

BEWERTUNG DES LUFTRISIKOS BEIM BETRIEB VON KLEINEN UNBEMANNTEN FLUGGERÄTEN IM UNTERSTEN LUFTRAUM EIN EINFACHER UND QUANTITATIVER ANSATZ

Phiesel¹, D., Moormann, D., RWTH Aachen University, Institut für Flugsystemdynamik,
52062 Aachen

KURZDARSTELLUNG

Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird eine aufgabenangepasste, einfache und quantitative Vorgehensweise für die Bewertung von Risiken für bemannte Luftfahrzeuge durch den Betrieb von kleinen unbemannten Fluggeräten (Luftrisiko, engl. *Air Risk Class*, ARC) unterhalb einer Flughöhe von 150 Metern vorgestellt. Basis dafür sind internationale Meldungen über Annäherungen unbemannter Fluggeräte mit bemannten Luftfahrzeugen.

Anknüpfend an eine Untersuchung zur Bewertung des Bodenrisikos (engl. *Ground Risk Class*, GRC) [1] wird hier ein Risikomodell erarbeitet, das sowohl mit einer minimalen Anzahl an Prädiktoren auskommt als auch quantitativ das Risiko für die bemannte Luftfahrt beschreibt. Wie schon im Bereich des Bodenrisikos kommen dabei Sicherheitszahlen zum Einsatz, die intuitiv nachvollziehbar sind und gleichzeitig einen direkten Bezug zur Mortalität pro Betriebsstunde herstellen.

Das hier erarbeitete Modell beschreibt das Luftrisiko des Betriebs von kleinen unbemannten Fluggeräten im untersten Luftraum lediglich durch die Faktoren Masse, Betriebsort und Qualität des Sicherheitsumfelds, das dem Betrieb zugrunde liegt.

Wie vermutet spiegelt die Empirik beim Betriebsort die kausalen Zusammenhänge größtenteils wider. So ergibt sich eine entsprechende Häufung von gemeldeten Vorkommnissen wie Drohnensichtungen und -annäherungen an bemannte Luftfahrzeuge in Flugplatznähe und Kontrollzonen. Andererseits kann die Vermutung einer mit dem Urbanisierungsgrad korrelierenden Gefährdung der bemannten Luftfahrt durch unbemannte Fluggeräte empirisch nicht bestätigt werden.

Im Vergleich mit dem Bodenrisiko scheint das Luftrisiko beim Betrieb von kleinen unbemannten Fluggeräten im untersten Luftraum nach Auswertung der Meldezahlen in vielen Fällen eine untergeordnete Rolle zu spielen. Dies steht teilweise im Widerspruch zur Bewertung des Luftrisikos bei den traditionellen Betrachtungsmethoden, insbesondere mit Blick auf das *Specific Operations Risk Assessment* (SORA [2]) der *Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems* (JARUS).

Nicht zuletzt kann gezeigt werden, dass die meisten Zwischenfälle auf einen illegalen Betrieb zurückgeführt werden können, sodass das Hauptaugenmerk zukünftiger Regulierungen auf die Qualität der Kenntnisse von Steuerern sowie eine wirksame Prävention durch Verfolgbarkeit gerichtet sein sollte.

KEYWORDS

Luftfahrt; unbemanntes Fluggerät; Drohne; Risikobewertung; Luftrisiko; UAV; ARC; SORA

¹ Der Autor ist technischer Referent im Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Abteilung Luftfahrt, 53175 Bonn. Die vorliegende Arbeit spiegelt seine persönliche Auffassung wider.
Kontakt: daniel.phiesel@rwth-aachen.de

1 EINLEITUNG

Unbemannte Fluggeräte werden zukünftig eine immer wichtigere Rolle innerhalb der gesamten Luftfahrt spielen.

Insbesondere der Betrieb von Geräten, die weniger als 25 Kilogramm wiegen und unterhalb einer Flughöhe von 150 Metern eingesetzt werden, ermöglicht bereits heute ein breites Spektrum an nützlichen Einsatzmöglichkeiten, während die mit dem Betrieb einhergehenden Risiken verglichen mit anderen Betriebsarten verhältnismäßig klein bleiben (vgl. [2, 3]).

Die gesellschaftliche Akzeptanz eines Regelbetriebs dieser neuen Art von Luftfahrzeugen im zivilen Luftraum hängt davon ab, dass das hohe Sicherheitsniveau der bemannten Luftfahrt hierdurch nicht beeinträchtigt wird. Bestehende Empfehlungen der *Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems* (JARUS) verfolgen in den *Guidelines on Specific Operations Risk Assessment* (SORA) dabei einen übergeordneten Ansatz, der nahezu alle möglichen Betriebsfälle – also auch diejenigen von sehr schweren Geräten, die in großen Flughöhen operieren – abdeckt. Für einfache Betriebsfälle, also ebenjene, die mit kleinen Geräten unterhalb der Mindestflughöhe für die bemannte Luftfahrt durchgeführt werden, könnte im Vergleich zu den meist aufwendigen klassischen Risikobewertungsverfahren jedoch auch eine einfachere Methodik ausreichen. Dies wäre besonders dann von Interesse, wenn ein solches Verfahren mit deklarativen Angaben des Betreibers auskommt und somit den Erlaubniserteilungsprozess zu automatisieren und beschleunigen vermag. Zumindest in Deutschland wird dies durch bereits ähnliche Erlaubnisse in Form von Allgemeinverfügungen nahegelegt [3, 4], die nicht nur erlaubnisbedürftige, sondern auch grundsätzlich verbotene Betriebsarten ermöglichen.

Durch ein solch einfaches, schnelles, und gleichzeitig risikobasiertes Erlaubnisverfahren könnte das volle Potential der unbemannten Luftfahrt gehoben werden. Erst kürzlich stellte das US-amerikanische *Committee on Assessing the Risks of Unmanned Aircraft Systems (UAS) Integration* der *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine* diesbezüglich fest [5]:

Overly stringent certification and operational approval requirements for drone operations that are relatively low risk have the potential for placing unnecessary burdens on the business case and implementation timeline for those operations, stifling innovation.

Die vorliegende Ausarbeitung dient daher dem Zweck, die Anforderungen für kleine unbemannte Fluggeräte in einem einfach verständlichen und mathematisch nachvollziehbaren Modell für das Luftrisiko umzusetzen.

2 MODELLBILDUNG

Während für das Bodenrisiko bereits eine Vielzahl von Studien mit konkreten Aussagen vorliegt (vgl. Übersichtsstudie [6]), gestaltet sich die Suche nach ähnlichen Erkenntnissen im Bereich des Luftrisikos als schwierig. Zwar gibt es erste Ansätze zum Kollisionsverhalten von Drohnen mit bemannten Luftfahrzeugen [7], aber noch bleiben viele qualitative Zusammenhänge, auf die sich auch SORA bezieht, hinsichtlich der genauen Größe ihres Einflusses unerforscht. Aber genau durch eine solch quantitative Betrachtungsweise können die Risiken durch den Betrieb von unbemannten Fluggeräten transparenter ermittelt werden.

Daher werden in der vorliegenden Arbeit im Gegensatz zu der sonst üblichen – versierten, aber auch subjektiven – Bewertung der Risiken durch Experten, empirische Daten, also Meldungen über Annäherungen und Unfälle herangezogen. Das Ziel ist ein verständliches, transparentes und grundsätzlich falsifizierbares Konstrukt, das zur kritischen Auseinandersetzung mit bestehenden qualitativen Bewertungsmaßstäben anregt. Gleichzeitig kann es zukünftig als Grundlage für vereinfachte Erlaubnisverfahren dienen, z.B. im Europäischen Rechtsraum als sogenanntes *Deklaratives Standardszenario* [8] oder in Deutschland als Erweiterung der vereinfachten Erlaubnisverfahren im Rahmen der *Gemeinsamen Grundsätze des Bundes und der Länder* [3]. Analog zu den Überlegungen zum Bodenrisiko [1] soll das Betriebsrisiko mit Hilfe der wichtigsten Prädiktoren quantitativ vorhergesagt werden.

Berücksichtigt man neben der vermuteten Vorhersagekraft dieser Einflussfaktoren auch deren Verfügbarkeit in Zwischenfallberichten, erscheinen für die vorliegende Arbeit der Betriebsort (Flughafennähe, Kontrollzone, urbanes/ländliches Umfeld) und die Startmasse des unbemannten Fluggeräts als vielversprechendste Einflussfaktoren.

Während Flughafennähe und die Frage, ob der Betrieb in einer Kontrollzone stattfindet, sich ebenfalls in den einschlägigen qualitativen Bewertungsverfahren wiederfinden [2, 3], soll im Rahmen dieser Ausarbeitung darüber hinaus ein besonderes Augenmerk auf das urbane Umfeld gelegt werden. Dies soll der Annahme Rechnung tragen, dass mit Bezug auf den untersten Luftraum die Flugdichte bemannter Luftfahrzeuge in Städten vermutlich größer ist als im ländlichen Umfeld (z.B. durch Rettungs- oder Polizeieinsätze).

Zur Verfolgung eines quantitativen Ansatzes für das Luftrisiko ist das den traditionellen Risikobewertungsverfahren üblicherweise zugrundeliegende *Bow-Tie-Modell* nur indirekt anwendbar, da das zentrale Element *Hazard* schwierig sinnvoll zu definieren ist. Nimmt man zum Beispiel, wie in SORA, den unkontrollierten Betriebszustand als *Hazard* an, ergeben sich je nach Art dieses unkontrollierten Betriebszustands völlig unterschiedliche Vorhersagen für die daraus resultierende Kollisionsrate und Letalität. So ist zum Beispiel der Betriebszustand eines unbekanntes Fluggeräts mit einfachem Steuersignalausfall für die Betrachtung des Luftrisikos keineswegs genauso gefährlich wie eine unabsichtliche Annäherung mit einem bemannten Luftfahrzeug, obwohl beide Zustände als *unkontrolliert* bezeichnet werden können.

Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird ein alternatives Risikomodell vorgestellt, das auf einer empirisch hergeleiteten *Basisrate* von Kollisionen unbemannter Fluggeräte mit bemannten Luftfahrzeugen aufbaut.

Unter Zuhilfenahme von statistischen Drohnenzwischenfall-Auswertungen (zur Methodik siehe Unterkapitel 3.1) wird die Basisrate $n_{default}$ in Abhängigkeit der Luftraumkategorie $cat_{a/s}$ mit einem Anpassungsfaktor $f^*(cat_{a/s})$ multipliziert, um den

Einfluss des Betriebsortes entsprechend abzubilden:

$$(1) \quad n_{hit} = n_{default} f^*(cat_{a/s})$$

A-priori wird der Betriebsort entsprechend der vermuteten Flugdichte bemannter Luftfahrzeuge (und dem damit verbundenen Luftrisiko) in Tabelle 1 kategorisiert.

$cat_{a/s}$	Flugplatz-nähe	CTR	Urban	Anteil Bevölkerung [9]
1a	< 1,5 km	ja		0,3%
1b	1,5 km bis 5 km	ja		2,2%
2	außerhalb	ja		15,4%
3a	< 1,5 km	nein		1,3%
3b	1,5 km bis 5 km	nein		9,9%
4	außerhalb	nein	ja	54,7%
5	außerhalb	nein	nein	16,2%

Tabelle 1 – A-priori-Kategorisierung des Luftraums in Abhängigkeit des Betriebsortes.

Die Trefferwahrscheinlichkeit n_{hit} führt nach Multiplikation mit der Letalität bei Kollision² $k_{let|hit}$ zur Gesamtletalität n :

$$(2) \quad n = n_{hit} n_{let|hit}$$

Diese Überlegungen zur Modellbildung werden in Abbildung 1 grafisch zusammengefasst.

3 LUFTRISIKO-MODELL

3.1 Basisrate

Die inoffizielle Unfallstatistik des *Aviation Safety Network* (ASN) dokumentierte bis Oktober 2018 weltweit bisher 14 Kollisionen von unbemannten Fluggeräten und bemannten Luftfahrzeugen [10]. Davon endete eine Kollision zwischen einem Modellflugzeug und einem Motorseglers tödlich für zwei Insassen des letztgenannten (zu den Details siehe [11]). Für den untersten Luftraum – also im Bereich unterhalb von 150 Metern über Grund – sind bisher zwei Kollisionen bekannt, von denen keine tödlich endete. Auch wenn die Daten nicht von

² Während diese Letalität im analogen Fall der GRC tatsächlich eine Wahrscheinlichkeit darstellt (wird eine Person getroffen, kann auch nur maximal eine Person getötet werden), ist hier eine Opferzahl gemeint, die auch größer als 1 sein kann. Daher wurde n und nicht p als Variablenname verwendet.

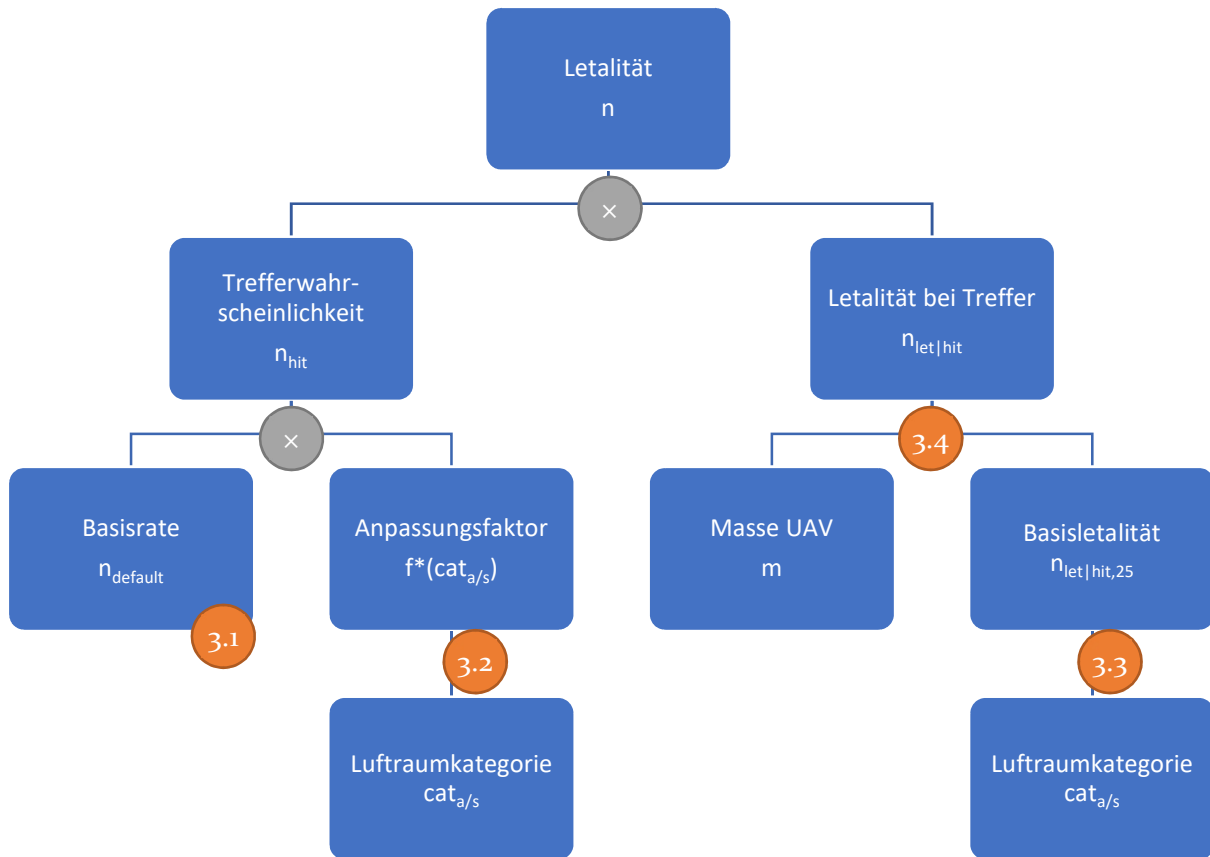


Abbildung 1 - Hierarchische Darstellung der Einflussfaktoren der Gesamtleletalität n mit Bezug auf das Luftrisiko beim Betrieb von unbemannten Fluggeräten. Mit \otimes markiert sind Multiplikationen, während die übrigen Zusammenhänge in den orange hervorgehoben (●) Unterkapiteln näher beschrieben werden.

offizieller Seite bestätigt sind, kann man aufgrund des großen öffentlichen Interesses davon ausgehen, dass das Dunkelfeld im Bereich der Kollisionen – insbesondere bei tödlichem Ausgang – voraussichtlich sehr klein oder gar nicht vorhanden ist. Vor dem Hintergrund der geschätzt mehr als 5 Millionen unbemannten Fluggeräte, die alleine 2016 und 2017 weltweit verkauft wurden [12], wird im Rahmen dieser Arbeit bis zum 15. Oktober 2017, dem Stichtag der ASN-Daten, von einer Gesamtbetriebszeit im besonders intensiv genutzten untersten Luftraum von mehr als 10 Millionen Stunden ausgegangen.

Auswertungen von Monte-Carlo-Simulationen einer dänischen Studie ergeben eine *Unmitigated Midair Collision Rate* von einer Kollision pro 1.000.000 Betriebsstunden außerhalb der Umgebung von Flugplätzen [13]. Eine darauf basierende erste Vermutung kann also lauten, dass bei einem *gewöhnlichen* Betrieb im untersten Luftraum pro Betriebsstunde das Risiko von $n = 10^{-6}$ Kollisionen pro

Betriebsstunde nicht überschritten wird. Ein rechtsseitiger Signifikanztest unter Berücksichtigung der ASN-Daten bestätigt diese Vermutung unter Ablehnung der Nullhypothese

$$(3) \quad H_0: n \geq 10^{-6}$$

mit der Flugstundenzahl

$$(4) \quad n_{fh} = 10.000.000$$

und der Anzahl der tatsächlichen Kollisionen

$$(5) \quad n_{hit|total} = 2$$

auf einem Signifikanzniveau von

$$(6) \quad p < 0,01.$$

Dies führt zu der thesenleitenden Vermutung, dass der *gewöhnliche* Betrieb von unbemannten Fluggeräten mit ebenjenem Risiko, nämlich

$$(7) \quad n_{default} = 10^{-6}$$

Kollisionen pro Betriebsstunde behaftet ist.

Die Merkmale eines *gewöhnlichen* Betriebs lassen sich in einer ersten Annäherung über die

starke Abhängigkeit der Häufigkeit des Betriebs und der Bevölkerungsdichte ($R^2 > 0,9$ aus [14]) ermitteln. Es kann vermutet werden, dass die Verteilung der Häufigkeit des Drohnenbetriebs auf die Luftraumkategorien der Bevölkerungsverteilung (siehe Tabelle 1) entspricht.

Eine weitere wichtige Komponente bei der Definition eines gewöhnlichen Betriebs ist die Qualität des Sicherheitsumfeldes, auf die in Kapitel 0 gesondert eingegangen wird.

Wichtig zu erwähnen ist an dieser Stelle, dass bei Annahme der Basisrate ein Betrieb innerhalb der Sichtweite des Steuerers zugrunde gelegt werden muss, da dies im Erhebungszeitraum zumindest im Rahmen eines legalen Betriebs tatsächlich der Regelfall gewesen sein sollte. In jedem Fall stellt diese Annahme eine konservative Betrachtungsweise für den Betrieb innerhalb der Sichtweite sicher. Für Flüge außerhalb der Sichtweite eines Steuerers (engl. *beyond visual line of sight*, kurz *BVLOS*) müssen weitere Anpassungen im Modell vorgenommen werden, die im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht weiter erörtert werden.

3.2 Anpassungsfaktor

Eine Auswertung der gemeldeten Fälle im ASN ergibt mit Bezug auf die Zwischenfall-Häufigkeit in den jeweiligen Luftraumkategorien folgendes Bild:

cat _{a/c}	Anzahl	Anteil erwartet	Anteil real	f(cat _{a/s})
1a	119	0,3%	55,6%	185
1b	59	2,2%	27,6%	12,5
2	13	15,4%	6,1%	0,39
3a	0	1,3%	0,0%	0
3b	1	9,9%	0,5%	0,04
4	13	54,7%	6,1%	0,11
5	9	16,2%	4,2%	0,26

Tabelle 2 – Verteilung der Meldungen über Zwischenfälle auf die verschiedenen Luftraumkategorien. Abweichungen der tatsächlichen Anteile zu den zu erwartenden entsprechen dem Anpassungsfaktor $f(\text{cat}_{a/s})$.

Die in Abhängigkeit der Häufigkeit von Drohnenbetrieben zu erwartenden Anteile an der Gesamtmeldezahl weichen deutlich von der tatsächlichen Meldezahl ab. So fand insbesondere eine überwiegende Mehrheit der Meldeereignisse, nämlich rund 93%, in

Kontrollzonen im näheren Umfeld von Flugplätzen statt (Kategorien 1a und 1b). Würde sich die Zahl der Meldungen gleichmäßig auf die Zahl der Drohnenbetriebe verteilen, wäre lediglich ein Anteil von 2,5 % in diesen beiden Luftraumkategorien zu erwarten.

Mit Bezug auf Kontrollzonen und Flugplätze ist das Ergebnis wenig überraschend. Es liegt auf der Hand, dass die höhere Flugdichte der bemannten Luftfahrt maßgeblich für diese Differenz verantwortlich ist. Der aus der Über- bzw. Unterrepräsentation ergebende Anpassungsfaktor $f(\text{cat}_{a/s})$ kann somit als Resultat der Flugdichte bemannter Luftfahrzeuge gedeutet werden.

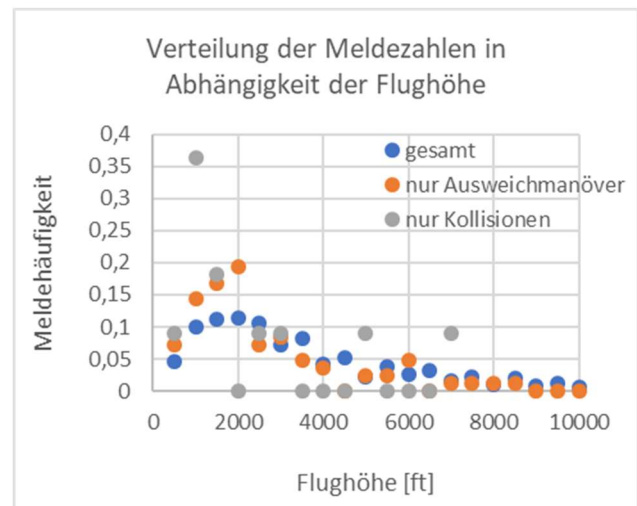


Abbildung 2 – Vergleich der Gesamtmeldezahlen mit denjenigen, wo ein Dunkelfeld kaum zu erwarten ist (Fälle, bei denen Ausweichmanöver notwendig wurde oder solche, bei denen es zur Kollision kam), hier am Beispiel der Flughöhe.

Durchaus berechtigt wäre an dieser Stelle zweifelsohne auch die Bemerkung, dass dabei auch andere Effekte, wie zum Beispiel eine verglichen mit anderen Lufträumen höhere Meldehäufigkeit in Kontrollzonen eine Rolle spielen könnten. Eine Möglichkeit, diese Bedenken zu entkräften, wäre eine ähnliche Auswertung lediglich von Meldungen, bei denen ein geringes bzw. gar kein Dunkelfeld zu erwarten ist, z.B. von Annäherungen, die ein Ausweichen des bemannten Luftfahrzeugs nötig machten oder gar von Kollisionen. Die hier verfügbare Fallzahl (von 9 Zwischenfällen – 7 Annäherungen und 2 Kollisionen – ereigneten sich insgesamt 5 in den Lufträumen 1a und 1b) ist jedoch für eine Aussage in die eine oder andere

Richtung zu gering. Auf weitere statistische Tests diesbezüglich wird daher im Rahmen dieser Ausarbeitung verzichtet.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass das Verteilungsmuster der gesamten Meldungen zumindest mit Blick auf die Flughöhe kaum von denen der Meldungen mit Ausweichmanöver einerseits sowie derer mit Kollisionen andererseits unterscheidbar ist (siehe Abbildung 2). Hier ist die Fallzahl überzeugender: 2760 Fälle enthalten eine Höhenangabe, davon 83 mit Ausweichmanöver und 11 mit Kollision. Die offenkundige Gemeinsamkeit in allen drei betrachteten Unterkategorien könnte darauf hinweisen, dass auch andere Parameter entsprechend ähnlich verteilt sind. Dies spricht wiederum für die gleichmäßige Verteilung des Dunkelfelds und somit auch für die Nutzbarkeit aller Zwischenfallzahlen (statt lediglich der Annäherungs- bzw. Kollisionszahlen).

Bei näherer Betrachtung der ermittelten Anpassungsfaktoren $f(cat_{a/s})$ sind zwei Punkte auffällig:

Zum einen ist die Fallzahl (und somit auch Evidenz) in den Kategorien 3a und 3b nahezu nicht existent. Da die Reihenfolge der Kategorien eine Rangliste des zuvor erwarteten Luftrisikos darstellen, könnte der Wert für einen (korrigierten) Anpassungsfaktor $f^*(cat_{a/s})$ in den beiden fraglichen Kategorien auf den der nächsthöheren Kategorie 2 festgelegt werden, um zumindest den konservativ vermuteten und womöglich kausalen Zusammenhang widerzuspiegeln. In den Kategorien 3a und 3b wird für den Anpassungsfaktor $f^*(cat_{a/s})$ daher jeweils die Zuordnung des Wertes 0,39 vorgeschlagen.

Zum anderen kann die Vermutung einer hohen Flugdichte bemannter Luftfahrzeuge im urbanen Umfeld mit den vorliegenden Daten nicht bestätigt werden. Es zeigt sich sogar eine leicht geringere Gefährdungssituation im urbanen Umfeld verglichen mit ländlichen Gegenden: (Anpassungsfaktor $f(cat_{a/s})$ 0,11 vs. 0,26).

Mögliche Ursachen hierfür sind vielfältig. Einerseits befinden sich urbane Gebiete teilweise in Kontrollzonen und werden in dieser Auswertung nicht weiter als urban berücksichtigt, wodurch der von hoher Bevölkerungsdichte ausgehende Einfluss nicht immer aufgezeichnet wurde.

Außerdem könnte auch eine systematische Verzerrung, zum Beispiel durch die geringere Meldehäufigkeit bei oftmals urban operierenden Polizeihubschraubern, ausschlaggebend sein (auch wenn die zuvor erwähnte Analyse der Flughöhen auf keine systematische Verzerrung hinweist).

Und nicht zuletzt ist es auch möglich, dass zwar eine höhere Flugdichte des bemannten Luftverkehrs existiert, sich dies aber nicht in der Gefährdung widerspiegelt. Zum Beispiel, weil das Ausmaß der höheren Flugdichte zu gering ist oder weitere, zurzeit nicht weiter erklärbare Effekte das Ergebnis beeinflussen.

Jedenfalls lässt das Ergebnis vor dem Hintergrund lediglich 25 dokumentierter Fälle jedoch auch keinen – mit Bezug zum ursprünglich erwarteten kausalen Zusammenhang – gegenteiligen Effekt in der Praxis erwarten. Daher soll für die Bestimmung eines korrigierten Anpassungsfaktors $f^*(cat_{a/s})$ angenommen werden, dass es für das ermittelte Luftrisiko irrelevant ist, ob der Betrieb in Kategorie 4 oder 5 stattfindet. Analog zum obigen Vorgehen einer konservativen Abschätzung wird daher der Wert 0,26 für den Anpassungsfaktor $f^*(cat_{a/s})$ in beiden Kategorien vorgeschlagen.

Eine diese beiden Effekte berücksichtigende Gegenüberstellung der a-priori- und a-posteriori-Einteilung der Luftraumkategorien und der entsprechenden Anpassungsfaktoren findet sich in Tabelle 3.

Formal gilt also:

$$(8) \quad f^*(cat_{a/s}) = \begin{cases} 185 & cat_{a/s}^* = I \\ 12,5 & cat_{a/s}^* = II \\ 0,39 & cat_{a/s}^* = III \\ 0,26 & cat_{a/s}^* = IV \end{cases}$$

3.3 Basisletalität

Angesichts der nichtvorhandenen quantitativen Studien – aber durchaus qualitativen Vermutungen [7] – zu dieser Frage, wird im Folgenden vereinfachend vermutet, dass die Todesfallzahl pro Kollision proportional zur Personenzahl an Bord und somit abhängig vom Typ des kollidierenden Luftfahrzeugs ist. Diese Argumentation folgt den Überlegungen, die den Festlegungen von Zielsicherheitsstufen – z.B. durch die FAA [15] – , zugrunde liegen, nämlich

dass der Schutz von Linienflugzeugen um den Faktor 100 höher ausfallen sollte als der Schutz der restlichen Luftfahrt, was im Wesentlichen den Verhältnissen der Personenzahl an Bord entspricht. Nicht berücksichtigt ist bei dieser Vereinfachung, dass Linien-Luftfahrzeuge tendenziell einen höheren Schutz gegenüber Kollisionen von kleinen Objekten (z.B. Vogelschlag) aufweisen als die Allgemeine Luftfahrt. Für die Basisletalität $n_{let|hit,25}$ – die vermutete Letalität die ein 25-Kilogramm schweres unbemanntes Fluggerät bei einer Kollision verursacht – bedeutet dies, dass sie von dem zu erwartenden bemannten Kollisionsgegner abhängig ist.

cat _{a/s}	f(cat _{a/s})	cat* _{a/s}	f*(cat _{a/s})
1a	185	I	185
1b	12,5	II	12,5
2	0,39		
3a	0	III	0,39
3b	0,04		
4	0,11		
5	0,26	IV	0,26

Tabelle 3 – Übersicht über die Luftraumkategorien und Anpassungsfaktoren vor und nach Berücksichtigung der Auffälligkeiten in den empirisch ermittelten Daten.

Eine konservative Annahme könnte nun lauten, dass Linienflugzeuge als Kollisionsgegner genau dann angenommen werden, wenn das unbemannte Fluggerät in den Luftraumkategorien 1a oder 1b operiert. Dafür sprechen einerseits die ASN-Daten, bei denen von 71 Fällen mit Linienflugzeug-Beteiligung lediglich einer außerhalb von den Kategorien 1a und 1b stattfand. Andererseits ist ein legaler Betrieb von Linienflugzeugen unterhalb von 150 Metern lediglich innerhalb von 5 Kilometern denkbar, da Platzrunden in unmittelbarer Nähe zur Landebahn sowie An- und insbesondere Abflüge außerhalb von 5 Kilometern oberhalb von 150 Metern stattfinden.

Nimmt man an, dass es bei einer Kollision mit einer 25-Kilogramm-schweren Drohne in einem Zehntel der Fälle zu einem Totalverlust des bemannten Luftfahrzeugs kommt und dass pro Totalverlust eines Linienflugzeugs bzw. sonstigen Luftfahrzeugs 100 Personen bzw. 1

Person ums Leben kommt, kann die Basisletalität mit

$$(9) \quad n_{let|hi,25} = \begin{cases} 10 & \text{cat}_{a/s}^* = I \text{ oder } II \\ 0,1 & \text{sonst} \end{cases}$$

beschrieben werden.

3.4 Einfluss der Masse auf die Letalität bei Treffer

Die Frage, wie genau die Masse des unbemannten Fluggeräts die Wahrscheinlichkeit eines Absturzes bei Kollision eines bemannten Luftfahrzeugs mit ebenjenem beeinflusst, kann im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht präzise beantwortet werden. Dazu wären extensive Simulationen und Versuchsreihen unter Realbedingungen notwendig.

Es liegt jedoch auf der Hand, dass mit kleiner werdender Masse die Gefährlichkeit des unbemannten Fluggeräts abnimmt, bis sie beim trivialen, wenn auch hypothetischen Fall einer Drohne ohne Masse gänzlich verschwindet.

Wenn die Basisletalität bei einer Masse des unbemannten Fluggeräts von genau 25 Kilogramm Anwendung findet, soll im Folgenden – ohne weitergehendes Wissen über die genauen Zusammenhänge – der Einfachheit halber für die massenabhängige Letalität bei Treffer $n_{let|hit}$ der lineare Zusammenhang

$$(10) \quad n_{let|hi} = \frac{n_{let|hit,25} m [kg]}{25}$$

angenommen werden, was Abbildung 3 visualisiert.

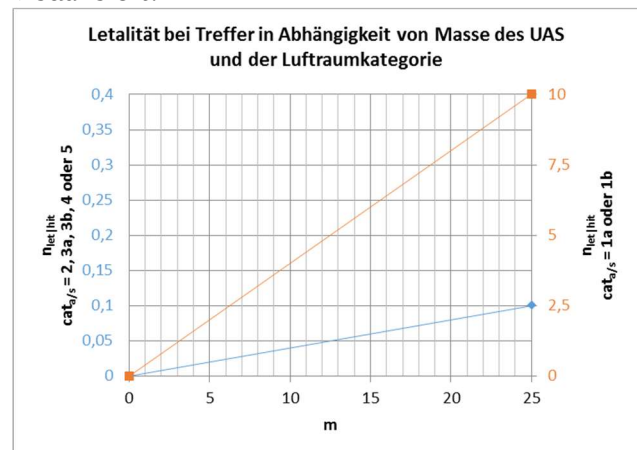


Abbildung 3 – Einfluss der Masse m des unbemannten Fluggeräts auf die Letalität beim Betrieb in unterschiedlichen Luftraumkategorien.

		Kategorie des Betriebsorts			
		IV außerhalb von Kontrollzonen, nicht in Flugplatznähe	III entweder in Kontrollzonen oder in Flughafennähe (nicht beides)	II in Flughafennähe, aber nicht in unmittelbarem Flughafenumfeld	I in unmittelbarem Flughafenumfeld
	Basisletalität	0,1	0,1	10	10
	Anpassungsfaktor	0,26	0,39	12,5	185
Masse [kg]	0,1	9	9	6	5
	0,25	9	9	5	4
	0,5	9	9	5	4
	1	8	8	5	4
	2	8	8	5	3
	5	8	8	4	3
	10	7	7	4	3
	15	7	7	4	2
	20	7	7	4	2
	25	7	7	3	2

Tabelle 4 – Sicherheitszahl N in Abhängigkeit von Masse des unbemannten Fluggeräts und der Kategorie des Betriebsorts. Anwendungsbeispiel: Eine 5-Kilogramm-schwere Drohne, die in unmittelbarer Flughafennähe ($cat_{a/c} = II$) betrieben wird, verursacht (für gewöhnlich) pro Betriebsstunde ein Todesfallrisiko von 1:1.000 oder 10^{-3} .

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Durch Einsetzen von (7) und (8) in (1) sowie ferner (1) und (10) in (2) ergibt sich für die Letalität und somit das intrinsische Risiko

$$(11) \quad n [h^{-1}] = 10^{-6} \cdot \frac{m[kg]}{25} \cdot \left\{ \begin{array}{l} 1850 \quad cat_{a/s}^* = I \\ 125 \quad cat_{a/s}^* = II \\ 0,039 \quad cat_{a/s}^* = III \\ 0,026 \quad cat_{a/s}^* = IV \end{array} \right\}$$

Unter Berücksichtigung der Konvention aus [1],

$$(12) \quad A_x = -\log_{10} a_x,$$

kann in Abhängigkeit des Betriebsorts und der Masse des unbemannten Fluggeräts eine Sicherheitszahl N abgeleitet werden (zur Methodik siehe [1]), die das intrinsische Risiko für Personen in bemannten Luftfahrzeugen widerspiegelt. Tabelle 4 fasst exemplarisch verschiedene Fälle zusammen.

Mithilfe dieser Sicherheitszahl kann eine erste quantitative Einschätzung des Luftrisikos erfolgen. Vorteile dieser quantitativen Betrachtungsweise gegenüber den qualitativen Verfahren, z.B. in SORA und SORA-GER, wurden bereits in der Vorgängerarbeit zum Bodenrisiko erläutert [1]. Hinzu kommt hier aber auch noch eine gewisse Kompatibilität zu neueren Erkenntnissen bezüglich BVLOS-Betriebe, die auf einem probabilistischen – und

somit quantitativen – Modell der *Situational Awareness* beruhen [16]. Interessant wäre an dieser Stelle zu wissen, wie die ermittelten Werte für das Luftrisiko mit denen des Bodenrisikos in Verbindung zu bringen sind. Zunächst erscheint Tabelle 4 nicht unmittelbar mit ihrem Pendant hinsichtlich der GRC (siehe [1]) vergleichbar, da in jener das Risiko pro Out-of-control-Szenario, in der vorliegenden Ausarbeitung das *gewöhnliche* Risiko pro Betriebsstunde betrachtet wird.

Beim Versuch, eine Vergleichbarkeit herzustellen und den gewöhnlichen Betrieb einem Sicherheitsumfeld zuzuordnen, kann wiederum die ASN-Statistik bemüht werden. Dabei lässt sich feststellen, dass den allermeisten Meldungen vermutlich ein verbotener Betrieb vorausging. Dies wird insbesondere dadurch deutlich, dass lediglich etwa ein Zehntel der Fälle mit Höhenangaben im untersten Luftraum und davon nur 7% außerhalb der Kategorien I und II stattgefunden haben. Bei allen anderen Fällen ist angesichts der weltweiten Rechtslage davon auszugehen, dass sie höchstwahrscheinlich illegal durchgeführt wurden, da sich in den Berichten keinerlei Hinweise zu (ohnehin selten erteilten) Ausnahmeerlaubnissen finden lassen.

Qualität des Sicherheitsumfeldes (regulatorisch oder selbst auferlegt)		Sicherheitszahl (GRC) F_{00c}	Sicherheitszahl (ARC) F_{ARC}
niedrig	keine besonderen Regularien		0
mittel	Kennzeichnungspflicht, Kenntnissnachweis (§21e), spezielle Regularien für unbemannte Fluggeräte		1
hoch	Registrierung, Kenntnissnachweis (§21d), Gerät entspricht gewissen Mindeststandards, Erlaubnispflichtiger Betrieb, traditioneller Modellflug)		2
sehr hoch	U-Space, Einzelerlaubnis, Steuererlaubnis, technischer Nachweis zur Ausfallrate		3
militärische unbemannte Luftfahrt [17]			4
private bemannte Luftfahrt [18, 19]			5
kommerzielle bemannte Luftfahrt [18, 19]			6

Tabelle 5 – Vergleich der Sicherheitszahlen mit Bezug auf Boden- und Luftrisiko

Dies kann so interpretiert werden, dass für die Methodik in dieser Arbeit der Begriff des *gewöhnlichen* Flugbetriebs mit dem Betrieb in einem niedrigen Sicherheitsumfeld (keine besonderen Regularien) in [1] vergleichbar ist. Es spricht darüber hinaus nichts dagegen, dass sich ein höheres Sicherheitsumfeld auf GRC und ARC gleichermaßen auswirkt, sodass die durch das Umfeld definierten Sicherheitszahlen F_{00c} und F_{ARC} trotz des unterschiedlichen Ursprungs identisch sind (siehe Tabelle 5).

Dies bedeutet, dass somit nicht nur das Luftrisiko absolut quantifizierbar ist (Wie viel Risiko ist mit einer bestimmten Drohne an einem bestimmten Betriebsort zu erwarten?), sondern es kann auch unmittelbar durch Abgleich der jeweiligen Sicherheitszahl-Tabellen mit dem entsprechenden Bodenrisiko in Bezug gesetzt werden. Vergleicht man konkret Tabelle 3 in [1] mit Tabelle 4 der vorliegenden Arbeit, wird Folgendes deutlich:

Das *Worst-Case-Szenario* hinsichtlich des Luftrisikos (Betrieb in unmittelbarer Flughafennähe) ist gerade einmal genauso gefährlich wie (oder sogar weniger gefährlich als) der Betrieb desselben unbemannten Fluggeräts über einer lockeren Menschenansammlung (z.B. Fußballspiel in der Kreisliga).

Das Luftrisiko beim Betrieb eines unbemannten Fluggeräts in den Luftraumkategorien III und IV ist (unabhängig von der Masse des unbemannten Fluggeräts oder der Bevölkerungsdichte) gegenüber dem Bodenrisiko sogar insgesamt von

nachgeordneter Bedeutung. Zu bedenken ist dabei, dass das Bodenrisiko in der zitierten Ausarbeitung bereits deutlich weniger konservativ betrachtet wird als frühere Annahmen, wie zum Beispiel der 80-Joule-Regel, (zurückgehend auf [20]).

Überspitzt formuliert bedeutet das: Liegen keine besonderen Umstände mit Bezug auf die Flugdichte unterhalb einer Flughöhe von 150 Metern vor (z.B. in der Nähe von Flughäfen, An- bzw. Abflugrouten von Rettungshubschraubern oder Segelfluggeländen) muss mit Blick auf die Risikobewertung lediglich das Bodenrisiko berücksichtigt werden, weil das Luftrisiko gegenüber dem Bodenrisiko vernachlässigbar ist. Dies steht in fundamentaler Opposition zur ARC-Betrachtung von SORA unterhalb von 150 Metern, bei der eine entsprechende Vernachlässigung des Luftrisikos nur beim Betrieb in einem sogenannten *Atypical Airspace* möglich ist [2]. Eine Auflösung des Widerspruchs beider Ansätze könnte dadurch möglich sein, dass bei einer Flughöhe unterhalb von 150 Metern **ausschließlich** die schon angesprochenen, von der bemannten Luftfahrt besonders intensiv genutzten Bereiche **nicht** als *Atypical Airspace* angesehen würden. Diese regelrechte Beweislastumkehr hätte zur Folge, dass der Großteil des Luftraums unterhalb von 150 Metern als *atypical* gelten würde, was zumindest der eigentlichen Wortbedeutung nicht gerecht würde. Andererseits wird in der deutschen Erlaubnispraxis bereits heute verhältnismäßig unaufgeregt vorgegangen, wenn man die hinsichtlich des Luftrisikos eher

liberalen Auffassungen der Allgemeinverfügungen gemäß den Gemeinsamen Grundsätzen [3] und der DFS Deutschen Flugsicherung GmbH [4] betrachtet. Dies scheint angesichts von quasi nicht-existenten Zwischenfallberichten, die auf legale Flüge unterhalb einer Flughöhe von 150 Metern zurückzuführen sind, zumindest in Deutschland gleichwohl gerechtfertigt. Die Vorteile einer solchen Betrachtungsweise liegen auf der Hand. Für entsprechende Allgemeinverfügungen liegt somit eine risikobasierte und zudem quantitative Rechtfertigung vor.

Letztendlich bleibt festzuhalten, dass es erste deutliche Hinweise darauf gibt, dass das Gesamtrisiko beim Betrieb unterhalb von 150 Metern größtenteils durch das Bodenrisiko bestimmt wird. Es kann vermutet werden, dass das Luftrisiko beim Betrieb kleinerer unbemannter Fluggeräte unterhalb einer Flughöhe von 150 Metern bei SORA – mit Ausnahme der Fälle in Flughafennähe – systematisch überschätzt wird, was zudem zu einer internen Inkonsistenz mit der *Open Category* führt, die kaum risikomindernde Maßnahmen in diesem Bereich vorsieht.

5 GRENZEN

Aufgrund der eingangs erwähnten schwierigen Evidenzlage im Bereich der von unbemannten Fluggeräten ausgehenden Risiken auf die bemannte Luftfahrt, stellen die hier präsentierten Ergebnisse lediglich einen ersten Schritt zur Ermittlung des Einflusses der relevanten Prädiktoren dar. Begründete, aber quantitativ unzureichend abgesicherte Annahmen, wie der Zusammenhang zwischen Masse und Letalität bei Treffer bedürfen weiterer Untersuchungen. Ebenfalls noch ungesichert sind die empirischen Erkenntnisse dieser Arbeit, die Aussagen über die Flugdichte bemannter Luftfahrzeuge nur indirekt zulassen. Konkrete Flugdichteanalysen unterhalb von 150 Metern Flughöhe können hier weiteren Erkenntnisgewinn liefern.

Eingeschränkt ist das Modell definitionsgemäß auch insofern, als dass lediglich der Betrieb innerhalb der Sichtweite betrachtet wird. Nicht enthalten sind alle risikorelevanten

Auswirkungen eines BVLOS-Betriebs, auch weil die aktuelle Datenlage diesbezüglich noch unzureichend ist. Vielversprechend diesbezüglich erscheint jedoch die neuere Studienlage [16], die – ebenfalls quantitativ – die Unterschiede zwischen den Betriebsarten innerhalb und außerhalb der Sichtweite herausarbeitet.

Ein weiterer einschränkender Aspekt ist die große Anzahl an Meldungen in Kontrollzonen und in Flughöhen größer als 150 Meter. Dies zeigt, dass als Hauptursachen für Zwischenfälle Unkenntnis, Fahrlässigkeit oder Vorsatz angenommen werden können. Darauf wird auch in einer finnischen Studie [14] hingewiesen:

The conclusion from this is that lack of regulation is not the real problem, but rather general knowledge of the rules [...] or people are ignoring the rules.

Größte Schwäche der vorliegenden Arbeit ist daher die Tatsache, dass aus hauptsächlich illegalen Aktivitäten Rückschlüsse auf einen regulären Drohnenbetrieb gezogen werden. Darüber tröstet zumindest hinweg, dass das Risiko dadurch vermutlich systematisch überschätzt wird.

Abgesehen von den in dieser Arbeit genauer betrachteten betriebspezifischen Charakteristika der Operation (Masse, Betriebsort) muss zur Sicherstellung eines risikoarmen Betriebsumfeldes also vor allem dafür gesorgt werden, dass einerseits die existierenden Regeln bei den Steuerern bekannt sind und andererseits deren Einhaltung kontrolliert werden kann. Dieses Sicherheitsumfeld (siehe Tabelle 5) ist von zentraler Bedeutung für die Einschätzung des Luftrisikos und Bodenrisikos gleichermaßen. Daher sollte zukünftig ein besonderes Augenmerk auf die Schaffung eines sicheren Umfelds durch Transparenz der Regularien, ein hohes Sicherheitsverständnis bei den Steuerern und erweiterte Kontrollmöglichkeiten der Gefahrenabwehr- und Strafverfolgungsbehörden gelegt werden.

6 LITERATUR

- [1] Phiesel, D.; Moormann, D.: Bewertung des Bodenrisikos beim Betrieb von kleinen unbemannten Fluggeräten. Ein einfacher und quantitativer Ansatz. Bonn 2018.
- [2] Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems: JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment. SORA 2017.
- [3] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Gemeinsame Grundsätze des Bundes und der Länder für die Erteilung von Erlaubnissen und die Zulassung von Ausnahmen zum Betrieb von unbemannten Fluggeräten gemäß § 21a und § 21b Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO). NfL 1-1163-17 2017.
- [4] DFS Deutsche Flugsicherung GmbH: Allgemeinverfügung zur Erteilung von Flugverkehrskontrollfreigaben zur Durchführung von Flügen mit Flugmodellen und unbemannten Luftfahrtsystemen in Kontrollzonen von Flugplätzen nach § 27d Abs. 1 LuftVG an den internationalen Verkehrsflughäfen mit DFS-Flugplatzkontrolle. NfL 1-1197-17.
- [5] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine: Assessing the Risks of Integrating Unmanned Aircraft Systems (UAS) into the National Airspace System. Washington, D.C. 2018.
- [6] Washington, A.; Clothier, R. A.; Silva, J.: A review of unmanned aircraft system ground risk models. In: Progress in Aerospace Sciences 95 (2017), S. 24-44.
- [7] National Institute for Aviation Research: ASSURE UAS Airborne Collision Severity Evaluation Final Report.
URL: <http://www.assureuas.org/projects/deliverables/sUASAirborneCollisionReport.php>.
Abrufdatum 16.10.2018.
- [8] European Aviation Safety Agency: Opinion 01/2018. Unmanned aircraft system (UAS) operations in the 'open' and 'specific' categories 2018.
- [9] DFS Deutsche Flugsicherung GmbH: Bevölkerungsverteilung in Deutschland und Anzahl der im Bereich der CTRs lebenden Menschen, E-Mail (2018).
- [10] Aviation Safety Network: Drone Database. Stand: 15. Oktober 2017.
- [11] Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung: Untersuchungsbericht. 3X306-1/2/97 1999.
- [12] Gartner Press Release: Gartner Says Almost 3 Million Personal and Commercial Drones Will Be Shipped in 2017. URL: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2017-02-09-gartner-says-almost-3-million-personal-and-commercial-drones-will-be-shipped-in-2017>.
Abrufdatum 16.10.2018.
- [13] La Cour-Harbo, A.; Schiøler, H.: Probability of low altitude midair collision between general aviation and unmanned aircraft: Risk Analysis (22.07.2018).
- [14] Hohtari, H.; Pentti, K.: Risk-based approach to developing unmanned aviation in Finland 2017.
- [15] FAA Sponsored "Sense and Avoid" Workshop: Sense and Avoid (SAA) for Unmanned Aircraft Systems (UAS) 2013.
- [16] McAree, O.; Aitken, J. M.; Veres, S. M.: Quantifying situation awareness for small unmanned aircraft. In: The Aeronautical Journal 122 (2018) 1251, S. 733-46.
- [17] North Atlantic Treaty Organization: Qualification and Structural Design Guidelines for Military Unmanned Air Vehicles. STO Technical Report, TR-AVT-174.
- [18] Dalamagkidis, K.; Valavanis, K. P.; Piegl, L. A.: Evaluating the risk of unmanned aircraft ground impacts: 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, 2008. MED '08 ; 25 - 27 June 2008, Ajaccio, Corsica, France ; conference proceedings. Piscataway, NJ 2008.
- [19] National Transportation Safety Board: Review of U.S. Civil Aviation Accidents 2010.
- [20] Rohne, H.: Schiesslehre für Infanterie unter besonderer Berücksichtigung des Gewehrs 98 mit S-Munition der Maschinengewehre und der Schiessvorschrift für die Infanterie 1906.