

---

---

## Kurzfassung

---

<b>Name:</b>	Katrin Stinner
<b>Thema:</b>	Störfallmanagement im Luftverkehr: Integration von unbemannten Luftfahrzeugen in den zivilen Luftraum
<b>Betreuung:</b>	Prof. Dr. Ing. Manfred Boltze Dr. Ing. Tobias Monzert Dr. Kai Wendler M. Sc. Ferdinand Schöpp

---

Der Einsatz von zivilen unbemannten Luftfahrtsystemen (UAS), umgangssprachlich auch Drohnen genannt, eröffnet vielfältige Möglichkeiten, die vor ihrer Einführung so nicht möglich waren. So können UAS Arbeitsabläufe effizienter und sicherer machen, indem beispielsweise gefährliche Inspektionen in großer Höhe nicht mehr zwingend durch Menschen, sondern auch durch mit Kamera ausgestattete UAS durchgeführt werden können. Zudem sind UAS umweltfreundlicher, da sie nicht mit fossilen Brennstoffen betrieben werden. Perspektivisch sollen große UAS mit elektronischem Antrieb, sogenannte eVTOL (electronic Vertical Takeoff and Landing), auch als Flugtaxis dienen und somit das bestehende Verkehrsnetz punktuell, vor allem in stauanfälligen Ballungsgebieten, nachhaltig entlasten. Auch im Freizeitbereich bieten UAS den Anwendern neue Möglichkeiten, um Eindrücke festzuhalten. Es ist daher nachvollziehbar, dass zivile UAS nach ihrem Markteintritt in den 2010er Jahren vermehrt nachgefragt wurden. Vor allem bei kommerziell eingesetzten UAS ist weiterhin ein Wachstum prognostiziert. Dies hängt insbesondere mit den zahlreichen Einsatzmöglichkeiten für UAS zusammen. Dies wurde auch von der Bundesregierung erkannt. So wurde im Mai 2019 ein Dokument durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) veröffentlicht, das auf 61 Seiten die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten darstellt, von hoheitlichen Einsatzmöglichkeiten, über Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Geodäsie und Inspektion bis hin zu Einsatzformen im Bereich der humanitären Hilfe und dem Transportwesen.

Neben zukunftsorientierten Einsatzmöglichkeiten besitzen Drohnen auch ein Störpotential und können so die Sicherheit des Luftverkehrs gefährden. In den vergangenen Jahren wurden regelmäßig Störfälle im Luftverkehr im Zusammenhang mit UAS gemeldet, die teilweise zu erheblichen Störungen im Betriebsablauf geführt haben. Der Großteil dieser Vorfälle fand im Nahbereich von Verkehrsflughäfen statt. Der in Europa schwerwiegendste Störfall ereignete sich im Dezember 2018 am Flughafen London-Gatwick. Hier war der Flugbetrieb für mehrere Tage immer wieder eingestellt worden, sodass eine Vielzahl von Flugbewegungen umgeleitet oder annulliert werden musste und ein wirtschaftlicher Schaden in Millionenhöhe entstanden ist. Auch deutsche Verkehrsflughäfen mussten bereits mehrfach aufgrund von Drohnen-Sichtungen im Nahbereich zeitweise ungeplant schließen. Am bislang häufigsten betroffen war der größte deutsche Flughafen in Frankfurt. Diese wiederholt auftretenden Störfälle und die dadurch entstandenen Konsequenzen, wie Flughafenschließungen, zeigen, dass Drohnen ein Gefahrenpotential für den Luftverkehr darstellen. Sie sind ein wirksames Mittel, um den Flugverkehr zu stören und signifikante wirtschaftliche Schäden zu verursachen.

Daher hat diese Arbeit das Ziel, die durch Drohnen im Nahbereich von Verkehrsflughäfen ausgelösten, potentiellen Gefahrensituationen strukturiert zusammenzutragen. Darauf aufbauend

---

---

werden proaktive und reaktive Maßnahmen abgeleitet, die das Auftreten von UAS verhindern oder die Auswirkungen der Störfälle abmildern oder eliminieren. Durch Zuordnung der Maßnahmen zu den jeweiligen Störfällen werden Szenarien gebildet. Dabei werden auch die je Störfall vorhandenen Risiken identifiziert, diskutiert und bewertet.

Das Luftverkehrssystem ist ein komplexes, hochdynamisches System, das eine Vielzahl von Interessengruppen und Akteuren beinhaltet, die kontroverse Interdependenzen untereinander aufweisen. So müssen Flughafenbetreiber, Luftverkehrsgesellschaften und Flugsicherung eng zusammenarbeiten, um einen reibungslosen Flug von A nach B zu ermöglichen. Bei Störungen im Betriebsablauf sind durch die enge Verzahnung mehrere Systempartner auf unterschiedliche Art und Weise betroffen. Die Luftverkehrsbranche hat sich seit ihrem Bestehen trotz mehrerer Krisen konstant weiter entwickelt. Auch die erheblichen Verkehrseinbrüche, ausgelöst durch die COVID-19-Pandemie, ändern nichts am mittelfristigen Verkehrswachstum im Luftverkehr. Die hohe Verkehrsdichte, kombiniert mit dem neuen Luftraumteilnehmer UAS, stellt die Luftverkehrsindustrie und die Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden vor eine neue Herausforderung: die geordnete und sichere Integration der unbemannten Luftfahrt in den Luftraum, der bislang ausschließlich durch die bemannte Luftfahrt genutzt wurde. Durch gesetzliche Rahmenbedingungen, die Analogien zwischen bemannter und unbemannter Luftfahrt aufweisen, versuchen die gesetzgebenden Instanzen die Sicherheit von der bemannten Luftfahrt auf die unbemannte Luftfahrt zu projizieren und den hohen Sicherheitsstandard im Luftverkehr aufrecht zu erhalten. Bei der Luftraumintegration sind eine Vielzahl von Herausforderungen zu überwinden und notwendige Rahmenbedingungen zu schaffen, die im europäischen Raum durch Forschungsprojekte zur Anforderungsbestimmung für den europäischen Drohnenluftraum, dem sogenannten U-Space, ermittelt wurden. In Deutschland konnte im Dezember 2021 ein erster Testbetrieb von Drohnenflügen im ersten deutschen U-Space-Reallabor am Hamburger Hafen positiv abgeschlossen werden.

Bei der Sicherheit wird zwischen Security, dem Schutz von unrechtmäßigen Eingriffen in den Luftverkehr, und Safety, der sicheren Betriebsdurchführung von Luftverkehr unterschieden. Für beide Themengebiete schreiben die supranationalen und nationalen gesetzgebenden Instanzen eine Vielzahl von Richtlinien und Empfehlungen vor, wie im Umgang mit sicherheitskritischen Themenstellungen zu verfahren ist. Der unrechtmäßige Einsatz von Drohnen hat in der Vergangenheit zu betrieblichen Störungen des Luftverkehrs geführt, weshalb im Rahmen dieser Thesis die Risikobewertung schwerpunktmäßig aus Safety-Sicht durchgeführt wird. Der Prozess des Safety-Risk-Managements besteht aus der Gefahrenidentifikation, der Durchführung einer Sicherheitsbewertung und der Entwicklung von risikominimierenden Maßnahmen. Zur Durchführung einer Risikobewertung schlägt die Literatur mehrere Methoden vor. Im Rahmen dieser Thesis wurde die Bow-Tie-Methode ausgewählt, die häufig in Hochsicherheitsindustrien eingesetzt wird und sich durch ihren strukturierten und systematischen Ansatz auszeichnet. Dieser prozessuale Fokus führt dazu, dass bestimmte Probleme oder Ereignisse in Schaubildern unmittelbar mit möglichen situationsbezogenen Maßnahmen bzw. Strategien kombiniert werden können und somit visuelle Abbildungen von Szenarien ermöglicht werden. Ergänzt wurde das Vorgehen der Bow-Tie-Methode mit den Hinweisen zur Strategieentwicklung und Strategieranwendung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), die sich auf den Straßenverkehr beziehen, jedoch zu großen Teilen auf den Luftverkehr übertragen werden können. Dies betrifft die Strategieplanungsstufen der Grundlagenplanung, der Vorplanung und der Entwurfsplanung.

---

---

In der Grundlagenermittlung wurde der Untersuchungsraum sowohl global als auch lokal abgegrenzt. Bei der Untersuchung von möglichen Wirkungen sind bei einem UAS-Störfall sowohl der Flughafen, an dem die Störung auftritt, als auch weitere benachbarte Flughäfen im Umkreis, die als potentielle Ausweichflughäfen dienen, zu berücksichtigen. Ebenfalls zum Untersuchungsraum zählen die Luftstraßen zwischen dem Zielflughafen und den Ausweichflughäfen, die Holding-Lufträume sowie Verkehrsinfrastrukturanlagen anderer Modi, wie Schienen- und Straßenverkehrsstrassen. Lokal sind die An- und Abflugkorridore sowie der Flughafen selbst besonders schützenswerte Räume. Zudem ist die Einrichtung einer Schutzzone um die kritischen Bereiche notwendig. Bei UAS-relevanten Einsatzszenarien ist eine Vielzahl von Parteien in den Einsatz involviert. Neben den Gefahrenabwehrbehörden Bundes- und Landespolizei sind mindestens die DFS, operative Bereiche der Flughafenbetreiber sowie die lokalen Luftaufsichtsbehörden in die Einsatzszenarien involviert. Diese geteilte Zuständigkeit erfordert ein hohes Maß an Abstimmung und eine verbindliche Regelung der Kompetenzen, der Schnittstellen und der Zusammenarbeit. Dies muss standortspezifisch geregelt werden, weil jeder Flughafen lokale Besonderheiten aufweist. Es ist ebenfalls von elementarer Bedeutung, die Art und Weise der Zusammenarbeit regelmäßig zu überprüfen und ggf. im Einsatzfall gewonnene Erfahrungen in das gemeinsame Einsatzdokument einzuarbeiten.

Mit der Methode der Experteninterviews konnten sechs UAS-Störfälle sowie proaktive und reaktive Maßnahmen zur Abmilderung oder Verhinderung der Gefahr bzw. der Auswirkungen ermittelt werden, die anschließend mit der Bow-Tie-Methode visualisiert werden konnten. Die Darstellungsform der Bow-Tie-Methode ermöglicht die Risikobewertung szenariospezifisch durchzuführen und so innerhalb eines Diagramms mehrere Risiken auf einmal abzubilden und zu bewerten. Bei der Szenarioanalyse konnten erhebliche Bemühungen der Systempartner zur Verhinderung von UAS im Flughafenumfeld festgestellt werden. Dennoch werden Drohnen auch trotz der Maßnahmen regelmäßig an Verkehrsflughäfen sowie in den An- und Abflugkorridoren der Verkehrsflughäfen gesichtet. Dies zeigt, dass die derzeit unternommenen Anstrengungen nicht ausreichend sind, um einen dauerhaft zufriedenstellenden Status quo zu erreichen. Zentrale Punkte sind in diesem Zusammenhang die fehlende technische Lösung zur Drohnerkennung, die Drohnensteuerern das unrechtmäßige Fliegen in Flugverbotszonen erschweren würde, sowie wirksame Abwehrmaßnahmen, um die von der Drohne ausgehende Gefahr zu beseitigen.

Die Safety-Risk-Bewertung der einzelnen Störfälle zeigt eine Spannbreite der möglichen Auswirkungen je nach Szenario. Grundsätzlich können positive Wirkungen der angewendeten Maßnahmen hinsichtlich der Kriterien Zielerreichung, Finanzierbarkeit und Umsetzbarkeit festgestellt werden. Elementarer Punkt bei der Wirksamkeit der proaktiven Maßnahmen ist die Motivation des Drohnensteuerers. Unbewusste oder unwissende Personen können mit aufklärenden Maßnahmen wirksam erreicht werden. Bewusst störende Personen wollen die Regeln vorsätzlich brechen, sodass die Maßnahmen gegen diese Personengruppen nicht oder nur wenig wirksam sind. Die reaktiven Maßnahmen können ebenfalls grundsätzlich als wirksam, jedoch nicht abschließend zufriedenstellend und die Gefahr sicher eliminierend beschrieben werden. Diese Arbeit liefert eine qualitative Handlungsgrundlage auf deren Basis weitergehende (Risiko)-Bewertungsschritte lokal an den Verkehrsflughäfen durchgeführt werden müssen.

---

---

---

## Abstract

---

**Name:** Katrin Stinner

**Title:** Incident management in Ait traffic: integration of unmanned aerial vehicles into civil airspace

**Advisor** Prof. Dr. Ing. Manfred Boltze  
Dr. Ing. Tobias Monzert  
Dr. Kai Wendler  
M. Sc. Ferdinand Schöpp

---

The use of civilian unmanned aerial systems (UAS), colloquially known as drones, opens up a wide range of possible applications that were not possible before their introduction. For example, UAS can make work processes more efficient and more save as dangerous inspections at high altitudes no longer necessarily have to be carried out by humans. Nowadays, these tasks can also be performed by camera-equipped UAS. Furthermore, UAS are more environmentally friendly because they do not run on fossil fuels. In the future large UAS with electronic propulsion, so-called eVTOL (electronic Vertical Takeoff and Landing), will also serve as personal air vehicles and thus sustainably relieve the existing traffic network at certain points, especially in congested urban areas. UAS also offer users new ways of capturing impressions in the leisure sector. It is therefore not surprising that civil UAS were in high demand after their market entry in the 2010s. Growth is forecasted to continue, especially for commercially deployed UAS. This is particularly related to the numerous possible applications for UAS. This has also been recognized by the German government. In May 2019, the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy published a 61-page document that illustrates the wide range of possible applications. They range from the support of sovereign tasks and applications in the field of geodesy and inspection to applications in the field of humanitarian aid and transportation.

However, besides their wide range of positive potential drones also have a considerable potential for causing disruptions at airports and can thus endanger the safety of air traffic. In recent years, there have been repeated reports of incidents in air traffic in connection with UAS, some of which have led to considerable disruptions in operations. The majority of these incidents took place in the vicinity of commercial airports. The most serious incident in Europe occurred in December 2018 at London-Gatwick Airport. Here, flight operations were repeatedly suspended for several days, meaning that a large number of flight movements had to be diverted or canceled which led to an economic damage of millions of euros. German commercial airports have also been forced to close unexpectedly on several occasions due to drone sightings in the vicinity of airports. The largest German airport in Frankfurt has been affected most frequently. These repeated incidents and the resulting consequences, such as airport closures, clearly show that drones represent a significant potential danger to the safety of air traffic. In addition, they are an effective means of disrupting air traffic and causing significant economic damage.

---

---

Therefore, the objective of this thesis is to compile the potential hazardous situations triggered by drones in the vicinity of commercial airports in a structured manner. Based on this, proactive and reactive strategies are derived to prevent the occurrence of UAS or to mitigate or eliminate the effects of the incidents. Scenarios are formed by assigning the strategies to the respective incidents. In the process, the risks present for each incident are also identified, discussed and evaluated.

The air traffic system is a complex, highly dynamic system that involves a large number of stakeholders and actors who have controversial interdependencies with each other. For example, airport operators, airlines and air traffic control must always work closely together in order for flights to be carried out smoothly from point A to point B. In the event of disturbances in the sequence of operation, this close interdependence means that the system partners are always affected in different ways. Since its inception, the air transport industry has continued to develop steadily despite several crises. Even the considerable downturns in air transport triggered by the COVID-19 pandemic do not change the medium-term growth in air traffic. The high traffic density combined with the new airspace participant UAS, poses a new challenge to the aviation industry and the civil aviation authorities: the orderly and safe integration of unmanned aviation into the airspace that has been used exclusively by manned aviation until now. In doing so, the highest good in aviation, safety, must not be jeopardized under any circumstances. Through legal frameworks that show strong analogies between manned and unmanned aviation, the legislative bodies try to project this safety from manned aviation to unmanned aviation and to maintain the high safety standard in aviation as a whole. There are a number of challenges to be overcome and necessary frameworks to be created in airspace integration, which have been identified in the European area through research projects to define requirements for European drone airspace, known as U-Space. In Germany, the first test operation of drone flights in the first German U-Space sandbox at the Port of Hamburg was completed successfully in December 2021.

Safety and Security are considered the most important principles in air transport. The term security describes any measures against the unlawful interference with air traffic, and the term safety focuses on the safe operation of air traffic. For both subject areas, supranational and national legislative bodies prescribe a large number of guidelines and recommendations on how to deal with safety-critical issues. In the past, the unlawful use of drones has primarily led to operational disruptions in air traffic, which is why this thesis focuses on safety and the relevant safety-specific guidelines. The process of safety risk management consists of hazard identification, conducting a safety assessment, and developing risk-mitigation measures. To perform a risk assessment, the literature suggests several methods. In the context of this thesis, the Bow-Tie method was selected, which is often used in high security industries and is characterized by its structured and systematic approach. This strong procedural focus leads to the fact that certain problems or events can directly be combined with possible situation-related measures/strategies in a diagram, thus enabling a visual mapping of scenarios. The procedure of the Bow-Tie method was supplemented with instructions for strategy development and strategy application of the FGSV, which refer to road transportation but can be adapted in a large extent to air traffic. This applies to the strategy planning stages of basic planning, preliminary planning and design planning.

---

---

In the basic investigation, the investigation area was defined globally and locally. When investigating the possible effects of an UAS incident, both the airport at which the incident occurs and other neighboring airports, which serve as potential alternate airports, must be taken into account. The airways between the destination airport and the alternate airports, the holding airspaces, and traffic infrastructure facilities of other modes such as rail and roadways are also included in the area of investigation. Locally, the approach and departure flight routes, as well as the airport itself, are especially worthy of protection. In addition, the establishment of protection zones around these critical areas is necessary.

In an UAS-relevant mission scenario, a variety of parties are involved in the mission. In addition to the emergency response authorities, the federal and state police forces, at least the German air traffic control (DFS), operational units of the airport operator and the local civil aviation authority are involved in the operational scenarios. This shared responsibility requires a high degree of coordination and a binding regulation of competencies, interfaces and cooperation. This must be regulated on a site-specific basis because each airport has its own local characteristics. It is also of elementary importance to regularly review the way in which cooperation takes place and, if necessary, to incorporate experience gained during operations into the joint operational document.

The method of expert interviews was used to identify six UAS-incidents as well as proactive and reactive measures to mitigate or prevent the hazard or impact, which could be visualized using the Bow-Tie method. The Bow-Tie method's presentation format allows risk assessment to be performed on a scenario-specific basis, thus allowing multiple risks to be mapped and assessed at once within a single diagram. The scenario analysis identified significant efforts by system partners to prevent UAS in the airport environment. Nevertheless, drones are still repeatedly sighted at commercial airports and in the approach and departure corridors of commercial airports, even despite the measures taken. This shows that the efforts currently being made are not yet sufficient to achieve a permanently satisfactory status quo. Key issues in this context are the lack of a technical solution for drone detection, which would make it much more difficult for drone pilots to fly illegally in no-fly zones, and effective defensive measures to effectively combat the danger posed by drones.

The safety risk assessment of the individual incidents shows a wide range of possible effects depending on the scenario. However, positive effects of the measures applied can be determined with regard to the criteria of goal achievement, financial feasibility and practicability. An elementary point determining the effectiveness of the proactive measures is the motivation of the drone controller. Unconscious or unknowing persons can be effectively reached with educational measures. Consciously disruptive persons, who want to intentionally break the rules cannot be reached with the measures. Reactive measures can also be described as effective in principle, but not conclusively satisfying and eliminating the danger with certainty.

This thesis provides a qualitative basis for action on the basis of which further (risk)-assessment steps must be carried out locally at commercial airports.

---