

BEWERTUNG DES BODENRISIKOS BEIM BETRIEB VON KLEINEN UNBEMANNTEN FLUGGERÄTEN 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 Personen am Boden durch den Betrieb von kleinen unbemannten Fluggeräten (Bodenrisiko, engl. *ground risk class*, GRC) vorgestellt. Basis dafür sind Auswertungen aktueller empirischer Untersuchungen sowie theoretische, die flugmechanischen Eigenschaften der Fluggeräte betreffende Überlegungen.

Es wird dargelegt, dass eine Operationalisierung der Bewertung von Risikofaktoren mit vertretbarem Aufwand auch quantitativ umsetzbar ist. Im Gegensatz zu den etablierten qualitativen Methoden können somit die Risiken durch den Betrieb von unbemannten Fluggeräten transparenter ermittelt werden. Dabei wird das Gesamtrisiko sehr einfach als Addition von drei Sicherheitszahlen abgebildet, die jeweils die zum Risiko beitragenden Faktoren unmittelbar und nachvollziehbar widerspiegeln.

Darauf basierend wird ein einfaches Modell für die Bewertung des Bodenrisikos entwickelt, das ausschließlich die wichtigsten und leicht zu bestimmenden Prädiktoren berücksichtigt. Insbesondere wird, basierend auf flugmechanischen Zusammenhängen, empirisch dargelegt, dass allein die Masse des kleinen unbemannten Fluggeräts andere Prädiktoren wie charakteristische Fläche, Maximalgeschwindigkeit, aerodynamische Endgeschwindigkeit und somit auch die maximale kinetische Energie und die daraus resultierende Letalität bei Aufprall auf einen Menschen hinreichend präzise abbildet. Im Zusammenspiel mit der Personendichte kann somit das Risiko für Personen am Boden durch lediglich diese zwei Faktoren antizipiert werden. Mit diesem Ansatz kann die gängige, aber nicht mit tatsächlichen Opferzahlen in Einklang zu bringende 80-Joule-Regel für eine Bewertung des Bodenrisikos ersetzt werden.

KEYWORDS

Luftfahrt; unbemanntes Fluggerät; UAV; Drohne; Risikobewertung; Bodenrisiko; GRC; SORA; 80-Joule-Regel

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

1 EINLEITUNG

Unbemannte Fluggeräte haben das Potential, die Luftfahrt zu revolutionieren. Insbesondere kleine Geräte bieten neben ihren verhältnismäßig geringen Betriebskosten schier unendlich viele Einsatzmöglichkeiten [1]. Zur effektiven Integration dieser neuen Form der Luftfahrt in die bestehenden Strukturen ist vor dem Hintergrund eines risikobasierten Ansatzes eine fundierte Risikobewertung maßgeblich, und zwar nicht nur für die Akzeptanz dieser neuen Betriebsform, sondern vor allem für die Sicherheit von unbeteiligten Dritten in der Luft und am Boden. Die *Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems* (JARUS) erarbeiten weltweit anerkannte Empfehlungen zur sicheren Durchführung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten. Das im Sommer 2017 veröffentlichte *Specific Operations Risk Assessment* (SORA, zur Verdeutlichung des internationalen Charakters nachfolgend auch als *SORA-INT* bezeichnet) [2] hat sich zu einem geflügelten Wort und einem etablierten Standard für die Bewertung von Risiken im Zusammenhang mit dem Betrieb unbemannter Fluggeräte entwickelt.

Das Hauptaugenmerk von *SORA-INT* liegt jedoch nicht auf kleinen unbemannten Fluggeräten, was eindrücklich an der intrinsischen GRC-Tabelle der *SORA-INT* sichtbar wird [2]: Hier werden mit Bezug auf die kinetische Energie vier Unterkategorien erstellt, von denen lediglich zwei für die Unterscheidung der alltäglichen Fälle (Startmasse unter 25 Kilogramm) in Frage kommen. Eine Differenzierung zwischen üblichen Betriebsarten ist dabei nahezu nicht mehr gegeben und de facto nur durch die Unterscheidung kleiner oder größer als 700 Joule möglich. Es widerspricht der Logik bisheriger Genehmigungsverfahren in Deutschland und der Alltagserfahrung, dass ein Absturz eines handelsüblichen Quadrocopters ein ähnliches oder gar das gleiche Risiko mit sich bringt wie ein Absturz eines 25 Kilogramm schweren Geräts²³.

² DJI Inspire, $m = 4 \text{ kg}$; $c_w = 0,5$; $A = 0,05 \text{ m}^2$; $E_{\text{kin}} \approx 2800 \text{ Joule}$;

³ Multicopter, $m = 25 \text{ kg}$; $c_w = 0,5$; $A = 0,5 \text{ m}^2$; $E_{\text{kin}} \approx 14000 \text{ Joule}$; in beiden Fällen: freier Fall aus Schwebeflug 100 Meter über der Erdoberfläche unter Berücksichtigung der Newton-Reibung und ohne den Einfluss von statischem Auftrieb.

Aus Sicht Deutschlands wurde dieses Problem durch die Einführung eines auf deutsche Belange abzielendes *SORA-GER* [3] gelöst, das hauptsächlich kleinere Geräte adressiert und dadurch ohne große Komplexität innerhalb des Bewertungsverfahrens auskommt. Dieser deutsche Sonderweg, der gewissermaßen auch als *SORA light* bezeichnet werden kann, weicht allerdings in Teilbereichen vom internationalen Standard *SORA-INT* ab, weil *SORA-GER* lediglich auf ebenjenen Betrieb kleinerer Geräte abzielt. Ohne subjektive Experteneinschätzung und die damit einhergehenden Probleme kommt es allerdings nicht aus (siehe Kapitel 2).

Angesichts der bislang nicht vorhandenen Todesfälle am Boden [4] im Zusammenhang mit unbemannten Fluggeräten über viele Jahre und vermutlich Millionen Flugstunden hinweg, stellt sich zudem die Frage, ob der mitunter beträchtliche Aufwand, den die existierenden Risikobewertungsverfahren mit sich bringen, gerechtfertigt ist. Eine kürzlich veröffentlichte Meta-Studie [5] bewertete unterschiedliche GRC-Modelle, die momentan in einer Vielzahl von Staaten eingesetzt werden. Die Autoren kamen zum Schluss, dass das Vorherrschen von kaskadierenden, größtenteils sehr konservativen Annahmen und eine inadäquate Behandlung von Unsicherheiten in unnötig einschränkenden Regularien resultieren. Als Hauptforderung für weiterführende Studien empfehlen sie:

Such models are needed to support more transparent, systematic, and consistent regulatory decision making; necessary for the development of justifiable regulations that have a clear and traceable relationship to the safety risks they are intended to manage.

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

2 MODELLBILDUNG

Die fachliche Einschätzung von Risiken durch eine Gruppe von Experten spielt bei aktuellen Risikobewertungsmethoden wie *SORA-INT* und *SORA-GER* eine zentrale Rolle. Maßgebliche Risikokennzahlen werden in Arbeitsgruppen

Qualität des Sicherheitsumfeldes (regulatorisch oder selbst auferlegt)		Wahrscheinlichkeit eines Out-of-control-Szenarios [h^{-1}]	Sicherheitszahl F_{OOC}
		f_{OOC}	F_{OOC}
niedrig	keine besonderen Regularien	10^0	0
mittel	Kennzeichnungspflicht, Kenntnissnachweis (§21e), spezielle Regularien für unbemannte Fluggeräte	10^{-1}	1
hoch	Registrierung, Kenntnissnachweis (§21d), Gerät entspricht gewissen Mindeststandards, Erlaubnispflichtiger Betrieb, traditioneller Modellflug)	10^{-2}	2
sehr hoch	U-Space, Einzelerlaubnis, Steuererlaubnis, technischer Nachweis zur Ausfallrate	10^{-3}	3
militärische unbemannte Luftfahrt [6]		10^{-4}	4
private bemannte Luftfahrt [7, 8]		10^{-5}	5
kommerzielle bemannte Luftfahrt [7, 8]		10^{-6}	6

Tabelle 1 – Quantifizierung der Wahrscheinlichkeit eines Out-of-control-Szenarios in Abhängigkeit der betrieblichen Umstände. Zum Vergleich aufgeführt sind bekannte Out-of-control-Wahrscheinlichkeiten aus anderen Bereichen der Luftfahrt (grau unterlegt). Die Tabelle dient einer Veranschaulichung der zugrundeliegenden Idee einer Quantifizierung der beeinflussenden Faktoren. Die Beschreibungen und entsprechenden Zahlenwerte spiegeln aktuelle Überlegungen (grau unterlegt: empirische Unfallzahlen) wider; es wird allerdings kein Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit erhoben.

erarbeitet und entsprechen den auf Erfahrung basierenden Annahmen der Experten. Der Vorteil dieser Herangehensweise ist eine nachvollziehbare und effektive, modelbasierte Bewertung bestehender Risiken und beitragender Faktoren. Dabei werden jedoch lediglich Rangordnungen aufgestellt, z.B. *größere Startmasse entspricht größerem Risiko für Personen am Boden*. Die Abstände zwischen den Kategorien nehmen eine untergeordnete Rolle ein, weil mithilfe dieses qualitativen Vorgehens kaum eine solch präzise Unterteilung möglich ist. Die Experten sind sich darüber einig, dass mit größer werdender Masse prinzipiell das Risiko ansteigt, nicht aber, wie stark dieser Risikoanstieg ausgeprägt ist.

Bei einem Bewertungsverfahren, das mit Addition und Subtraktion von Risikokennzahlen arbeitet, muss nach klassischer Messtheorie mindestens ein Intervallskalenniveau vorliegen [9]. Das Einteilen in Rangordnungen entspricht aber lediglich einem Ordinalskalenniveau, weshalb Addition und Subtraktion der einzelnen Werte nicht korrekt durchgeführt werden können. Mit diesem formellen Problem geht die Schwierigkeit einher, dass das alleinige Abstellen auf Annahmen von Experten subjektiv, schwierig reproduzierbar und nahezu unmöglich falsifizierbar ist. Auch wenn die gängigen Verfahren bereits gezeigt haben, dass sie die Risiken erfolgreich beschreiben können, sind sie methodisch angreifbar und auch mit Blick auf zukünftige Entwicklungen schwer anzupassen, da zwar ein

probabilistisches Grundgerüst existiert (vgl. [2]), dieses aber kaum mathematisch nachvollziehbar erweiterbar ist. Die Verwendung eines quantitativen Verfahrens, das sich direkt auf das zu erwartende Risiko bezieht, in der Lage, dieses Problem aufzulösen. Zur Einschätzung des Risikos müssen Schadensstatistiken, Literaturwerte und zusätzlich auch die heute bereits verwendeten Experteneinschätzungen gesamtheitlich genutzt werden. Bei der Berechnung von Risiken im Allgemeinen und der Verwendung des Bow-Tie-Modells (vgl. z.B. [2]) im Besonderen werden Wahrscheinlichkeiten und erwartete Schadensmaße multipliziert, um einen resultierenden Erwartungswert zu erhalten. Die bei Risikoangaben übliche Zehnerpotenz-Schreibweise (Beispiel: 10^{-6} für 1:1.000.000) kann unter Zuhilfenahme der Potenzregeln dazu genutzt werden, eine Multiplikation von Wahrscheinlichkeiten als Addition von Kennziffern darzustellen. Alle im Bow-Tie-Modell vorkommenden Faktoren können durch Betrachtung der negativen Exponenten wie gewohnt addiert, bzw. subtrahiert werden.

Diese negativen Exponenten stellen demnach *Sicherheitszahlen* dar, die durch geeignete Anwendung von *harm barriers* und *threat barriers* erhöht werden, um das Risiko auf einen akzeptablen Wert zu reduzieren; dies kann gewissermaßen als eine Art *Sicherheitspunkte-Sammeln* aufgefasst und auch durch weniger versierte Anwender intuitiv nachvollzogen werden. Für

die linke Seite des Bow-Tie-Modells und die darin modellierte Wahrscheinlichkeit eines Out-of-control-Szenarios wird dieses Konzept der Sicherheitspunkte in Tabelle 1 exemplarisch aufgezeigt.

Für die konkrete Modellierung eines quantitativen Verfahrens ergibt es in einem ersten Schritt Sinn, einen Maximalwert für ein Risiko festzulegen, um die beitragenden Faktoren diesbezüglich in Korrelation setzen zu können. Bei SORA-INT wird ein akzeptables Risiko von 10^{-6} Todesfällen pro Betriebsstunde eines unbemannten Luftfahrtgeräts angenommen [2]. Auf die grundsätzliche Problematik, die eine Wahl nicht nur dieses Schwellenwerts (vgl. Weibels [10] und Dalamagkidis' [7] Empfehlung von 10^{-7} Todesfällen pro Betriebsstunde), sondern auch der Einheit (Anzahl der Verletzten⁴ vs. Todesfälle bzw. Anzahl der Aufstiege vs. Betriebsstunde) mit sich bringt, sei an dieser Stelle zwar ausdrücklich hingewiesen; dennoch soll sie im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht weiter diskutiert werden, weil sie den zu Grunde liegenden Ansatz nicht beeinflusst. Gerade die Wahl eines quantitativen Verfahrens bietet die Möglichkeit, Änderungen nach dem Prinzip der konstruktiven Falsifikation durchzuführen, wenn Wahrscheinlichkeiten oder eben Schwellenwerte nicht mehr plausibel erscheinen, empirisch widerlegt oder aufgrund des gesellschaftlichen Diskurses abgelehnt werden. Da SORA-INT zumindest als internationaler Standard konzipiert ist, wird der dort vorgeschlagene Wert samt Einheit in der vorliegenden Arbeit übernommen.

SORA-INT [2] formalisiert die Mortalität eines Drohnenbetriebs mit

$$(1) \quad n_{mort} = f_{ooc} n_{hit|ooc} p_{let|hit}$$

und folgt damit den gängigen Überlegungen der Literatur (vgl. z.B. [10]). Formal lassen sich risikomindernde Maßnahmen wie folgt einführen:

$$(2) \quad n_{mort} = f_{ooc} \tilde{n}_{hit|ooc} \tilde{p}_{let|hit} p_{mit}$$

Definiert man das intrinsische Risiko mit

$$(3) \quad n_{int} = \tilde{n}_{hit|ooc} \tilde{p}_{let|hit}$$

⁴ Im Rahmen dieser Arbeit wird von einer starken Korrelation von Todesfällen und Anzahl der Verletzten bei Unfällen von unbemannten Fluggeräten ausgegangen, wodurch indirekt Fälle von Personenschäden ohne Todesfall mitbetrachtet werden.

erhält man

$$(4) \quad n_{mort} = f_{ooc} n_{int} p_{mit}$$

Die Umwandlung der Faktoren in eine Sicherheitszahl lässt sich durch Einführung der Definition: Die Sicherheitszahl A_x ist der negative dekadische Logarithmus des entsprechenden Faktors a_x in der Mortalitätsgleichung, formal

$$(5) \quad A_x = -\log_{10} a_x$$

herstellen (vgl. auch die Definition des pH-Werts in der Allgemeinen Chemie). Dies und die Vorgabe, dass die Mortalität den Wert von 10^{-6} pro Betriebsstunde nicht überschreiten darf, führen uns zu

$$(6) \quad N_{mort} = F_{ooc} + N_{int} + P_{mit} \geq 6,$$

wodurch das zugrundeliegende mathematische Äquivalent des hier vorgestellten Modells abgebildet wird.

Neben dieser konkreten quantitativen Bewertung ist Einfachheit eine weitere grundlegende Anforderung an die Modellbildung von Risiken unbemannter Fluggeräte. Dass sich eine große Komplexität nicht notwendigerweise als zielführend bei der Erstellung von Erklärungsmodellen herausstellen muss, wurde bereits durch den mittelalterlichen Philosophen Wilhelm von Ockham postuliert [11]. Das als *Ockhams Rasiermesser* bekannte Sparsamkeitsprinzip hat sich bis heute in vielen Bereichen der Naturwissenschaft bewährt und gilt zweifellos als erprobtes und nützliches Hilfsmittel der Theoriefindung [12].

Mit der ockhamschen Regel verbunden ist die Forderung, für jeden Untersuchungsgegenstand eine möglichst einfache Erklärung anzuerkennen. Eine größer werdende Komplexität der Erklärungsversuche ist nur durch einen (deutlichen) Erkenntnisgewinn zu rechtfertigen.

Auch bei der psychologischen Entscheidungsfindung haben sich sogenannte Heuristiken, also einfache Denkstrategien für effizientere Urteile und Problemlösungen, als besonders effektiv herausgestellt. Diese Heuristiken versuchen nicht, Parameter optimal an eine gegebene Umgebung anzupassen; vielmehr liegen besonders einfache Denkstrukturen zugrunde. Obwohl die Komplexität einer solchen Entscheidungsfindung besonders niedrig ist, erweisen sich Strategien mit den selbsterklärenden Namen

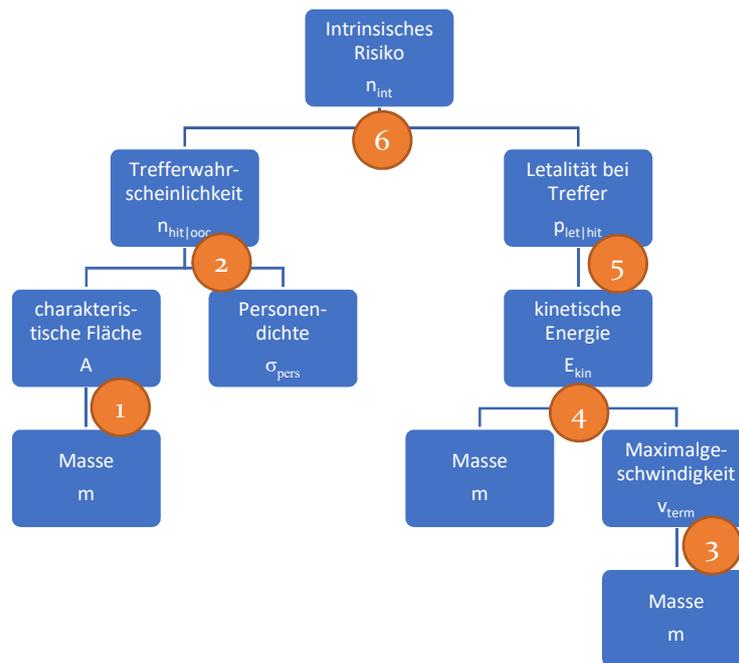


Abbildung 1 - Hierarchische Darstellung der Einflussfaktoren des intrinsischen Bodenrisikos n_{int} beim Betrieb von unbemannten Fluggeräten. Die hervorgehobenen Zahlenwerte geben die Reihenfolge der Betrachtung dieser Faktoren in der vorliegenden Ausarbeitung an.

Take the Best oder *One-Reason Decision Making* im Ergebnis teilweise sogar als überlegen im Vergleich zu etablierten komplexeren Alternativen [13]. Durch die Aufnahme lediglich weniger wichtiger Risikofaktoren kann bereits ein Großteil des Zusammenhangs dieser zu dem Gesamtrisiko aufgeklärt werden. Gemäß Pareto-Prinzip [14] ist zu erwarten, dass bereits eine kleine Anzahl von Faktoren ein Großteil des Risikos erklären kann. Darüber hinaus ist das Konzept der Sparsamkeit ein wichtiger Bestandteil der Bayesschen Statistik [15], welche ihrerseits ein unverzichtbares Werkzeug für die Abschätzung von Risiken darstellt.

Die gut gemeinte, aber letztendlich sinnlose Verkomplizierung von Regeln zur Erhöhung der Sicherheit wird humorvoll in einem Comic des Physikers Randall Munroe am Beispiel der Passwortstärke auf den Punkt gebracht [16]. Die Pflicht zur Nutzung von Kombinationen der Groß- und Kleinschreibung, von Sonderzeichen und Ziffern haben lediglich dazu geführt, dass Nutzer der Sicherheit abträgliche Maßnahmen ergreifen, um der Komplexität Herr zu werden. Die einfache Regel, wähle vier zufällige Wörter aus dem Wörterbuch und bilde daraus das Passwort, ist sowohl einfach als auch – mathematisch nachprüfbar – sicher.

Ein weiteres Argument für die Einführung von einfachen Regeln ist die Akzeptanz durch die Steuerer von unbemannten Fluggeräten: Je einfacher ein Modell zur Bestimmung des Betriebsrisikos ist, desto eher ist mit einer Kooperation der Steuerer-Gemeinschaft zu rechnen; was sich wiederum durch eine stärkere Einhaltung der Regeln und gegenseitige Kontroll- und Aufklärungsmechanismen positiv auf die Gesamtsicherheit auswirken kann. Für die konkrete Modellierung des Risikos durch den Betrieb kleiner unbemannter Fluggeräte werden daher zwei arbeitsleitende Kernthesen angenommen:

1. Ein intuitiv einfaches, quantitatives Modell beschreibt die real existierenden Risiken für Personen am Boden mindestens so gut wie SORA-INT.
2. Durch die Aufnahme lediglich weniger wichtiger Risikofaktoren wird bereits ein Großteil des Gesamtrisikos aufgeklärt.

3 GRC-MODELL

Nachfolgend wird mithilfe der in Kapitel 2 dargelegten Grundsätze ein risikobasiertes Modell zur Bewertung der Gefahren für Personen am Boden angewendet.

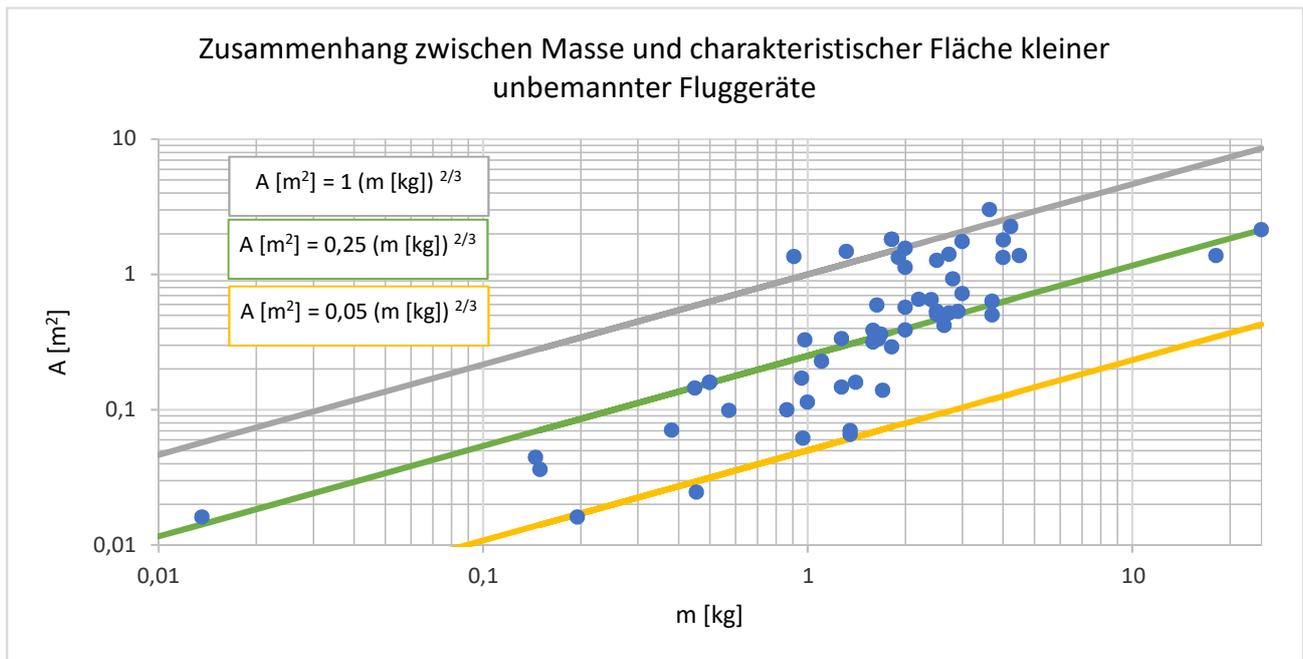


Abbildung 2 – Funktionenschar mit unterschiedlichen Koeffizienten zur Darstellung der Abhängigkeit der charakteristischen Fläche von der Masse. Die zugrundeliegenden Daten stammen aus [18]. Für kleine unbemannte Fluggeräte nähert die grüne Regressionskurve mit dem Faktor 0,25 den aus flugmechanischen Überlegungen vermuteten Zusammenhang (Wurzelkubikgesetz) gut an.

Zentral für die Bestimmung dieses Risikos ist die voraussichtliche Anzahl von Todesfällen, die pro Out-of-control-Szenario ums Leben kommen (n_{int}). Als out-of-control wird hier eine Situation verstanden, die nicht mehr von außen kontrollierbar und möglicherweise den Tod von Personen am Boden zur Folge haben könnte (Absturz). Nicht gemeint ist hier ein lediglich degradiertes Flugzustand.

Die Mortalität ist gemäß (3) zusammengesetzt aus den beiden Faktoren

- Anzahl der getroffenen Personen pro Out-of-control-Szenario (Unterkapitel 3.1 und 3.2)
- Wahrscheinlichkeit, bei einem solchen Treffer ums Leben zu kommen (Unterkapitel 3.3 bis 3.5)

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der das Risiko bestimmenden Parameter in hierarchischer Form sowie die Reihenfolge der in diesem Kapitel behandelten Vorhersageparameter zur Konstruktion des Bodenrisiko-Modells.

3.1 Charakteristische Fläche als Funktion der Masse

Unter Berücksichtigung des in Kapitel 2 beschriebenen Sparsamkeitsprinzips soll die für die

Trefferwahrscheinlichkeit⁵ relevante charakteristische Fläche als Funktion der Masse beschrieben werden. Über flugmechanische Ähnlichkeitsbeziehungen (vgl. Wurzelkubikgesetz [17]) lassen sich die Abhängigkeiten

$$(7) \quad m \sim V \sim l^3,$$

$$(8) \quad A \sim l^2$$

und schließlich

$$(9) \quad A \sim m^{\frac{2}{3}}$$

ermitteln. Abbildung 2 zeigt diesen Zusammenhang vor dem Hintergrund tatsächlicher Spezifikationen von kleinen unbemannten Fluggeräten [18]. Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird aufgrund der guten Annäherung der entsprechenden Kurve für die charakteristische Fläche Folgendes zugrunde gelegt:

$$(10) \quad A[m^2] = 0,25(m[kg])^{\frac{2}{3}}$$

⁵ Korrekter wäre hier der Begriff *Anzahl der getroffenen Personen*, da auch mehrere Personen gleichzeitig getroffen werden können, was das Modell auch ausdrücklich zulässt. Aufgrund der besseren Verständlichkeit wird in dieser Ausarbeitung dennoch *Trefferwahrscheinlichkeit* verwendet.

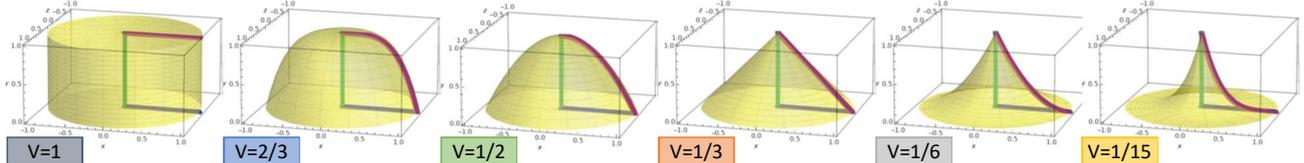
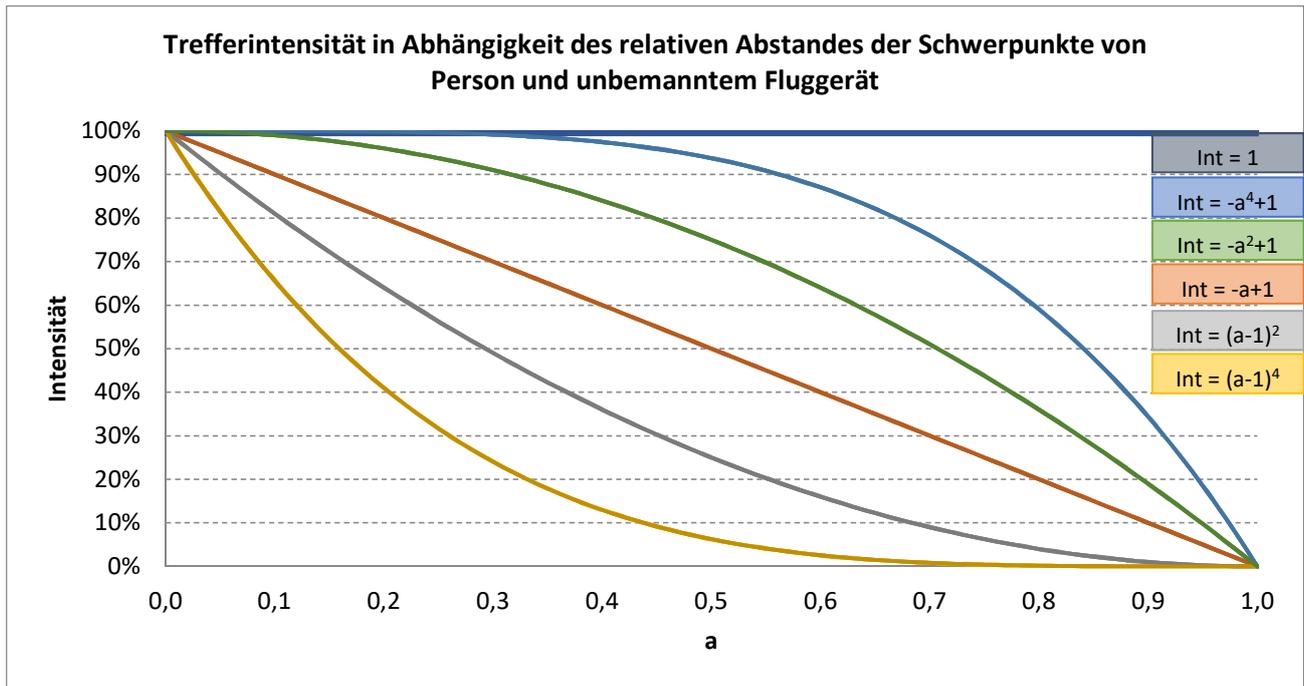


Abbildung 3 –Trefferintensität in Abhängigkeit zum relativen Schwerpunktabstand zwischen unbemanntem Fluggerät und getroffener Person. In Dunkelblau ist der Zusammenhang innerhalb des Lethal-Area-Ansatzes dargestellt, während alle weiteren Polynomialkurven als Vermutungen für eine realistischere Abbildung des genannten Zusammenhangs gesehen werden können. Dabei ist die Letalität proportional zum Volumen desjenigen Körpers, der durch Rotation der Abhängigkeitsfunktion um die Ordinatenachse entsteht. Im Vergleich zum konservativen Lethal-Area-Konzept (Zylinder mit dem Volumen 1) ergeben die vermutlich realistischere Abhängigkeiten deutlich geringere Letalitätswerte.

3.2 Trefferwahrscheinlichkeit

Zur Ermittlung der Trefferwahrscheinlichkeit wird die Dichte der sich im Freien aufhaltenden Personen mit der Trefferfläche multipliziert, die sich wiederum aus der charakteristischen Fläche und der Querschnittsfläche einer Person ergibt (vgl. Quellen):

$$(11) \quad \tilde{n}_{hit|ooc} = \sigma_{pers} A_{hit}$$

Aufgrund der geringen Masse kleiner unbemannter Fluggeräte kann davon ausgegangen werden, dass Gebäude und Gebäudeteile⁶ durch einen Absturz dieser nicht oder nur sehr unwahrscheinlich so beschädigt werden, dass die sich im Gebäude befindlichen Personen einer Gefahr ausgesetzt werden.

Weiterhin soll zur Vermeidung der in Kapitel 1 kritisierten Überkompensation von Unsicherhei-

ten durch konservative Annahmen an dieser Stelle von einem senkrechten Sturz des Fluggeräts ausgegangen werden, sodass A_{hit} durch die Kreisfläche

$$(12) \quad A_{hit} = \pi(r_{pers} + r)^2$$

mit dem Personenradius (vgl. [19])

$$(13) \quad r_{pers} = 0,164m$$

und dem charakteristischen Radius des unbemannten Fluggeräts

$$(14) \quad r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

beschrieben werden kann. Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung von (10) für die Trefferwahrscheinlichkeit schließlich:

⁶ Studien zur Widerstandsfähigkeit von Fahrzeugen gegenüber Drohnenabstürzen stehen noch aus.

Szenario	inner-orts/außerorts	Überfliegen von einzelnen Menschen	Dichte der Menschenansammlung	anzunehmende Personendichte [km ⁻²]
außerorts	außerorts	nur zügig	Betrieb nicht erlaubt (nur gemäß 1:1-Regel)	10
innerorts	inner-orts/außerorts	nur zügig	Betrieb nicht erlaubt (nur gemäß 1:1-Regel)	100
im Innenbereich einer Großstadt	inner-orts/außerorts	ja	Betrieb nicht erlaubt (nur gemäß 1:1-Regel)	1000
in der Nähe von, aber nicht über Menschenansammlungen	inner-orts/außerorts	ja	Betrieb in der Nähe, jedoch nicht direkt darüber erlaubt	10000
über lockerer Menschenansammlung	inner-orts/außerorts	ja	locker (Fußballspiel, Kreisliga)	100000
über mäßig dichter Menschenansammlung	inner-orts/außerorts	ja	mäßig (Dorffest)	1000000
über extrem dichter Menschenansammlung	inner-orts/außerorts	ja	extrem dicht (Musikkonzert)	10000000

Tabelle 2 – Anzunehmende Personendichten in Abhängigkeit unterschiedlicher Szenarien und damit einhergehender Nebenbestimmungen.

$$(15) \quad \tilde{n}_{hit|ooc}(m, \sigma_{pers}) = \sigma_{pers} [m^{-2}] \pi \left(0,164 + \sqrt{\frac{0,25(m[kg])^{\frac{2}{3}}}{\pi}} \right)^2$$

Diese Vereinfachung wird trotz konservativerer Herangehensweisen innerhalb der einschlägigen Literatur (vgl. Zusammenfassung in [20]) durch die nachfolgenden Erkenntnisse rechtfertigt:

1. Der Kopf ist voraussichtlich der am meisten gefährdete Körperteil des Menschen. Im Modell eines seitlichen Treffers wäre ein großer Teil der Trefferfläche auf den Körper gerichtet, sodass bei kleinen unbemannten Fluggeräten lediglich eine geringe Wahrscheinlichkeit für den Tod der getroffenen Person besteht.
2. Seitliche Treffer von kleinen unbemannten Fluggeräten (auf den Kopf) sind nicht so gefährlich wie senkrechte Treffer [21].
3. Eine konservative Modellierung durch eine sogenannte *lethal area* (z.B. in [2]) berücksichtigt mögliche besondere Eigenschaften und Absturzauswirkungen, die für kleine unbemannte Fluggeräte untypisch oder zumindest äußerst unwahrscheinlich sind. Darunter fallen zum Beispiel die Explosionsfähigkeit oder das Erzeu-

gen von tödlichen Trümmerteilen, die ihrerseits weiter entfernte Personen erreichen können.

4. Für die Schadenswirkung bei einem Aufprall kann aufgrund von mechanischen Überlegungen von folgenden Annahmen mit Bezug auf die Schwerpunktabstände von unbemanntem Fluggerät und getroffener Person ausgegangen werden: Die Schadenswirkung bei einem Aufprall ist maximal, wenn das unbemannte Fluggerät die Person zentral trifft (relativer Abstand $a = 0$), nimmt mit größer werdendem Abstand ab und ist nicht mehr existent, wenn die Person vom unbemannten Fluggerät gerade eben noch getroffen bzw. gestreift wird ($a = 1$). Wie genau sich dieser Zusammenhang beschreiben lässt, ist zwar (noch) nicht bekannt, die Annahme, dass die Schadenswirkung am Rande der Trefferfläche so hoch ist wie bei einem zentralen Treffer, kann jedoch nicht als zutreffend bezeichnet werden. Abbildung 3 zeigt diese und der Realität näherkommende Annahmen über den Zusammenhang zwischen Schwerpunktabstand und Trefferintensität. Die durch einen Absturz eines unbemannten Fluggeräts entstehende Letalität ist proportional zum Volumen eines durch eben jene Abhängigkeit beschriebenen Rotationskörpers. Bereits bei linearem Zusammenhang der Trefferintensität zum Schwerpunktabstand

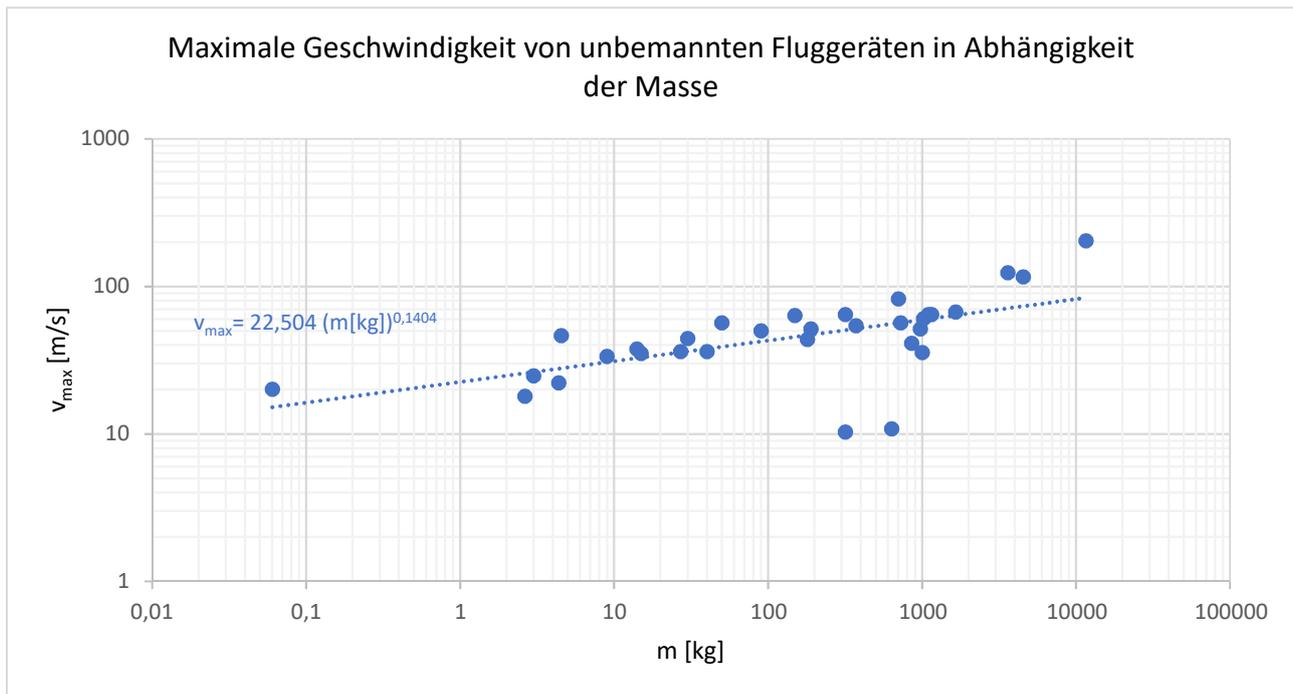


Abbildung 4 - Zusammenhang zwischen Masse und Maximalgeschwindigkeit von unbemannten Fluggeräten [10]. Der Exponent in der Regressionsgleichung bestätigt die Annahme $v \sim m^{1/6}$, die aus flugmechanischen Überlegungen abgeleitet wird.

überschätzt die konservative Lethal-Area-Methode die Letalität um den Faktor 3.

Diesen Tatsachen wird in der vorliegenden Arbeit qualitativ insofern Rechnung getragen, als dass lediglich die einfache und weniger konservative Annäherung der Trefferfläche wie in (12) beschrieben berücksichtigt wird.

Die Modellierung der Personendichte soll ebenfalls möglichst einfach gestaltet werden. Im Idealfall kann die Personendichte des überflogenen Gebiets ermittelt oder zumindest sinnvoll abgeschätzt werden. Dabei sollte ebenfalls Abstand von kaskadierenden konservativen Annahmen genommen werden. Wird ein unbemanntes Fluggerät etwa genau an der Grenze einer Menschenmenge betrieben, sollte berücksichtigt werden, dass sich auf der anderen Seite der Menschenmenge weniger oder gar keine Menschen befinden können. Dies bedeutet, dass der strategischen Planung des Überflugs eine nicht zu unterschätzende Rolle zukommt.

Tabelle 2 liefert eine quantitative Klassifikation der Personendichte in Abhängigkeit der jeweiligen Betriebsszenarien. Nebenbestimmungen sorgen dafür, dass keine überkonservativen Annahmen diesbezüglich getroffen werden müssen. Besondere Beachtung sollte diesbezüglich die Anwendung der sogenannten 1:1-Regel zukom-

men (vgl. [3]), die eine einfache und effektive Maßnahme zur Einhaltung eines Sicherheitsabstandes darstellt [22]. Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle erwähnt, dass der Überflug von Infrastruktur – insbesondere von vielbefahrenen Straßen – zwar noch nicht berücksichtigt wurde, potentiell aber ebenfalls in dieses Schema eingeordnet werden kann. Zukünftige Arbeiten in diese Richtung können sicherlich dazu beitragen, das vorliegende Modell zu erweitern.

3.3 Masse als Prädiktor der Maximalgeschwindigkeit

Bei der Betrachtung der durch den Betrieb von unbemannten Fluggeräten verursachten Risiken für Personen am Boden lässt sich das intrinsische Risiko gemäß SORA-INT durch die charakteristische tödliche Fläche des Fluggeräts sowie das jeweilige Betriebsszenario ermitteln [2]. Diese *lethal area* wird unmittelbar mit einer charakteristischen Länge oder alternativ mit einer charakteristischen kinetischen Energie des Fluggeräts in Verbindung gesetzt. Diese qualitative Anwendung des flugmechanischen Allometrieprinzips (siehe analog Unterkapitel 3.1) ist zwar schlüssig, lässt aber die Frage offen, warum ausgerechnet Länge oder kinetische Energie als zentrale Faktoren herangezogen werden; zumal die quantitativen, empirisch ermittelten oder

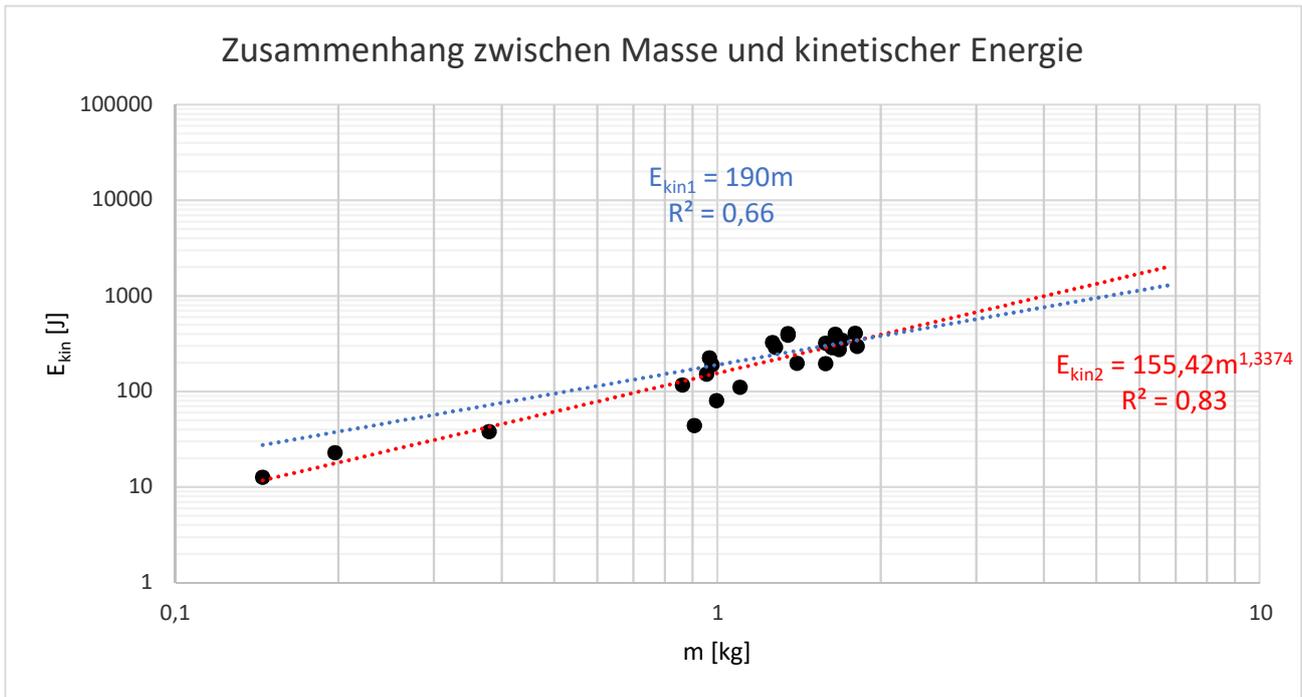


Abbildung 5 - Vergleich der beiden Regressionsgleichungen für den Zusammenhang zwischen Masse und kinetischer Energie kleinerer Multicopter. Die Rohdaten stammen aus [10]. Im Vergleich zu der in der Studie angenommenen linearen Regression E_{kin1} liefert die Annäherung in Potenzform E_{kin2} ein besseres Ergebnis mit Hinblick auf den Regressionskoeffizienten R^2 . Der dabei resultierende Exponent 1,3374 liegt dabei sehr nah am theoretischen Wert $4/3$.

theoretisch abgeleiteten Beziehungen in der Regel nicht transparent aufgezeigt werden. Näher läge die analoge Verwendung der Masse des Fluggeräts, da diese bei der Klassifikation von Luftfahrzeugen traditionell herangezogen wird und zudem einfach zu ermitteln ist. Empirisch lässt sich ein klarer Zusammenhang zwischen der Masse eines kleinen unbemannten Fluggeräts und dessen operationelle (v_{max}) sowie aerodynamische (v_{term}) Maximalgeschwindigkeiten herstellen. Ersteres geht aus Abbildung 4 hervor. Bemerkenswert ist die Übereinstimmung des Exponenten in der Regressionsgleichung

$$(16) \quad v_{max} \left[\frac{m}{s} \right] = 22,504(m[kg])^{0,1404}$$

mit der theoretischen Vorhersage, die sich aus nachfolgenden flugmechanischen Zusammenhängen ergibt.

Setzt man ein konstantes Schub-Gewichts-Verhältnis voraus, gilt

$$(17) \quad v_{max} \sim v_{term}$$

Für die aerodynamische Maximalgeschwindigkeit v_{term} ergibt sich aus dem Kräftegleichgewicht für den freien Fall in der Nähe der Erd-

oberfläche ohne den Einfluss von statischem Auftrieb

$$(18) \quad mg - \frac{1}{2} \rho v_{term}^2 AC_d = 0$$

nach Umformung

$$(19) \quad v_{term} = \sqrt{\frac{2mg}{\rho A C_d}}$$

Mithilfe von (9) bedeutet dies für die Maximalgeschwindigkeiten eine Abhängigkeit von der Masse in der Form

$$(20) \quad v_{max} \sim v_{term} \sim \sqrt{\frac{m}{\frac{2}{\rho A C_d}}} = m^{\frac{1}{2}}$$

Auch wenn diese auf flugmechanischen Zusammenhängen basierende Herleitung bisher in der Literatur für unbemannte Fluggeräte nicht beschrieben wurde, lassen sich für den Exponenten in (20) und darüber hinaus auch für den Vorfaktor in (16) bestätigende empirische Auswertungen finden, beispielsweise in [23]:

$$(21) \quad v_{max} \left[\frac{m}{s} \right] \approx 20,398(m[kg])^{0,1893}$$

3.4 Vorhersage der kinetischen Energie

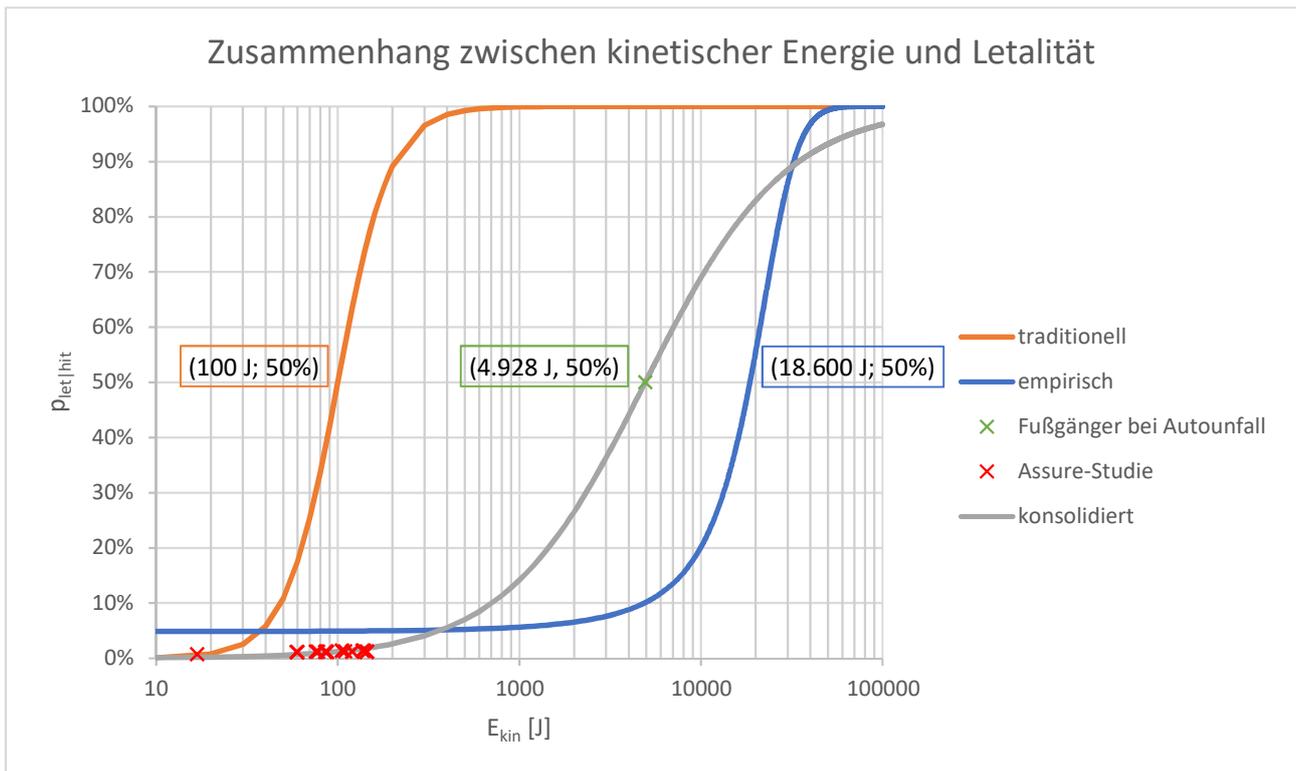


Abbildung 6 - Verschiedene Zusammenhänge zwischen der kinetischen Energie und der erwarteten Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine am Boden befindliche Person bei einem entsprechenden Aufprall stirbt. Die orangefarbene Kurve zeigt den traditionellen Ansatz [27] und unterscheidet sich grundlegend von energiebasierten Auswertungen von Arbeitsunfällen [29] (blaue Kurve). In der vorliegenden Ausarbeitung wird die Nutzung einer konsolidierten Version des Zusammenhangs zwischen kinetischer Energie und Letalität angewandt, wobei empirisch ermittelte Zusammenhänge aus Straßenverkehrsunfällen [28] und Ergebnisse einer Freifallstudie [18] berücksichtigt werden. Bei Letzteren wird in dieser Arbeit angenommen, dass ein AIS-Wert von 5 eine Letalität von 30% mit sich bringt (rote Punkte). Die Ordinate des mit einem grünen Kreuz markierten Punktes entspricht einer Letalität von 50%, während die Abszisse genau der kinetischen Energie entspricht, die ein unbemanntes Fluggerät bei einer solchen Geschwindigkeit hat, die bei Kraftfahrzeug-Fußgänger-Unfällen zu eben jener Letalität von 50% führt, was einer konservativen Abschätzung der Letalität von unbemannten Fluggeräten entspricht.

Mit der in 3.3 ermittelten Abhängigkeit der maximalen Geschwindigkeiten von der Masse ist der Weg zur kinetischen Energie über deren Definition

$$(22) \quad E_{kin} = mv^2$$

nicht sonderlich weit. Bemerkenswert ist jedoch, dass auch hier bisher der daraus resultierende Zusammenhang

$$(23) \quad E_{kin}[J] \sim (m[kg])^{\frac{4}{3}}$$

in der einschlägigen Literatur nicht zu finden ist. Dies ist umso erstaunlicher, wenn man bedenkt, dass ein scheinbar linearer Zusammenhang zwischen Masse und kinetischer Energie bei unbemannten Fluggeräten empirisch bereits ermittelt [18], aber der oben formulierte Zusammenhang mit den zugrundeliegenden aerodynamischen Gesetzmäßigkeiten augenscheinlich nicht er-

kannt wurde. Abbildung 5 zeigt beispielhaft, dass aus Literaturwerten eine Potenz-Regression mit dem theoretisch hergeleiteten Wert für den Exponenten eine gute Annäherung an die empirischen Zusammenhänge liefern kann. Um den exakten, theoretisch vorhergesagten Exponenten zu nutzen, wird im Rahmen dieser Ausarbeitung der Ausdruck

$$(24) \quad E_{kin,max}(m)[J] = 155,42(m[kg])^{\frac{4}{3}}$$

verwendet.

3.5 Letalität durch kinetische Energie

Als häufig genannter Standardwert für den Einfluss der kinetischen Energie auf die Letalität existiert die sogenannte 80-Joule-Grenze, deren Ursprung auf die Wundballistik der

		Szenario und Personendichte [km ⁻²]						
		außerorts	innerorts	Großstadt	Menschenansammlung			
		10	100	1000	10000	100000	1000000	10000000
Masse [kg]	0,1	9	8	7	6	5	4	3
	0,25	8	7	6	5	4	3	2
	0,5	8	7	6	5	4	3	2
	1	7	6	5	4	3	2	1
	2	6	5	4	3	2	1	0
	5	6	5	4	3	2	1	0
	10	5	4	3	2	1	0	0
	15	5	4	3	2	1	0	0
	20	5	4	3	2	1	0	0
25	4	3	2	1	0	0	0	

Tabelle 3 – Sicherheitszahl N_{int} in Abhängigkeit von Masse des unbemannten Fluggeräts und der Personendichte des Überfluggebiets. Anwendungsbeispiel: Die zu erwartende Wahrscheinlichkeit, dass ein Mensch bei einem Out-of-control-Szenario (Absturz) einer 10-Kilogramm-schweren Drohne, die außerorts (vgl. Tabelle 2) betrieben wird, ums Leben kommt, beträgt 1:100.000 oder 10^{-5} .

Militärforschung zurückgeht [24]. Dieser Wert findet in Regularien vieler staatlichen und überstaatlichen Institutionen Anwendung, z.B. in Deutschland [25], Österreich [26] und im Entwurfsstadium in der Europäischen Union [27]. Die daraus abgeleitete Letalität (vgl. auch [28]) kann angesichts der Vielzahl an Berichten von Kollisionen unbemannter Fluggeräte mit Personen im Verhältnis zu nicht bekannten Todesfällen [4] als äußerst konservativ bezeichnet werden. Insbesondere im Vergleich mit empirischen Untersuchungen in anderen Bereichen mit Bezug auf das Verhältnis zwischen Geschwindigkeit des Aufpralls und der Letalität zeigt sich, dass bei unbemannten Fluggeräten unrealistisch konservative Annahmen gemacht werden. So ist es unverständlich, warum die Wahrscheinlichkeit zu sterben, bei einem Aufprall einer handelsüblichen 4-Kilogramm-schweren Drohne mit 40 km/h ($E_{kin} \approx 200 \text{ J}$) deutlich über 50% liegt, (Abbildung 6, konservatives Modell), während jedoch empirische Untersuchungen im Straßenverkehr zeigen, dass Fußgänger, die mit der gleichen Geschwindigkeit von einem Kraftfahrzeug getroffen werden, mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 10% ums Leben kommen [29]. Dieses Missverhältnis von vorhergesagter und empirisch gezeigter Letalität kann größtenteils darauf zurückgeführt werden, dass die kinetische Energie des unbemannten Fluggeräts mit der tatsächlich übertragenen, den

menschlichen Körper schädigenden Energie gleichgesetzt oder zumindest in falschen Zusammenhang gebracht wird. Im Fall der Wundballistik ergibt es Sinn von einer großen Übereinstimmung dieser beiden Werte auszugehen, da die kinetische Energie eines Projektils in großem Maße – oder im Falle der Penetration möglicherweise komplett – absorbiert wird. Neuere Erkenntnisse legen allerdings nahe, dass die übertragene Kraft und somit höchstwahrscheinlich auch die Letalität bei einem soliden Körper aus Stahl oder Holz deutlich geringer sind als bei einem Multicopter [18].

Abbildung 6 zeigt den Zusammenhang zwischen kinetischer Energie und Letalität, der empirisch bei Arbeitsunfällen ermittelt wurde [30] im Vergleich zur gängigen konservativen 80-Joule-Annahme bei unbemannten Fluggeräten.

Für die weiteren Berechnungen innerhalb der vorliegenden Ausarbeitung wird der konsolidierte Zusammenhang der Letalität in Abhängigkeit der kinetischen Energie

$$(25) \quad \tilde{p}_{let|hit}(E_{kin}) = \frac{1}{1 + e^{-2,6(\log_{10} E_{kin}[J] - \log_{10} 4928)}}$$

vorgeschlagen, der den folgenden drei Anforderungen genügt:

1. Für die kinetische Energie, die eine Letalität von 50% hervorruft soll gelten:

$$(26) \quad E_{kin,50\%} = \frac{1}{2} m_{max,SUAS} v_{ped,50\%}^2 = 4928 \text{ J},$$

N_{int} aus Tabelle 3	Mindestens benötigte Qualität des Sicherheitsumfeldes, wenn keine (sonstigen) risikomindernden Maßnahmen getroffen werden.		F_{ooc}	$N_{int} + F_{ooc}$ (mindestens)
6 oder höher	niedrig	keine besonderen Regularien	0	6
5	mittel	Kennzeichnungspflicht, Kenntnissnachweis (§21e), spezielle Regularien für unbemannte Fluggeräte	1	
4	hoch	Registrierung, Kenntnissnachweis (§21d), Gerät entspricht gewissen Mindeststandards, Erlaubnispflichtiger Betrieb, traditioneller Modellflug	2	
3	sehr hoch	U-Space, Einzelerlaubnis, Steuererlaubnis, technischer Nachweis zur Ausfallrate	3	

Tabelle 4 – Benötigte Qualität des Sicherheitsumfeldes bei bekanntem intrinsischem Risiko zur Sicherstellung einer maximalen Mortalitätsrate von 10^{-6} pro Betriebsstunde. Die farbige Schattierung der Zeilen entspricht der Farbe der zugeordneten Sicherheitszahl in Tabelle 3. Ist die dort ermittelte Sicherheitszahl für das intrinsische Risiko N_{int} kleiner als 3, sind zwingend weitere risikomindernde Maßnahmen notwendig.

wobei die größtmögliche Masse für kleine unbemannte Fluggeräte definitionsgemäß 25 Kilogramm und die Geschwindigkeit, die bei Unfällen mit Beteiligung von Fußgängern eine Letalität des letztgenannten von 50% hervorruft, 19.8551 m/s beträgt [29]. Hinter dieser Formulierung steckt die konservative Annahme, dass eine Drohne mit 25 Kilogramm Masse beim Aufprall auf einen Menschen keinen größeren Schaden verursacht als ein gleich schnelles Kraftfahrzeug.

2. Ergebnisse aus der ASSURE-Freifall-Studie [18] werden im Modell bestmöglich vorhergesagt (siehe Abbildung 6).

3. Die Vorhersage erfüllt die Bedingung

$$(27) \quad \lim_{E_{kin} \rightarrow 0} p_{let|hit} = 0\%,$$

was durch die Verwendung des (Zehner-) Logarithmus' im Exponenten von (25) erreicht wird. Im vorliegenden Modell nicht enthalten ist das Risiko, durch Rotoren des unbemannten Fluggeräts getötet zu werden. Vor dem Hintergrund, dass die Letalität drehender Teile mit der Länge des Rotorarms [18] und somit indirekt mit der Größe des unbemannten Fluggeräts korreliert, wird bei kleinen unbemannten Fluggeräten an dieser Stelle von einem vernachlässigbaren Beitrag zur Letalität ausgegangen. Dies ist auch hinsichtlich des Sparsamkeitsprinzips der Modellbildung angebracht, da die Einführung neuer Vorhersage-Parameter wie Rotorlänge oder Drehzahl zu einer komplexeren Handhabung des Gesamtmodells führen, mit zweifelhafter Auswirkung auf die Genauigkeit der Risikobewertung.

Ebenso wird bei diesem Schritt der Risikobewertung im Gegensatz zu SORA-INT und SORA-GER der Betrieb außerhalb der Sichtweite nicht adressiert. Dies ist keineswegs darauf zurückzuführen, dass die Tatsache, ob ein sogenanntes BVLOS-Szenario (*beyond visual line of sight*, Betrieb außerhalb der Sichtweite) vorliegt, nicht relevant ist. Vielmehr stellt sich hier die Frage nach einer abweichenden Verortung dieses Kriteriums im Bow-Tie-Modell. Während im SORA-INT und dem damit verwandten SORA-GER ein BVLOS-Szenario in der GRC-Tabelle berücksichtigt wird [2, 3], muss ebenfalls von unmittelbaren Auswirkungen auch auf das Luftrisiko (engl. *air risk class*, ARC) ausgegangen werden. Deshalb und weil ein Out-of-control-Szenario durch die besonderen Herausforderungen eines BVLOS-Betriebs erst hervorgerufen werden kann, liegt eine gesonderte Betrachtung der risikorelevanten Auswirkungen des BVLOS-Betriebs auf der Hand. Eventuell muss dies im entsprechenden Modell sogar auf der linken Seite des Bow-Tie-Modells geschehen und nicht erst, wenn das unbemannte Fluggerät außer Kontrolle geraten ist.

3.6 Mortalität

Legt man für die erwartete maximale kinetische Energie eines unbemannten Fluggeräts in Abhängigkeit der Masse den in (24) ausgedrückten Zusammenhang zugrunde, ergibt das konsolidierte Modell in (25) für die konservative, da von der maximal möglichen Geschwindigkeit ausgehende, Vorhersage der Letalität in Abhängigkeit der Masse

$$(28) \quad \tilde{p}_{let|hit,max}(m) = \frac{m[kg]^{1,50555}}{m[kg]^{1,50555} + 49,552}$$

Geht man als grobe Abschätzung für die realistische Geschwindigkeit von

$$(29) \quad v_{real} = \frac{1}{2} v_{max}$$

aus, ergibt sich statt (24) für die kinetische Energie

$$(30) \quad E_{kin,real}(m)[J] = \frac{1}{4} E_{kin,max}(m)[J] = 38,855(m[kg])^{\frac{4}{3}}$$

und schließlich statt (28) für die Letalität

$$(31) \quad \tilde{p}_{let|hit,real}(m) = \frac{m([kg])^{1,50555}}{m([kg])^{1,50555} + 237,076}$$

was nachfolgend als modellhafte Annäherung innerhalb dieser Arbeit verwendet wird. Genauere mathematische Zusammenhänge werden hier nicht näher beleuchtet, sollten aber Gegenstand zukünftiger Analysen sein. Als erste Näherung könnte die Geschwindigkeit als Verteilungsfunktion, z.B. durch die Normalverteilung, beschrieben werden, wobei deren Mittelwert bei $v_{term}/2$ liegen könnte und die Standardabweichung entsprechend sinnvoll gewählt wird.

Aus (3) ergibt sich somit durch Einsetzen von (15) und (31) für die Mortalität in Abhängigkeit der Masse des unbemannten Fluggeräts und der Personendichte der Zusammenhang:

$$(32) \quad n_{int}(m, \sigma_{pers}) = \frac{\pi \sigma_{pers} m([kg])^{1,50555} \left(0,282095(m[kg])^{\frac{1}{3}} + 0,164 \right)}{m([kg])^{1,50555} + 237,076}$$

Die dazugehörige über den Zusammenhang aus (5) ermittelbare Sicherheitszahl N_{int} lässt sich in Tabelle 3 finden. Bringt man diese in Zusammenhang mit der Wahrscheinlichkeit eines Out-of-control-Szenarios (vgl. Tabelle 1), kann eine Aussage über notwendige Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden, damit der Betrieb des unbemannten Fluggeräts hinsichtlich der Mortalität einen definierten Grenzwert nicht überschreitet. Wählt man den in Kapitel 2 vorgestellten Wert 10^{-6} pro Betriebsstunde, ergibt sich eine Minimalanforderung für das Sicherheitsumfeld, die vom intrinsischen Risiko abhängt. Tabelle 4 stellt dies anschaulich dar und spiegelt somit die dem Modell zugrundeliegende mathematische Beziehung aus (6) größtenteils wider.

Bislang nicht beschrieben innerhalb dieses Modells sind Effekte von risikomindernden Maßnahmen, deren detaillierte Betrachtung über den Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung hinausgehen würden, aber entscheidend zur Komplettierung des vorgestellten Modells beitragen können. Durch die mathematische Natur des quantitativen Modells sind die Anforderungen an risikomindernde Maßnahmen jedoch zumindest aus probabilistischer Sicht einfach zu formulieren, z.B.: *Zeige, dass der am unbemannten Fluggerät angebrachte Fallschirm die kinetische Energie beim Aufprall bei einer nachgewiesenen Auslösewahrscheinlichkeit so reduziert, dass das Risiko im Falle eines Out-of-control-Szenarios um den Faktor 10 (100, 1000) reduziert wird, um einen Risikominderungswert P_{mit} von 1 (2, 3) zu erhalten.*

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In der vorliegenden Arbeit wird systematisch eine quantitative Herangehensweise zur Bodenrisikobewertung des Betriebs von kleinen unbemannten Fluggeräten empirisch und gemäß flugmechanischer Grundlagen theoretisch hergeleitet. Zentral ist dabei, dass die Zusammenhänge der beitragenden Faktoren mathematisch korrekt abgebildet werden, gleichzeitig aber durch die Verwendung einer Risikozahl intuitiv wie in anderen Risikobewertungen auch verwendet werden können. Die Berücksichtigung des Sparsamkeitsprinzips stellt dabei sicher, dass das intrinsische Risiko lediglich in Abhängigkeit aussagekräftiger, aber einfach zu ermittelnder Faktoren – Masse des Fluggeräts und Personendichte des überflogenen Gebiets – bestimmt wird.

Dies führt dazu, dass das Risikobewertungsverfahren mit dem zentralen Zusammenhang aus (6) durch die Nutzung lediglich von Tabelle 3 und Tabelle 4 durchlaufen wird, was im Gegensatz zu den bekannten Verfahren äußerst einfach und zügig durchführbar ist.

Zudem steht für das intrinsische Risiko ein konkreter mathematischer Ausdruck, nämlich Formel (32) zur Verfügung.

Im Gegensatz zu den traditionellen Experteneinschätzungen macht dies die Risikobewertung

transparent, während jeder Teilschritt durch neue Erkenntnisse leicht optimiert werden kann. Aus dieser Ausarbeitung ergeben sich darüber hinaus neue Fragestellungen mit Bezug auf Risikobewertungen von kleinen unbemannten Fluggeräten. Insbesondere die nachfolgenden Leitfragen werden für zukünftige Forschungsarbeiten als relevant erachtet:

1. Welche tatsächliche Abhängigkeit von der Trefferintensität vom relativen Abstand zwischen den Schwerpunkten von unbemannten Fluggerät und getroffener Person existiert?
2. Kann der postulierte Zusammenhang zwischen kinetischer Energie und Letalität im konsolidierten Modell aus Abbildung 6 insbesondere im Bereich der vermuteten 50%-Letalität (etwa 5000 Joule) in Simulationen und

Tests unter realen Bedingungen bestätigt werden?

3. Gesonderte Betrachtung des Betriebs außerhalb der Sichtweite: Sollte dies auf der linken Seite des Bow-Tie-Modells verortet werden? Wenn ja, welche Anforderungen müssen für kleine unbemannte (hochautomatisierte) Fluggeräte gelten?
4. Wie kann das Risiko für den Betrieb über Infrastruktur, insbesondere vielbefahrenen Straßen modelliert werden?
5. Wie kann das dieser Arbeit zugrundeliegende Modell um die Betrachtung des Luftrisikos erweitert werden?
6. Wie können risikomindernde Maßnahmen effektiv in das vorgestellte Modell implementiert werden?

5 LITERATUR

- [1] SESAR Joint Undertaking: European Drones Outlook Study. Unlocking the value for Europe 2016.
- [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] Aviation Safety Network: Drone Database. Stand: 15. Oktober 2017.
- [5] 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.
- [6] North Atlantic Treaty Organization: Qualification and Structural Design Guidelines for Military Unmanned Air Vehicles. STO Technical Report, TR-AVT-174.
- [7] 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.
- [8] National Transportation Safety Board: Review of U.S. Civil Aviation Accidents 2010.
- [9] Stevens, S.: On the theory of scales of measurement. In: Science 103 (1946) 2684, S. 677-80.
- [10] Weibel, R. E.: Safety considerations for operation of different classes of unmanned aerial vehicles in the National Airspace System 2005.
- [11] Jennings, B. K.: On the Nature of Science 2006.
- [12] Hoffmann, R.; Minkin, V. I.; Carpenter, B. K.: Ockham's Razor and Chemistry. In: HYLE--International Journal for Philosophy of Chemistry 3 (1997), S. 3-28.
- [13] Gigerenzer, G.; Martignon, L.; Hoffrage, U.; Rieskamp, Jörg, Czerlinski, Jean; Goldstein, D.: One-Reason Decision Making. In: Handbook of Experimental Economics Results 1 (2008), S. 1004-17.
- [14] Pareto, V.: Manual of political economy. Transl. from French ed. of 1927. New York 1971.
- [15] Jefferys, W. H.; Berger, J. O.: Sharpening Ockham's Razor on a Bayesian Strop 1991.
- [16] Munroe, R.: Password Strength. URL: <https://xkcd.com/936/>. Abrufdatum 28.12.2017.

- [17] Universität der Bundeswehr, Institute of Flight Systems: Flugzeugkonfigurationen. Studium +, Ringvorlesung „Luft“. URL: https://www.unibw.de/wow2_4/Lehre/VTLuft/vl_luft_flugzeugkonfigurationen.pdf. Ab-rufdatum 29.12.2017.
- [18] Arterburn, D.; Ewing, M.; Prabhu, R.; Zhu, F.; Francis, D.: ASSURE Final Report for the FAA UAS Center of Excellence. Task A4: UAS Ground Collision Severity Evaluation, Revision 2 2017.
- [19] Wentzler, T.: Feasibility study and risk assessment models for the EASA "specific category" UAS operations in the vicinity of airports. Master-Thesis 2016.
- [20] Melnyk, R.; Schrage, D.; Volovoi, V.; Jimenez, H.: A third-party casualty risk model for un-manned aircraft system operations. In: Reliability Engineering & System Safety 124 (2014), S. 105–16.
- [21] Campolettano, E. T.; Bland, M. L.; Gellner, R. A.; Sproule, D. W.; Rowson, B.; Tyson, A. M.; Duma, S. M.; Rowson, S.: Ranges of Injury Risk Associated with Impact from Unmanned Air-craft Systems. In: Annals of biomedical engineering 45 (2017) 12, S. 2733–41.
- [22] Lum, C. W.: Assessing and Estimating Risk of Operating Unmanned Aerial Systems in Populat-ed Areas 2011.
- [23] Fraser, C.; Donnithorne-Tait, D.: An Approach to the Classification of Unmanned Aircraft. Bristol, UK 2011.
- [24] Rohne, H.: Schiesslehre für Infanterie unter besonderer Berücksichtigung des Gewehrs 98 mit S-Munition der Maschinengewehre und der Schiessvorschrift für die Infanterie 1906.
- [25] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Verordnung zur Regelung des Be-triebs von unbemannten Fluggeräten 2017.
- [26] Republik Österreich: Luftfahrtgesetz § 24d Unbemannte Geräte bis zu 79 Joule maximaler Be-wegungsenergie.
- [27] European Aviation Safety Agency: NPA 2017-05 Introduction of a regulatory framework for the operation of drones — Unmanned aircraft system operations in the open and specific category.
- [28] Henderson, J.: Lethality Criteria For Debris Generated From Accidental Explosions 2010.
- [29] Nie, J.; Li, G.; Yang, J.: A study of fatality risk and head dynamic response of cyclist and pedes-trian based on passenger car accident data analysis and simulations. In: Traffic injury preven-tion 16 (2015) 1, S. 76–83.
- [30] Hallowell, M. R.; Alexander, D.; Gambatese, J. A.: Energy-based safety risk assessment. Does magnitude and intensity of energy predict injury severity? In: Construction Management and Economics 35 (2017) 1-2, S. 64–77.