoffnung auf eine Beendigung des Krieges in der Ukraine könnte auch die Anwerbung von Fachkräften für die Deutsche AAM-Industrie einen strategischen Baustein darstellen. Abschließend weisen Forschende darauf hin, dass zahlreiche Wertschöpfungsbereiche, beispielsweise die Fernüberwachung von Drohnen, gleichwertig von Menschen mit (hier: physischer) Beeinträchtigung besetzt werden können. Durch die Förderung KI-gestützter Sprach- und Gestensteuerung kann dieses Inklusionspotenzial gezielt gefördert werden (Lindgren & Ljungblad, 2024).



Projektteam Stadt-Land-Drohne, © Gemeinde Wusterhausen/Dosse, Dronegy Inh. Sven Jürß, Luftlabor GbR. Dr. Kellermann und Biehle

# Reifegrad und Skalierbarkeit

# 04

Moderne UAS für die Drohnenlogistik erreichen heute bereits einen TRL von 8 bis 9. Nach Einschätzung des Marktforschungsinstituts *Drone Industry Insights* lässt sich dies nicht zuletzt anhand der rasant wachsenden Flugleistungsnachweise von Unternehmen wie Zipline International Inc. in den USA, Manna Drones Ltd. in Irland oder Morphheus Logistik GmbH in Deutschland bestätigen. Unabhängig davon wird die AAM-Industrie stark von Fortschritten in der Batterietechnologie profitieren, da aktuelle Lithium-Ionen-Zellen mit ihrer begrenzten Energiedichte die Reichweite, Nutzlast und entsprechend auch die Anwendungsmöglichkeiten der Technologie limitieren (vgl. Sripad & Viswanathan, 2021). Parallel dazu wird die Antriebsarchitektur von UAS kontinuierlich weiterentwickelt, um sie auf die Anforderungen urbaner Räume anzupassen. Insbesondere das Zusammenwirken von Rotordesign und Abschirmung beeinflusst direkt den Energieverbrauch, die Windanfälligkeit und die aeroakustische Signatur (Bertram, 2022).

Experteneinschätzungen des *Industrieverbands für unbemannte Luftfahrt UAV Dach e.V.* stellen in einem Interview jedoch in Frage, inwiefern dieses TRL für OEMs und Drohnenbetreiber im deutschen Marktsegment allgemein anzunehmen ist. Der Reifegrad des operativen Gesamtsystems ist noch nicht hinreichend, um die etablierten Standards des Logistikmanagements in allen Anwendungsszenarien vollständig zu erfüllen (Fehling & Saraceni, 2023; Jazairy et al., 2024). Berücksichtigt man die Prozessintegration für die urbane Logistik, insbesondere auch die Vorrichtungen zum automatisierten Pakethandling und die personalintensiven Anforderungen an die Fernüberwachung bzw. an das Luftraummanagement, dann liegt das TRL gegenwärtig bei 6 bis 7. Dies entspricht dem Status der Demonstration in einer relevanten bis operationalen Umgebung (Pilotprojekte und Reallabore), ohne jedoch die volle kommerzielle Skalierbarkeit

unter Marktbedingungen erreicht zu haben. Eine Förderung von Reallaboren und rechtlichen Sandkästen auf Bundes- und Landesebene zur Erhöhung der TRL der Gesamtsysteme bzw. um diese in wirtschaftlichen Erfolg umzusetzen, erscheint zum aktuellen Zeitpunkt daher äußerst sinnvoll.

Die Skalierung von Geschäftsmodellen hängt stark vom Übergang von der Fernüberwachung durch einen Fernpiloten zum autonomen Flugbetrieb ab. Solange ein 1:1-Verhältnis zwischen Operator und UAS besteht, ist wirtschaftliche Effizienz, abseits der Hochwert-Logistik, schwer zu erreichen (Aurambout et al., 2019; Biehle & Kellermann, 2023). Höhere Automatisierungsgrade erfordern eine kontinuierliche Förderung der Forschung und Entwicklung von Schlüsseltechnologien zur automatisierten Navigation und Konfliktlösung im Luftraum (vgl. Becker & Schalk, 2024). Des Weiteren muss die Genehmigungspraxis der Luftfahrtbehörden mit den technologischen Möglichkeiten und wirtschaftlichen Notwendigkeiten der Betreiber Schritt halten, um die Markteinführung zu beschleunigen.

Ein weiteres Hemmnis für die Skalierung, insbesondere in der Letzte-Meile-Logistik, ist das Fehlen standardisierter Schnittstellen im Warenhandling. Derzeit dominieren proprietäre Lösungen, bei denen Landepads und Lademechanismen herstellerspezifisch sind. Dies verhindert die Entstehung interoperabler Logistiknetzwerke. Initiativen wie das vom Land Berlin geförderte *U-Space Reallabor*<sup>1</sup>, die einen typenoffenen UAS-Hub erproben, sind erste Schritte auf dem Weg, geteilte bzw. perspektivisch öffentliche Infrastrukturen zu etablieren. Pilotprojekte mit vollautomatisierten Unmanned Cargo Aircrafts sowie die Segmented Standard Taxi Routes für die Integration von bemannten und unbemannten Luftfahrzeugen verdeutlichen, dass standardisierte Bodenprozesse eine Voraussetzung für interoperable Logistiknetzwerke und die Nutzung auf größerer Skala darstellen (Finle & Okuniek, 2018; Meincke, 2022).

1. [www.u-space.berlin](http://www.u-space.berlin)

# Akzeptanz und Konfliktpotenzial

# 05

Die Datenlage zur gesellschaftlichen Einstellung gegenüber luftrechtlichen Regelungen und konkreten Anwendungsszenarien von Lieferdrohnen in Deutschland kann als gut bewertet werden. Übergeordnet zeigen Befragungen des Verbandes Unbemannte Luftfahrt (VUL, 2023), des Deutschen Instituts für Luft- und Raumfahrt (Stolz et al., 2024), oder des vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt geförderten Forschungsprojektes Sky Limits (2020), dass die meisten Deutschen dem zivilen Einsatz von Drohnen mit gemischten Gefühlen, das heißt sowohl positiv als auch negativ, gegenüberstehen. Über die vergangenen fünf Jahre betrachtet, ist der Trend jedoch positiv. Die größte Befürwortung eines Drohneneinsatzes im Anwendungsbereich Transport erhält die Beförderung zeitkritischer medizinischer Güter wie Medikamente, Laborproben oder Blutkonserven. Ebenfalls wird der Einsatz von Drohnen zum Transport von Waren und Gütern im ländlichen Raum befürwortet. Der Einsatz von Drohnen zum Transport von Waren und Gütern im städtischen Raum findet jedoch keine Mehrheit.

Die weitere Studienlage zeigt auf, dass die öffentliche Einstellung gegenüber AAM ein mehrdimensionales Konzept ist. Für Bürgerinnen und Bürger wird die Einstellung sowohl durch konsumentenorientierte (Nutzen, Lebensqualität) als auch durch gesellschaftliche Aspekte (Umweltverträglichkeit, Sicherheit) geprägt. Das auf Grundlage einer vorhergegangenen bevölkerungsrepräsentativen Umfrage entwickelte Einstellungsmodell von Kellermann et al. (2023) unterstreicht dabei, dass wahrgenommene Risiken einen stärkeren negativen Einfluss auf die Einstellung haben als wahrgenommene Vorteile einen positiven (vgl. auch in Eißfeldt et al., 2020). Besorgnis besteht vor Verkehrsfolgen wie Lärm, Unfällen durch Defekt oder Sabotage, und sinkender Aufenthaltsqualität. Posi-

tiver werden Lieferdrohnen bewertet, je wichtiger die Befragten schnellere Lieferzeiten, flexible Liefertermine und -orte sowie einen zuverlässigen Service bewerten (Kellermann et al., 2023).

Die Einstellung korreliert dabei mit dem Einsatzgebiet. Eher bejaht wird der Einsatz von UAS über landwirtschaftlichen Flächen und Industriegebieten, teilweise in Gewerbegebieten und im Umfeld von Krankenhäusern, weniger im Umfeld von beispielsweise Kultur- und Sportstätten, im Wohnumfeld oder in Erholungsgebieten. Ebenfalls maßgebend ist der gesellschaftliche Nutzen des Einsatzzwecks. Während Logistikanwendungen im medizinischen Bereich oder Rettungswesen auf hohe Zustimmung stoßen, werden rein kommerzielle oder private Anwendungen öfter abgelehnt (Janotta et al., 2021; Schmidt & Saraceni, 2024; Weidinger et al., 2018).

Besonders im urbanen Raum steht die Nutzung des bodennahen Luftraums im Zusammenhang mit Gerechtigkeitsfragen. AAM sollte als „öffentliche“ Technologie verstanden werden, die eine gemeinsame Ressource beansprucht (Clothier et al., 2015; Kolliarakis, 2015). Konflikte entstehen, wenn privates Handeln Kosten verursacht, die auf die Allgemeinheit externalisiert werden. Ein Beispiel ist die Letzte-Meile-Logistik im urbanen Raum, wenn der Nutzen (Zeitgewinn, Komfort) beim bestellenden Kunden liegt, während die Nachteile (Lärmemissionen, Sicherheitsrisiken) Anwohnende entlang von Flugrouten betreffen (Biehle, 2025). Durch die dünnere Siedlungsdichte haben Fragen zur Verteilungsgerechtigkeit im ländlichen Raum eine geringere Relevanz. Jedoch rücken verstärkt Fragen nach einem gerechten Zugang bzw. einer breiten Verfügbarkeit der betreffenden Lieferservices in den Fokus, um gleichwertige Lebensverhältnisse in Regionen zu gewährleisten, in denen Drohnenlogistik auf der letzten Meile angeboten wird (Biehle & Kellermann, 2023).

In Zusammenhang einer gesellschaftspolitisch gerechten Erschließung des bodennahen Luftraums und der Ausgestaltung von AAM-Services besteht aktuell eine erhebliche Unsicherheit bezüglich der Erwartungen und Bedenken lokalpolitischer Gremien, Bürgern, Unternehmen und zivilgesellschaftlichen Organisationen. Die transdisziplinäre Forschung unterstreicht hier die Bedeutung partizipativer Maßnahmen, um politische Entscheidungsträger sowie Planer zu informieren und öffentliche Perspektiven in die AAM-Governance zu integrieren. Beispiele für bürgerschaftlichen Widerstand gegen die Letzte-Meile-Logistik in der australischen Hauptstadt Canberra unterstützen die Annahme, dass Konflikte beim Einsatz von Lieferdrohnen auf eine unzureichende Repräsentation der Interessen relevanter Akteursgruppen zurückzuführen sind (Zenz & Powles, 2024).

Partizipative Planungsformate könnten daher als Instrument dienen, um gesellschaftspolitische Blockaden abzumildern und so die Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Marktentwicklung zu verbessern. Wie eine aktuelle Technikfolgenabschätzung zu Drohnen im Verkehrswesen nahelegt, sollten sich solche Prozesse an der Leitfrage orientieren, „wie die Nutzung des Luftraums [...] die Entwicklung nachhaltiger Stadtgemeinschaften zum Wohle der Allgemeinheit unterstützen kann“ (Sky Limits, 2021). Um Entscheidungsträger zu informieren und Bürgerperspektiven in die AAM-Planung zu integrieren, sollten partizipative Leitbildprozesse in Betracht gezogen werden, wie sie bereits Teil der Stadtplanungspraxis sind (Van Der Meji et al., 2023). Im Kontext repräsentativ-demokratischer Entscheidungsfindung sind Beteiligungsformate mit zufällig ausgewählten Bürgern und Bürgerinnen (sog. „Mini-Publics“) geeignet, um eine informierte Basis für Politik und Praxis zu schaffen (Dienel, 1997, 2002). Mit Blick auf die Genehmigungsplanung für ein ländliches Drohnenliefernetzwerk haben sich informelle Planungsworkshops mit Anwohnenden als effektiv erwiesen, um beispielsweise Flugkorridore, Flugverbotszonen

und Lande-Infrastruktur abzustimmen (Biehle & Kellermann, 2023).

Eine bislang noch wenig untersuchte Konfliktdimension der transdisziplinären Forschung ist das Informations- und Transparenzdefizit in der Nutzung von (Transport-) Drohnen, da vom Boden nicht erkennbar ist, ob diese einen legitimen Zweck (z. B. Rettungseinsatz) verfolgen, und ob sie privat/kommerziell/verdeckt operiert. In Workshops mit Vertretern der Freien und Hansestadt Hamburg wurde hier die Bereitstellung eines öffentlich einsehbaren Flugradars vorgeschlagen, um die Transparenz bezüglich der Luft-raumnutzung zu erhöhen, was potenziell auch lokale Strafverfolgungsbehörden durch die Reduzierung von Falschmeldungen entlasten könnte (Biehle, 2025). Der *Industrieverband für unbemannte Luftfahrt UAV DACH e.V.* fordert in einer Stellungnahme zu diesem Dossier die Schaffung der dafür notwendigen technischen und rechtlichen Grundlagen. Notwendig seien einheitliche Standards für die Anwendung von ADS-L (Automatic Dependent Surveillance – Light) zur automatischen Aussendung von Flugzeugdaten (Position, Höhe, Identität), für die Identifikation der Drohne und des Betreibers über Funk- und Datennetz (RemotelD und NetworkID), sowie für die Nutzung von ELT (Emergency Locator Transmitter), dass bei Absturz oder Aufprall ein Notsignal aussendet, um Such- und Rettungskräfte zur Unfallstelle zu leiten.



Projektteam Stadt-Land-Drohne, © Gemeinde Wusterhausen/Dosse, Dronegy Inh. Sven Jürß, Luftlabor GbR. Dr. Kellermann und Biehle

# Regulatorische Hebel und Steuerungsbedarfe **06**

Eine Analyse der aktuellen Governance-Strukturen von AAM und U-Space zeigt eine funktionale Lücke zwischen der hoheitlichen Regulierung des Luftraums (Europäische Kommission/Bund) und den lokalen Auswirkungen des Drohnenbetriebs. Um diese zu schließen, wird eine Stärkung lokaler Planungsinstrumente für den bodennahen Luftraum vorgeschlagen. Beispielsweise sollten Gemeinden und Kreise die hoheitlich durch § 21h LuftVO vorgegebenen Flugbeschränkungsgebiete nicht nur passiv verwalten, sondern auch die Möglichkeit besitzen, diese an den lokalen Kontext anzupassen. Lokale Restriktionen oder Vorranggebiete für spezifische Nutzungen müssten dann verbindlich in das digitale Verkehrsmanagementsystem für den jeweiligen Luftraum eingespeist werden (Biehle, 2025; Hohmann et al. 2024). Aus rechtswissenschaftlicher Sicht ist relevant, ob es sich dabei um Vorschläge der lokalen Ebene handelt, die durch die zuständige Stelle auf Bundesebene geprüft werden, oder um eine hoheitliche Befugnis der lokalen Ebene im Sinne der kommunalen Selbstverwaltung.

Zudem könnte durch Methoden der transdisziplinären Forschung geprüft werden, inwieweit neben den in § 21h LuftVO geschützten Belangen, auch soziale Verträglichkeitskriterien in Genehmigungs-

verfahren für den UAS-Betrieb integriert werden könnten und sollten. Eine entsprechende Regulierung könnte beeinflussen, in welchem Maße Geschäftsmodelle mit geringem gesellschaftlichem Nutzen aber hohem Störpotenzial (z. B. reine Convenience-Lieferungen in Wohngebieten) in den Markt drängen und die öffentliche Stimmung gegenüber AAM negativ prägen. Nicht zuletzt entstehen dadurch regulatorisch getriebene Anreize für Hersteller und Betreiber, beispielsweise in lärmarme Technologien oder gemeinwohlorientierte Geschäftsmodelle zu investieren, um Zugang zu bodennahen Lufträumen zu erhalten.

Marktliberale Positionen, wie sie beispielsweise der *Interessenverband UAV Dach* vertritt, stehen konträr zu solchen zusätzlichen Regulierungen. Befürchtet wird nicht zuletzt eine Fragmentierung des Luftraums und eine Überregulierung des Marktes. Durch sozial und ökologisch gerechte Regelungen sinkt für Betreiber jedoch das Investitionsrisiko, nachträglich durch Klagen oder lokale Proteste gestoppt zu werden (Zenz & Powles, 2024). Durch ein funktionierendes Governance-Modell für den bodennahen Luftraum könnte Deutschland so zum Referenzmarkt für integrierte Drohnenlogistik werden, der demonstriert, wie Marktentwicklung und die Berücksichtigung lokaler Interessen und Belange rechtlich und technisch harmonisiert werden (vgl. Biehle, 2025).

# Empfehlungen zur Forschungsagenda

# 07

Die Entwicklung von Advanced Air Mobility (AAM) tritt in eine entscheidende Phase: nationale Marktprognosen gehen von einer Verdopplung des Umsatzes bis 2030 aus und ein großer Teil dieser Wertschöpfung soll im Anwendersegment stattfinden.

Im Hinblick auf die zunehmende Integration von Transportdrohnen in den öffentlichen Raum unterstreicht die transdisziplinäre Forschung die Notwendigkeit, technologische Exzellenz mit sozialer Akzeptanz und administrativer Handlungsfähigkeit zu verknüpfen.

## Transdisziplinäre Forschung zur Vermarktung klimaneutraler Technologien

### Strategische Marktpositionierung durch gemeinwohlorientierte Anwendungen

Basierend auf den Ergebnissen des Dossiers liegt ein zentraler Hebel zur Verbesserung nationaler Vermarktungschancen von AAM im (förderpolitischen) Fokus auf Anwendungen mit einem wahrgenommenen gesellschaftlichen Nutzen. Die Forschung hat ergeben, dass Anwendungen von Lieferdrohnen für medizinische, Rettungs- oder ländliche Versorgungszwecke sowie über industriellen oder gewerblichen Gebieten die breiteste gesellschaftliche Zustimmung erhalten. Diese Anwendungsfälle wirken, soweit transparent umgesetzt, vertrauensbildend für die Technologie als auch die Governance im Bereich Drohnenlogistik. Als Katalysatoren einer öffentlichen Debatte können diese Anwendungen einen Ausgangspunkt für die weitere Marktentwicklung sein, beispielsweise für die Letzte-Meile-Logistik im urbanen Raum.

Vorgeschlagen wird weiterhin, einen förderpolitischen Fokus auf die Minderung der gesellschaftlichen Risikowahrnehmung bzw. den Vertrauensaufbau zu legen. Im Kontext der aktuellen Entwicklungen stellt die Umsetzung von Reallaboren einen methodisch lohnenswerten Ansatz der transdisziplinären Forschung dar, um diese Ziele zu unterstützen. Eine Begleitforschung dieser Aktionen ist empfehlenswert, soweit sie einen Fokus auf die Ko-Kreation von Anwendungsfällen und eine transparente Kommunikation gewährleisten kann.

### Strategische Marktpositionierung durch ökologische Glaubwürdigkeit

Die Forschung zeigt weiterhin, dass die Klimaneutralität von Drohnen kein technisches Attribut ist, sondern vom Einsatzszenario abhängt. Gleichzeitig besteht ein statistischer Zusammenhang zwischen der gesellschaftlichen Wahrnehmung der Technologie als umweltfreundlich und der Einstellung gegenüber der Technologie. Daraus ergibt sich eine direkte Implikation für die Entwicklung Deutschlands zum Leitmarkt, da der ökonomische Erfolg von der ökologischen Glaubwürdigkeit abhängt. Mit anderen Worten, eine Vermarktung, die auf falschen Nachhaltigkeitsversprechen fußt, ist fragil. Damit deutsche AAM-Technologie als globaler Standard für nachhaltige Logistik vermarktet werden kann, sollte sie nicht pauschal, sondern präzise eingesetzt werden.

Bisherige Forschung legt beispielsweise nahe, dass eine unregulierte Förderung von City-Logistik-Drohnen (z. B. für E-Commerce) zu einer schlechteren Ökobilanz führen und das Label „klimaneutrale Mobilitätstechnologie“ diskreditieren würde. Hingegen sind Anreize empfehlenswert, sodass sich Geschäftsmodelle primär im ländlichen und semi-urbanen Raum etablieren, wo Drohnen ineffiziente Diesel-Einzelfahrten ersetzen und somit ihren Systemvorteil nachweisbar ausspielen können. Im urbanen Raum ist die Nische für zeitkritische Transporte (Medizin) zu fördern, da hier ein hoher gesellschaftlicher Nutzen und zugleich energetische Vorteile erwartet werden können.

Eine Einbindung der Zielindustrien und ihrer Dachverbände für die Kommunikation dieser Erfolge (hier zur größeren Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit im Gesundheitssektor) scheint lohnend.

Das bisher angereicherte konzeptionelle Wissen ist hier jedoch nicht ausreichend. Mit dem zunehmenden Einsatz von Lieferdrohnen ist nun der methodische Übergang von theoretischen Verkehrssimulationen hin zur evidenzbasierten Bewertung der Drohnenlogistik auf Grundlage realer Betriebs- und Umweltdaten sowie der Anwendung

einer standardisierten Bilanzierungseinheit mit dem Ziel der Vergleichbarkeit von Ökobilanzierungen notwendig. Das Erbringen entsprechender Nachweise in konkreten Anwendungsfällen sollte gezielt gefördert und zur Qualifizierung der förderpolitischen Debatte bzw. öffentlichen Kommunikation genutzt werden. Ableitbare Erkenntnisse erfordern die Notwendigkeit, politische Handlungsspielräume zu identifizieren, um energetisch nachhaltige und klimaschützende Transportanwendungen gezielt zu fördern bzw. Fehlentwicklungen des Marktes regulatorisch einzuhegen.

## Transdisziplinäre Forschung zur Entwicklung Deutschlands zum Leitmarkt

### Systemkompetenz als Grundlage für einen AAM-Leitmarkt

Die Analyse der Wertschöpfungsketten im Dossier zeigt strukturelle Nachteile der deutschen Industrie im globalen Wettbewerb um Hardwarekomponenten (Batterien, Motoren, Flugplattformen). Auf industriepolitischer Ebene sollten daher die Förderung europäischer Lieferketten sowie strategische Kooperationen mit ukrainischen Unternehmen im Lieferdrohnensegment zentrale Bausteine darstellen, um technologische Souveränität zu erreichen.

Ein Leitmarkt im Bereich Drohnenlogistik wird sich jedoch nur teilweise über die Produktion von Bauteilen oder Softwarekomponenten etablieren, sondern vor allem durch die Fähigkeit, komplexe Technologien sicher in den öffentlichen Raum zu integrieren. Insbesondere die Umsetzung eines Luftraummanagements (U-Space), das einen skalierten Betrieb von Drohnen über komplexen Gebieten wie Städten oder Industrieanlagen ermöglicht, kann dabei als Schlüssel für die Leitmarktentwicklung fungieren. Dieses Ziel erfordert die Einbindung öffentlicher Verwaltungen, Forschungsförderungsorganisationen und Forschungseinrichtungen sowie politischer Akteure. Die transdisziplinäre Forschung leistet hierbei einen Beitrag, indem sie Governance-Lücken identifiziert, Investitionsrisiken aus Akzeptanzperspektive aufzeigt und die ko-kreative Gestaltung sowie Stakeholderbeteiligung in Anwendungsprojekten sichert.

### Deutschland als Referenzmarkt durch integrierte Multi-Level-Governance

Ein Leitmarkt zeichnet sich durch funktionierende regulatorische Rahmenbedingungen aus. Aktuell besteht eine historisch einmalige Chance, die Multi-Level-Governance-Strukturen zwischen der hoheitlichen Regulierung (Bund/EASA) und den lokalen Ebenen zu gestalten. Die aktuelle Forschung argumentiert, dass Deutschland im europäischen Vergleich zum Vorreiter für eine integrierte Drohnenlogistik werden kann, indem Kommunen befähigt werden, die hoheitlichen Vorgaben zur Nutzung des bodennahen Luftraums (u. a. § 21h LuftVO) an den lokalen Kontext anzupassen; etwa durch die Definition spezifischer Vorrangs- oder Beschränkungsgebiete. Dadurch sinkt für Betreiber das Risiko verwaltungsinterner, gesellschaftlicher und politischer Widerstände (Biehle, 2025). Ein derart funktionierendes Governance-Modell, das Marktentwicklung und lokale Schutzinteressen technisch und rechtlich harmonisiert, würde Deutschland als globalen Referenzmarkt etablieren und demonstrieren, wie autonomer Flugverkehr im komplexen Siedlungsraum rechtssicher und akzeptiert betrieben werden kann.

### Sicherung der Umsetzungsfähigkeit durch Kapazitätsaufbau

Schließlich verdeutlicht die Forschung, dass ein Leitmarkt nur entstehen kann, wenn die Verwaltung mit der Innovation Schritt hält. In diesem Zusammenhang sollte auch die administrative Handlungsfähigkeit bzw.

der Aufbau von Kompetenzen in der rechtssicheren und gesellschaftlich akzeptierten Planung und Verwaltung des bodennahen Luftraums als harter Standortfaktor begriffen und gefördert werden. Insbesondere im Bereich von AAM suggerieren die Expertenbefragungen im Rahmen dieses Technologiedossiers, dass der Markthochlauf aktuell nicht von der Technik, sondern von noch unzureichenden Verwaltungsstrukturen abhängt. Insbesondere die postulierte Stärkung der kommunalen Ebene erfordert einen entsprechenden Kompetenzaufbau in den Verwaltungen, da die bodennahe Luftraumplanung bislang weder in den behördlichen Entscheidungsstrukturen noch in der Stadtplanungspraxis verankert ist. Dabei spielen auch Anforderungen an AAM-Bodeninfrastrukturen eine Rolle (Feldhoff

& Metzner, 2021). Andererseits erfordert ein entsprechender Kompetenzaufbau personelle und technische Ressourcen, beispielsweise für eine effiziente Verwaltungspraxis zur Bearbeitung von Anträgen für Betriebsgenehmigungen Beyond Visual Line of Sight (BVLOS) durch die zuständigen Luftfahrtbehörden. Es besteht das Risiko eines unterfinanzierten politischen Mandates, bei dem der Bund zwar Regulierungs- und Verwaltungsaufgaben auf nachgelagerte Ebenen verlagert, ohne jedoch die dafür notwendigen finanziellen Mittel bereitzustellen. Um die Handlungsfähigkeit zu sichern, sollten Finanzierungsinstrumente erwogen werden, die diesen administrativen Mehraufwand decken und insbesondere Kommunen in die Lage versetzen, ihre Rolle als Planer und Vermittler einer lokalen Luftraumnutzung auszufüllen (vgl. Biehle, 2025).

## Transdisziplinäre Forschung für einen effizienteren Technologietransfer

### Förderung von Transformationsclustern und Reallaboren

Die bisherigen Leistungen der AAM (UIC2) Vorreiterkommunen für die nationale Marktentwicklung sollten unbedingt anerkannt und gezielt gefördert werden. Die Clusterentwicklung durch den Aufbau von regionalen Netzwerken aus Forschung, Privatwirtschaft, Verwaltungen und Zivilgesellschaft in Städten wie Aachen, Hamburg und Berlin hat bereits heute einen großen Beitrag zum Technologietransfer in die Praxis geleistet. Dazu zählen neben der Förderung der transdisziplinären Produktentwicklung auch die konsequente Mitarbeit dieser Cluster in aktuellen europäischen und nationalen Gesetzgebungsverfahren, in der Akquise von Fördermitteln, und in der lokalen Kommunikation und Beteiligung der Stadtgesellschaft an strategischen Richtungsentscheidungen zur urbanen Luftraumnutzung (BWAI, 2025). Eine förderpolitische Empfehlung ist daher die gezielte Einbindung weiterer Kommunen bzw. Kommunalen Vertreterinnen und Vertreter in das deutsche AAM-Ökosystem, beispielsweise durch Wissenstransfer und Schulungsprogramme.

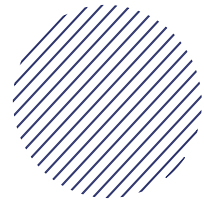
Neben der Clusterentwicklung bietet die Förderung von Reallaboren die Möglichkeit, technische, rechtliche und planerische Innovationen im Bereich der Lieferdrohnen praxisnah zu testen. Diese Förderinstrumente spielen zudem eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung der öffentlichen Wahrnehmung von AAM. Die Anwendung von Drohnen in räumlich begrenzten Arealen könnte nicht zuletzt dazu beitragen, die gesellschaftliche Wahrnehmung von erwarteten Risiken wie physischen Unfällen, Missbrauch, Lärmbelästigung oder Datenschutzverletzungen und eher abstrakt-vorstellbaren Vorteilen wie der flexiblen Festlegung des Ortes und der Zeit für die Zustellung von Paketen auf der letzten Meile ins Gleichgewicht zu bringen. Akteure des AAM-Marktes, Gesetzgeber und Luftsicherheitsbehörden können solche Szenarien in geschützten Umgebungen testen, um AAM schrittweise an die Erwartungen und Wünsche der Öffentlichkeit anzupassen.

# Referenzen

- Alwateer, M., & Loke, S. W. (2020). Emerging Drone Services: Challenges and Societal Issues. *IEEE Technology and Society Magazine*, 39(3), 47–51. <https://doi.org/10.1109/MTS.2020.3012325>
- Applin, S. A. (2016). Deliveries by Drone: Obstacles and Sociability. In B. Custers (Hrsg.), *The Future of Drone Use* (Bd. 27, S. 71–91). T.M.C. Asser Press. [https://doi.org/10.1007/978-94-6265-132-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-6265-132-6_4)
- Aster, H., Zeilerbauer, L., & Lindorfer, J. (2025). Environmental Impacts of Drone Delivery: A Comparative Meta-Analysis and Standardised LCA Metrics. *Journal of Sustainability*, 1(2). <https://doi.org/10.55845/jos-2025-1249>
- Aurambout, J.-P., Gkoumas, K., & Ciuffo, B. (2019). Last mile delivery by drones: An estimation of viable market potential and access to citizens across European cities. *European Transport Research Review*, 11(1), 30. <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0368-2>
- Becker, D., & Schalk, L. M. (2024). Toward robust and efficient communications for urban air mobility. *CEAS Aeronautical Journal*. <https://doi.org/10.1007/s13272-024-00738-6>
- Bertram, O. (2022, Januar 3). UAM Vehicle Design with Emphasis on Electric Powertrain Architectures. *AIAA SCITECH 2022 Forum*. AIAA SCITECH 2022 Forum. <https://doi.org/10.2514/6.2022-1995>
- Biehle, T. (2022). Social Sustainable Urban Air Mobility in Europe. *Sustainability*, 14(15), 9312. <https://doi.org/10.3390/su14159312>
- Biehle, T. (2025). *Urban Dimension of U-Space: Local Planning Considerations for Drone Integration*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5135795>
- Biehle, T., & Kellermann, R. (2023). Machbarkeitsstudie zur Verbesserung der ländlichen Nahversorgung mit Lieferdrohnen. *Standort*. <https://doi.org/10.1007/s00548-022-00829-8>
- Clothier, R. A., Greer, D. A., Greer, D. G., & Mehta, A. M. (2015). Risk Perception and the Public Acceptance of Drones: Risk Perception and the Public Acceptance of Drones. *Risk Analysis*, 35(6), Article 6. <https://doi.org/10.1111/risa.12330>
- Dienel, P. C. (1997). Planungszellen—Elemente partizipativer Technikfolgenabschätzung. In *Technikfolgenabschätzung als politische Aufgabe* (S. 159–176). Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Dienel, P. C. (2002). *Die Planungszelle*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Eißfeldt, H., Vogelpohl, V., Stolz, M., Papenfuß, A., Biella, M., Belz, J., & Kügler, D. (2020). The acceptance of civil drones in Germany. *CEAS Aeronautical Journal*, 11(3), 665–676. <https://doi.org/10.1007/s13272-020-00447-w>
- Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure. (2025). *Advanced-Air-Mobility-Strategie des BMDV - Aufbruch in eine neue Ära der Luftfahrt*. [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/LF/aam-strategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/LF/aam-strategie.pdf?__blob=publicationFile)
- Federmann, B. (with Technische Informationsbibliothek (TIB)). (2024). *Verbesserung der Nahversorgung im ländlichen Raum durch eine kombinierte Drohnen Lastenrad-Express-Belieferung und Übertragung auf ein nachhaltiges Geschäftsmodell - LieferMichel: Abschlussbericht: LieferMichel*. Hannover : Technische Informationsbibliothek. <https://doi.org/10.34657/19569>

- Fehling, C., & Saraceni, A. (2023). Technical and legal critical success factors: Feasibility of drones & AGV in the last-mile-delivery. *Research in Transportation Business & Management*, 50, 101029. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2023.101029>
- Filiopoulou, E., Bardaki, C., Nikolaidou, M., & Michalakelis, C. (2025). Drone-as-a-Service for last-mile delivery: Evidence of economic viability. *Economics of Transportation*, 41, 100398. <https://doi.org/10.1016/j.ecotra.2025.100398>
- Finke, M., & Okuniek, N. (2018). Using Segmented Standard Taxi Routes to Integrate Unmanned Aircraft Systems at Civil Airports. *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/DASC.2018.8569766>
- Fraske, T., Mello Rose, F., & Vadiati, N. (2024). Legitimation strategies in emerging ecosystems: The case of advanced air mobility in Hamburg. *Progress in Economic Geography*, 2(2), 100025. <https://doi.org/10.1016/j.peg.2024.100025>
- Fraunhofer ISI. (2025). *Globale Rohstoffquellen für Lithium-Ionen-Batterien: Wo kommen Batterie-Rohstoffe her und wer beherrscht den Markt?* <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/lithium-ionen-batterien-rohstoffe-quellen-weltweit-globaler-markt.html>
- Freie und Hansestadt Hamburg Behörde für Wirtschaft, Arbeit und Innovation (BWA) (with Stefan Barrenschee, Franziska Biermann, Dr. Judith Reuter, Andreas Richter, Karlotta Victor, Lisa Altrath, Denise Braemer, Janin Detjen, & Daniela Richter). (2025). *Freie und Hansestadt Hamburg Behörde für Wirtschaft, Arbeit und Innovation*. Freie und Hansestadt Hamburg Behörde für Wirtschaft, Arbeit und Innovation / Hamburg Aviation / Windrove. [https://www.hamburg-aviation.de/fileadmin/HamburgAviation/Dokumente/Windrove/UAM-Strategie\\_FHH.pdf](https://www.hamburg-aviation.de/fileadmin/HamburgAviation/Dokumente/Windrove/UAM-Strategie_FHH.pdf)
- Hohmann, N., Brulin, S., Adamy, J., & Olhofer, M. (2024). Multi-Objective Optimization of Urban Air Transportation Networks Under Social Considerations. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, 5, 589–602. <https://doi.org/10.1109/OJITS.2024.3443170>
- Janotta, F., Peine, L., & Hogleve, J. (2021). *Public opinions on Urban Air Mobility – The significance of contributing to the common good*. <https://doi.org/10.31219/osf.io/5m924>
- Jazairy, A., Persson, E., Brho, M., Von Haartman, R., & Hilletoft, P. (2024). Drones in last-mile delivery: A systematic literature review from a logistics management perspective. *The International Journal of Logistics Management*. <https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2023-0149>
- Karpstein, R., Holzapfel, F., Biberthaler, P., & Müller, S. (2024). Neuartige Luftfahrtmobilität im Gesundheitswesen: Erkenntnisse aus einer qualitativen Interviewserie für den Krankenhaussektor. *Notfall + Rettungsmedizin*. <https://doi.org/10.1007/s10049-024-01391-6>
- Kellermann, R., Biehle, T., & Fischer, L. (2020). Drones for parcel and passenger transportation: A literature review. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 4, 100088. <https://doi.org/10.1016/j.trp.2019.100088>
- Kellermann, R., Biehle, T., & Mostofi, H. (2023). Modelling public attitude towards drone delivery in Germany. *European Transport Research Review*, 15(1), 38. <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00606-0>
- Kirschstein, T. (2020). Comparison of energy demands of drone-based and ground-based parcel delivery services. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 78, 102209. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.102209>
- Koiwanit, J. (2018). Analysis of environmental impacts of drone delivery on an online shopping system. *Advances in Climate Change Research*, 9(3), 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.09.001>
- Kolliarakis, G. (2015). Innovation, Inequalities, and Impacts: Countering Non-Anticipated Effects of the European ICT Research. *Proceedings of ISIS Summit Vienna 2015–The Information Society at the Crossroads*, T3.3007. <https://doi.org/10.3390/isis-summit-vienna-2015-T3.3007>
- Kumar, A., Prybutok, V., & Sangana, V. K. R. (2025). Environmental Implications of Drone-Based Delivery Systems: A Structured Literature Review. *Clean Technologies*, 7(1), 24. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7010024>

- Lindgren, P., & Ljungblad, S. (2024). Drones as Accessibility Probes in Able-Bodied Norms: Insights from People with Lived Experiences of Disabilities. *Designing Interactive Systems Conference*, 2946–2957. <https://doi.org/10.1145/3643834.3661580>
- Lyons, T., & McDonald, N. C. (2023). Last-Mile Strategies for Urban Freight Delivery: A Systematic Review. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2677(1), 1141–1156. <https://doi.org/10.1177/03611981221103596>
- Meincke, P. A. (2022). Cargo Handling, Transport and Logistics Processes in the Context of Drone Operation. In J. C. Dauer (Hrsg.), *Automated Low-Altitude Air Delivery* (S. 205–243). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-83144-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-83144-8_9)
- Poikonen, S., & Campbell, J. F. (2021). Future directions in drone routing research. *Networks*, 77(1), 116–126. <https://doi.org/10.1002/net.21982>
- Ragunatha, A., Lindkvist, E., Thollander, P., Hansson, E., & Jonsson, G. (2023). Critical assessment of emissions, costs, and time for last-mile goods delivery by drones versus trucks. *Scientific Reports*, (13:11814). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38922-z>
- Röper, J. W. A., Fischer, K., Baumgarten, M. C., Thies, K. C., Hahnenkamp, K., & FleBa, S. (2023). Can drones save lives and money? An economic evaluation of airborne delivery of automated external defibrillators. *The European Journal of Health Economics*, 24(7), 1141–1150. <https://doi.org/10.1007/s10198-022-01531-0>
- Schmidt, S., & Saraceni, A. (2024). Consumer acceptance of drone-based technology for last mile delivery. *Research in Transportation Economics*, 103, 101404. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2023.101404>
- Sky Limits (with Nico Dannenberger, Incent Schmid-Loertzer, Liliann Fischer, Victoria Schwarzbach, Robin Kellermann, & Tobias Biehle). (2020). *Verkehrslösung oder Technikhype? Ergebnisbericht zur Einstellung der Bürgerinnen und Bürger gegenüber dem Einsatz von Lieferdrones und Flugtaxis im städtischen Luftraum in Deutschland*. [https://skylimits.info/wp-content/uploads/2020/06/Sky\\_Limits\\_Bericht\\_Einstellungsforschung\\_final.pdf](https://skylimits.info/wp-content/uploads/2020/06/Sky_Limits_Bericht_Einstellungsforschung_final.pdf)
- Sky Limits. (2021). *Delivery drones and air taxis in cities? Twelve research-based recommendations for handling future traffic in lower airspace*. <https://skylimits.info/delivery-drones-and-air-taxis-in-cities-twelve-research-based-recommendations-for-handling-future-traffic-in-lower-airspace/>
- Statistisches Bundesamt (Destatis). (2024). *Zahl der Woche: Frauen in Forschung und Entwicklung. Wiesbaden*. [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2024/PD24\\_17\\_p002.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2024/PD24_17_p002.html)
- Stolz, M., Papenfuß, A., Dunkel, F., & Linhuber, E. (2024). Harmonized Skies: A Survey on Drone Acceptance across Europe. *Drones*, 8(3), 107. <https://doi.org/10.3390/drones8030107>
- Straubinger, A., Verhoef, E. T., & de Groot, H. L. F. (2022). Going electric: Environmental and welfare impacts of urban ground and air transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 102, 103146. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103146>
- Van Der Meij, M. G., Fraaije, A., Broerse, J. E. W., & Kupper, F. (2023). Guiding visions of corporate smart city innovators: Identifying opportunities for participatory futuring. *Futures*, 154, 103269. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2023.103269>
- Verband Unbemannte Luftfahrt (VUL). (2023). *Studie zum deutschen Drohnen-, Flugtaxi- sowie Drohnen-detektions- und -abwehrmarkt* (S. 36). Verband Unbemannte Luftfahrt (VUL). <https://www.bdli.de/sites/default/files/2025-07/Studie%202023.pdf>
- Weidinger, J., Schlauderer, S., & Overhage, S. (2018). *The Good, the Bad and the Indispensable – Insights into the Practical Potential of Emergency Response Information Systems and Drones for Firefighters*.
- Zenz, A., & Powles, J. (2024). Resisting technological inevitability: Google Wing’s delivery drones and the fight for our skies. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 382(2285), 20240107. <https://doi.org/10.1098/rsta.2024.0107>



# Urbane und Regionale Lieferdrohnen

## Impressum

Teil 1 der Reihe „Technologiedossiers: Hightech aus Deutschland für klimaneutrale Mobilität“

Entstanden im Projekt „BRIDGE-HTAD: Beteiligung, Regulierung, Innovation & Governance für sozial-ökologische Transformationspfade neuer Mobilitätstechnologien“

Projektleitung: Sabine Schröder, Dr. Filipe Mello Rose

Dossierautor: Dr. Tobias Biehle

Veröffentlichung März 2026 durch das nexus Institut für Kooperationsmanagement und interdisziplinäre Forschung

Das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) fördert das Projekt „BRIDGE-HTAD: Beteiligung, Regulierung, Innovation & Governance für sozial-ökologische Transformationspfade neuer Mobilitätstechnologien“ im Rahmen der Strategie „Forschung für Nachhaltigkeit“ (FONA) [www.fona.de](http://www.fona.de) im Förderschwerpunkt sozial-ökologische Forschung unter dem Förderkennzeichen 01UV2501. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

**FONA**

Sozial-ökologische Forschung