

Aus der Klinik für Anästhesiologie und Operative Intensivmedizin  
der Universität zu Köln  
Direktor: Universitätsprofessor Dr. med. B. W. Böttiger

# **Signifikante Einflussfaktoren zur Prognose der Verletzungs- und Überlebenswahrscheinlichkeit von Personen aus Kleinflugzeug Unfällen**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde  
der Medizinischen Fakultät  
der Universität zu Köln

vorgelegt von  
Catherina Hippler  
aus Böblingen, Deutschland

promoviert am 30. Juli 2025

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität zu Köln  
2025

Dekan: Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink

1. Gutachterin: Universitätsprofessorin Dr. med. A. U. Steinbicker
2. Gutachter: Privatdozent Dr. rer. Nat. J. Zange

## Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich keine Unterstützungsleistungen erhalten.

Weitere Personen waren an der Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Der dieser Arbeit zugrunde liegenden Datensatz wurde ohne meine Mitarbeit durch die Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung erhoben und öffentlich zur Verfügung gestellt.

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden deskriptiven Ergebnisse wurden von mir selbst mit der Software Excel (Microsoft Corporation. (2020). Microsoft Excel (Version 2312) Redmond, WA: Microsoft.) und SPSS (IBM Corp. (2016). IBM SPSS Statistics for Windows (Version 28.0). Armonk, NY: IBM Corp.) ausgewertet.

Die in dieser Arbeit angewandten statistischen Verfahren sind nach entsprechender Anleitung durch Frau Becker des Instituts für Medizinische Statistik und Bioinformatik der Universität zu Köln, von mir selbst ausgeführt und ausgewertet worden.

## Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten (Amtliche Mitteilung der Universität zu Köln AM 132/2020) der Universität zu Köln gelesen habe und verpflichte mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Köln, den 22.08.2024

Unterschrift: .....

## **Danksagung**

Diese Arbeit wäre ohne die Unterstützung meiner wundervollen Mama nicht denkbar gewesen. Ihre wertvollen wissenschaftlichen Ratschläge haben mir bei zahlreichen Gelegenheiten geholfen. Meinem Freund Jannik möchte ich für die Unterstützung und Entlastung während des Schreibprozesses und den gewissenhaften Korrekturen danken.

Ebenso danke ich der Statistikberatung der Universität zu Köln ohne deren fachkundige Begleitung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Jochen Hinkelbein für seine außergewöhnliche Betreuung und kontinuierliche Unterstützung.

# Inhaltsverzeichnis

<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>6</b>
<b>1 ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>8</b>
<b>2 EINLEITUNG</b>	<b>9</b>
2.1 Flugunfälle mit Kleinflugzeugen	9
2.2 Analyse von Flugunfällen mit Kleinflugzeugen	9
2.3 Prognose der Verletzungs- und Überlebenswahrscheinlichkeit in der Medizin	10
2.4 Zielsetzung und Forschungsfragen	11
<b>3 MATERIAL UND METHODEN</b>	<b>13</b>
3.1 Definitionen	13
3.2 Rechercheprozess und Studiendesign	15
3.3 Beschreibung der Grundgesamtheit	15
3.4 Ein- und Ausschlusskriterien	16
3.5 Kategorisierung	17
3.6 Statistische Verfahren	21
3.7 Ethische Aspekte	23
<b>4 ERGEBNISSE</b>	<b>25</b>
4.1 Forschungsstand	25
4.2 Gesamtübersicht der eingeschlossenen Datensätze	25
4.3 Beschreibung der definierten Kategorien	27
4.3.1 Ausgang des Unfalls	27
4.3.2 Kalendarische Daten	28
4.3.3 Art der Notsituation	30
4.3.4 Flugzeugparameter	31

4.3.5	Lage und Flugphase	33
4.3.6	Pilotenparameter	34
4.3.7	Flugbedingungen	37
4.3.8	Sonstiges	38
4.4	Ergebnisse durch Signifikanztestung	38
4.5	Scores	41
4.5.1	Allgemeiner Score zur Prognose von tödlichen Flugunfällen	41
4.5.2	Score zur Prognose von tödlichen Flugunfällen für Rettungsleitstellen	44
4.5.3	Allgemeiner Score zur Prognose der Verletzungsschwere	45
<b>5</b>	<b>DISKUSSION</b>	<b>48</b>
5.1	Forschungsstand	48
5.2	Parameter mit statistisch signifikantem Einfluss auf einen tödlichen- oder schweren Ausgang	48
5.3	Betrachtung der Ergebnisse der logistischen Regressionsanalysen	53
5.4	Parameter ohne statistisch signifikanten Einfluss auf einen tödlichen- oder schweren Ausgang	57
5.5	Limitationen	59
5.6	Schlussfolgerungen und Implikationen für die Praxis	59
<b>6</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>61</b>
<b>7</b>	<b>ANHANG</b>	<b>65</b>
7.1	Abbildungsverzeichnis	65
7.2	Tabellenverzeichnis	66
7.3	Formelverzeichnis	67
7.4	Anhang A	68
7.5	Anhang B	72
<b>8</b>	<b>VORABVERÖFFENTLICHUNGEN VON ERGEBNISSEN</b>	<b>73</b>

## Abkürzungsverzeichnis

ATPL – Airline transport pilot license / Verkehrspilotenlizenz  
APACHE - Acute Physiology And Chronic Health Evaluation  
BFU – Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung  
BMDV – Bundesministerium für Digitales und Verkehr  
Bsp. – Beispiel  
Bspw. – Beispielsweise  
BSTEP – Backward stepwise elimination / Rückwärts schrittweise Elimination  
CPL – Commercial Pilote License / Berufspilotenlizenz  
CRFS – Crash-Resistant Fuel Systems  
CRM – Crew Resource Management  
CVR – Cockpit Voice Recorder  
EASA – European Union Aviation Safety Agency  
ECU – Electronic Control Unit  
EU – Europäische Union  
FDR – Flight Data Recorder / Flugdatenschreiber  
FIUUG – Flugunfall-Untersuchungs-Gesetz  
GA – General Aviation / Allgemeine Luftfahrt  
GPS – Global Positioning Systems  
HFACS – Human Factors Analysis and Classification System  
ICAO – Internationale Zivilluftfahrtorganisation  
IFR – Instrument Flight Rules / Instrumentenflugregeln  
LAPL – Light aircraft pilot license / Leichtluftfahrt - Pilotenlizenz  
Km – Kilometer  
MTOW – Maximum takeoff weight / Höchstabflugmasse  
OR – Odds Ratio  
PPL – Private Pilote License / Privatpilotenlizenz  
QAR – Quick Access Recorder  
RLS – Rettungsleitstelle  
RR – Relatives Risiko  
Sig. - Signifikanz  
Sog. – sogenannt  
SPL - Sportpilotenlizenz  
US – United States  
USA – United States of America  
UVD - Unfalluntersucher vom Dienst

VFR – Visual Flight Rules / Sichtflugregeln

Vgl. – vergleiche

WMA – World Medical Association / Weltärztebund

z.B. – zum Beispiel

# 1 Zusammenfassung

Die allgemeine Luftfahrt repräsentiert ein bis zum heutigen Zeitpunkt eher unerforschtes Forschungsgebiet, welches erst in den letzten 15 Jahren zunehmende Bedeutung erlangte. Den Hauptanteil der Luftfahrzeuge in diesem Sektor stellen Kleinflugzeuge dar. Aufgrund geringerer Sicherheitsvorschriften und tendenziell geringerer Ausbildung der Piloten, gelten Flüge mit Kleinflugzeugen im Allgemeinen als unsicherer. Während große Flugzeuge mit einem Flugdatenschreiber, dem „Flight Data Monitoring“ (FDM) ausgestattet sein müssen, ist dies für Kleinflugzeuge nicht vorgeschrieben und somit nur vereinzelt vorzufinden. Infolgedessen erfolgt die Unfallanalyse ausschließlich auf Grundlage ermittelbarer Faktoren wie beispielsweise Wetterkonditionen, Zeugenaussagen, Einschätzung des Ermittlers, Brände, oder Wrackteile des Flugzeugs <sup>1</sup>.

Der erste Teil der vorliegenden Arbeit befasst sich mit der Identifikation von Faktoren, die einen statisch signifikanten Einfluss auf tödliche oder schwere Kleinflugzeugunfälle haben. Von insgesamt 73 untersuchten Parametern wiesen 20 einen p-Wert unter 0,005 auf. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen ermöglichte der zweite Teil dieser Arbeit die Selektion von Faktoren mittels logistischer Regressionsanalyse, die von entscheidender Bedeutung sind, um Vorhersagen hinsichtlich der Verletzungs- und Überlebenswahrscheinlichkeit der Insassen treffen zu können. Anhand dieser Ergebnisse wurden drei Scoring-Systeme entwickelt. Dieses Verfahren bestätigte die bereits in der Literatur beschriebene Bedeutung von Faktoren wie "Feuer", "Unfälle außerhalb des Flugplatzes", "Illusionen", "Unfälle während des Reisefluges" und das Vorhandensein "menschlicher Faktoren" in Bezug auf tödliche Unfälle. Andere Faktoren wurden teilweise in der Literatur kontrovers diskutiert oder es gab keine einschlägigen Analysen. Hierzu zählt insbesondere die "Landephase", welche in allen drei Scoring-Systemen einen negativen Einfluss auf tödliche oder schwere Unfälle zeigte. Hier war die Einschätzung in der Literatur in Bezug auf diesen Einfluss aufgrund reiner Häufigkeitsanalysen umstritten. Weitere Faktoren, wie der Unfallzeitpunkt und der Einfluss des Flugzeugherstellers, wurden bisher nicht ausführlich in der Literatur analysiert.

Die vorliegende Arbeit unterstreicht die Notwendigkeit weiterer Forschung und statistischer Analysen unter Verwendung von logistischer Regression, um den genauen Einfluss einzelner Faktoren zu quantifizieren. Durch eine Reduzierung der Einflussfaktoren mittels verstärkter Sicherheitsmaßnahmen sind Verbesserungen in Bezug auf die Flugsicherheit zu erwarten. Besonders hoher Bedarf besteht an der Einrichtung eines zentralen Registers für die allgemeine Luftfahrt, welches die Anzahl der geflogenen Flugstunden, die Anzahl der Flüge sowie die zugehörigen Flugzeugdaten pro Tag erfasst. Diese sind von essenzieller Bedeutung, um valide Aussagen und Trends abzuleiten.

## **2 Einleitung**

Die allgemeine Luftfahrt (General Aviation, GA) umfasst alle zivilen Lufttransportaktivitäten, die nicht dem kommerziellen Passagiertransport oder Charteroperationen zuzuordnen sind. Über 95% aller in Deutschland zugelassenen Flugzeuge gehören hierzu. Hierbei handelt es sich vorwiegend um Kleinflugzeuge, die hauptsächlich im Rahmen der Allgemeinen Luftfahrt eingesetzt werden. Dieser Bereich stellt einen bedeutenden Sektor innerhalb der Luftfahrtindustrie dar und weist jährlich eine Flugzeit von etwa 2 Millionen Stunden auf<sup>2</sup>. Etwa ein Viertel dieser GA-Flüge wird zu Freizeitwecken durchgeführt, während der Großteil auf Flugausbildungsaktivitäten, Geschäftsreisen, landwirtschaftliche Anwendungen oder notfallmedizinische Dienste entfällt<sup>3</sup>.

Des Weiteren können die meisten Kleinflugzeuge problemlos von Start- und Landebahnen mit den Dimensionen 1.000 mal 15 Metern operieren, was nur einen Bruchteil der Flächenanforderungen von Verkehrsflugzeugen darstellt. Diese Flüge ermöglichen den Zugang zu abgelegenen Orten, deren Entwicklung ohne den Einsatz kleiner Flugzeuge praktisch unmöglich wäre. Angesichts der wachsenden weltweiten wirtschaftlichen Expansion und zunehmenden Vernetzung ist die Bedeutung sicherer, schneller und zugänglicher Transportmittel wichtiger denn je<sup>3</sup>.

### **2.1 Flugunfälle mit Kleinflugzeugen**

Die Luftfahrtbranche hat in den letzten Jahrzehnten enorme Fortschritte bei der Verbesserung der Sicherheit von kommerziellen Flügen erzielt<sup>4</sup>. Trotz dieser Erfolge bleibt jedoch eine Nische der Luftfahrtindustrie weiterhin von besonderem Interesse: Unfälle mit Kleinflugzeugen. Störungen und Unfälle im Flugverkehr können dabei gravierende Folgen haben. Während große Flugzeuge mit einem Flugdatenschreiber, dem „Flight Data Monitoring“ (FDM) ausgestattet sein müssen, ist dies für Kleinflugzeuge nicht vorgeschrieben und somit nur vereinzelt vorzufinden. Die Unfallanalyse erfolgt infolgedessen ausschließlich durch ermittelbare Faktoren wie beispielsweise den Wetterkonditionen, Zeugenaussagen, Einschätzung des Ermittlers, Brände, oder Wrackteile des Flugzeugs<sup>1</sup>.

### **2.2 Analyse von Flugunfällen mit Kleinflugzeugen**

Ereignet sich ein Unfall oder eine Störung in der zivilen Luftfahrt, ist jeder Staat gemäß des Chicago Abkommen von 1944 dazu verpflichtet eine Untersuchung über Ursachen und Hintergründe des Unfalls durchzuführen<sup>5</sup>. Hierzu gehören alle nicht-militärischen land- und seegestützten Luftfahrten<sup>6</sup>. Um den zivilen Luftverkehr international zu standardisieren, wurde

die Internationale Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) gegründet, welche am 04. April 1947 in Kraft trat <sup>7</sup>. Durch Regularien und Empfehlungen regelt diese, in Annex 13, die Verfahren zur Flugunfalluntersuchung.

Für die Umsetzung in nationales Recht wurde in Deutschland das Flugunfall-Untersuchungs-Gesetz (FIUUG) gegründet, welches am 01. September 1998 in Kraft trat und die Rechtsgrundlage der zivilen Flugunfall Untersuchung bildet <sup>8</sup>. Ergänzend zum FIUUG wird die Unfalluntersuchung durch die Verordnung (EU) Nr. 996/2010 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Oktober 2010, reguliert <sup>9</sup>.

Die verantwortliche Organisation für die Untersuchung von Unfällen und schweren Störungen in der zivilen Luftfahrt in Deutschland, ist die Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung (BFU). Sie besteht seit dem 01. September 1998 und ist eine dem Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) unmittelbar nachgeordnete Bundesbehörde. Unfälle und schwere Störungen im Ausland werden ebenfalls durch die BFU untersucht, wenn das Luftfahrzeug in Deutschland registriert, betrieben, oder hergestellt wurde <sup>10</sup>. Störungen, welche nicht als „schwer“ eingestuft werden, werden nur dann untersucht, wenn dadurch wesentliche Erkenntnisse für die Luftsicherheit gewonnen werden können.

Geht eine Unfallmeldung bei der BFU ein, ist das Vorgehen unabhängig vom Luftfahrzeug standardisiert strukturiert (Anhang B). Sind die Untersuchungen eines Flugunfalls abgeschlossen, erfolgt eine detaillierte Analyse mit daraus folgenden Schlussfolgerungen zum Unfallhergang durch den Untersuchungsführer, sowie zukünftigen Sicherheitsempfehlungen, welche durch den Leiter der Dienststelle freigegeben werden. Die Ergebnisse werden in Form eines anonymisierten Untersuchungsberichtes durch die BFU veröffentlicht <sup>11</sup>.

## **2.3 Prognose der Verletzungs- und Überlebenswahrscheinlichkeit in der Medizin**

Für Flugunfälle konnten Li und Baker drei Hauptrisikofaktoren für einen tödlichen Ausgang identifizieren auf Basis dessen der FIA-Score entwickelt wurde<sup>12</sup>. Die Notwendigkeit für die Einführung dieses Scores ergab sich aus dem Mangel an geeigneten Instrumenten zur Bewertung der Letalität von Flugzeugunfällen. Der FIA-Score ist ein vierstufiges Bewertungssystem, basierend auf drei Risikofaktoren: Vorhandensein von Feuer, das Auftreten eines Unfalls abseits des Flugplatzes und Wetterbedingungen welche den Einsatz von Instrumentenflugregeln (IMC) benötigen. Für jeden dieser Faktoren wird ein Punkt vergeben, wodurch sich eine Gesamtpunktzahl zwischen null und drei ergibt. Diese Punktzahl

korreliert mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten für einen tödlichen Ausgang, die mit 3%, 18%, 62% und 89% angegeben werden<sup>12</sup>.

Es ist jedoch zu beachten, dass der FIA-Score auf der Annahme basiert, dass alle drei Faktoren in gleicher Weise zur Wahrscheinlichkeit eines tödlichen Ausgangs beitragen und dass ihre Wirkung additiv ist<sup>12</sup>.

## **2.4 Zielsetzung und Forschungsfragen**

Im Hinblick auf Kleinflugzeugunfälle wurden in vorangegangenen Studien bereits Faktoren identifiziert, die potenziell zu lebensgefährlichen Flugunfällen führen können<sup>13–15</sup>. Dennoch basieren die Erkenntnisse dieser Forschungsarbeiten größtenteils auf Häufigkeitsanalysen und der Identifikation von Zusammenhängen. Die Verwendung statistischer Analysen zur Prognoseerstellung mittels logistischer Regression hat erst in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Durch die Implementierung von logistischen Regressionsverfahren sind Forscher in der Lage, die quantitative Beziehung zwischen Einflussfaktoren und der Wahrscheinlichkeit von Flugunfällen zu evaluieren. Diese Methodik ermöglicht es außerdem, den kumulativen Einfluss unabhängiger Variablen auf die Wahrscheinlichkeit des Eintritts der abhängigen Variablen zu bewerten. Diese Herangehensweise trägt dazu bei, Risikofaktoren zu identifizieren, die zu lebensgefährlichen Unfällen beitragen, und ermöglicht die Ableitung von Sicherheitsmaßnahmen zur Verbesserung der Flugsicherheit.

Ziel dieser Promotionsarbeit ist die Identifikation von signifikanten Faktoren, welche im Rahmen von Kleinflugzeugabstürzen mit schweren- oder tödlichen Ausgängen korrelieren. Aufbauend darauf können durch statistische Verfahren die Faktoren selektiert werden welche elementar sind, um eine Vorhersage über die Verletzungs- und Überlebenschancen der Insassen treffen zu können.

Auf Basis dieser validen Grundlage werden drei Scores entwickelt. Mit Hilfe von zwei Scores können Aussagen zur Todeswahrscheinlichkeit sowie zur Schwere des Outcomes für die Insassen getroffen werden. Der dritte Score wird speziell für die Anwendung in Rettungsleitstellen entwickelt und beinhaltet abfragbare Faktoren. Durch die objektive Beurteilung und der frühen Erkennung kritischer Patienten, dient dieser Score als Unterstützung und Entscheidungshilfe für Leitstellendisponenten im Falle eines Kleinflugzeugabsturzes<sup>16</sup>. Als übergeordnetes Ziel kann durch die Entwicklung dieser Scores ein Beitrag in der Luftsicherheit geleistet werden. Aus den dargestellten Zielen lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

- Welche Faktoren zeigen einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Verletzungs- und Überlebenswahrscheinlichkeit von Insassen nach Kleinflugzeug Unfällen?
- Welche dieser signifikanten Faktoren sind elementar für die Entwicklung eines Scores, um eine Vorhersage bezüglich Verletzungs- und Überlebenswahrscheinlichkeit treffen zu können?
- Wie unterscheidet sich die Gewichtung der einzelnen, im Score abgebildeten, Einflussfaktoren?

Die in dieser Arbeit verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich – sofern nicht anders kenntlich gemacht – auf alle Geschlechter.

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Definitionen

Das Verständnis dieser Arbeit erfordert Kenntnisse über die Definitionen der im Folgenden aufgeführten Begriffe.

Definiert wurden die Begriffe „Unfall“, „Störung“ und „schwere Störung durch das Flugunfall-Untersuchungs-Gesetz (FIUUG). „Im Sinne dieses Gesetzes bedeutet *Unfall*: Ein Ereignis bei dem Betrieb eines Luftfahrzeugs vom Beginn des Anbordgehens von Personen mit Flugabsicht bis zu dem Zeitpunkt, zu dem diese Personen das Luftfahrzeug wieder verlassen haben, wenn hierbei:

1. eine Person tödlich oder schwer verletzt worden ist
  - an Bord eines Luftfahrzeugs oder
  - durch unmittelbare Berührung mit dem Luftfahrzeug oder einem seiner Teile, auch wenn sich dieser Teil vom Luftfahrzeug gelöst hat, oder
  - durch unmittelbare Einwirkung des Turbinen- oder Propellerstrahls eines Luftfahrzeugs, [...]oder
2. das Luftfahrzeug oder die Luftfahrzeugzelle einen Schaden erlitten hat [...]
oder3. das Luftfahrzeug vermisst wird oder nicht zugänglich ist.“

Als *Störung* wird „ein anderes Ereignis als ein Unfall, das mit dem Betrieb eines Luftfahrzeugs zusammenhängt und den sicheren Betrieb beeinträchtigt oder beeinträchtigen könnte“ bezeichnet.

Eine *Schwere Störung* ist „ein Ereignis beim Betrieb eines Luftfahrzeugs, dessen Umstände darauf hindeuten, dass sich beinahe ein Unfall ereignet hätte“<sup>17</sup>.

Sofern keine spezifischen Abweichungen festgelegt sind, wird in dieser Dissertation der Begriff "Unfall" in Bezug auf alle erfassten Unfälle und schweren Störungen verwendet.

Ebenfalls durch das FIUUG definiert wurden „tödliche“ und „schwere“ Verletzungen. Dabei ist eine *tödliche Verletzung* „eine Verletzung, die eine Person bei einem Unfall erlitten hat und die unmittelbar bei dem Unfall oder innerhalb von 30 Tagen nach dem Unfall ihren Tod zur Folge hat.“

Eine *schwere Verletzung* wird definiert als „eine Verletzung, die eine Person bei einem Unfall erlitten hat und die

1. einen Krankenhausaufenthalt von mehr als 48 Stunden innerhalb von 7 Tagen nach der Verletzung erfordert oder
2. Knochenbrüche zur Folge hat (mit Ausnahme einfacher Brüche von Fingern, Zehen oder der Nase) oder
3. Risswunden mit schweren Blutungen oder Verletzungen von Nerven, Muskel- oder Sehnensträngen zur Folge hat oder
4. Schäden an inneren Organen verursacht hat oder
5. Verbrennungen zweiten oder dritten Grades oder von mehr als fünf Prozent der Körperoberfläche zur Folge hat oder
6. Folge einer nachgewiesenen Aussetzung gegenüber infektiösen Stoffen oder schädlicher Strahlung ist“<sup>17</sup>.

Für leichte Verletzungen konnte keine offizielle Definition gefunden werden. Somit sind diese als alle Verletzungen zu verstehen, welche nicht als tödliche- oder schwere Verletzungen eingestuft werden. Ereignen sich keine Verletzungen wurden Insassen der Flugunfälle als „unverletzt“ bezeichnet.

Durch die Anwendung dieser Definitionen konnten die vier möglichen Schweregrade von Personenschäden (unverletzt, leicht-, schwer- oder tödlich verletzt) bei den Insassen von Kleinflugzeugunfällen in den Untersuchungsberichten der BFU erfasst werden. Zur Zusammenfassung dieser Informationen wurde für diese Promotionsarbeit der Ergebniswert "Verletzungsschwere" berechnet. Hierbei wurden Punkte von eins bis vier vergeben, wobei unverletzte Personen einen Punkt erhielten, leicht verletzte Personen zwei Punkte, schwer verletzte Personen drei Punkte und tödlich verletzte Personen vier Punkte erhielten.

Darüber hinaus wurden die Personenschäden der Patienten in zwei Kategorien unterteilt: leichte und schwere Ausgänge. Alle unverletzten und leicht verletzten Personen wurden als "leichter Ausgang" zusammengefasst, während die schwer und tödlich verletzten Personen als "schwerer Ausgang" klassifiziert wurden. Dies führte zur Bildung der Subkategorie "Zusammengefasste Verletzungsschwere".

Des Weiteren wird in dieser Arbeit der Begriff "Scoring-System" im Kontext der Medizin als ein fundamentaler Bestandteil erläutert. Scoring Systeme nehmen in der Medizin eine signifikante Stellung ein, da sie eine standardisierte Methode zur Bewertung von Patienten oder Krankheitszuständen bieten. Diese Systeme ermöglichen es Ärzten und medizinischem Fachpersonal, objektive und reproduzierbare Einschätzungen vorzunehmen, indem sie eine

Vielzahl von klinischen Parametern und Laborergebnissen berücksichtigen<sup>18</sup>. Verletzungs- und Überlebenswahrscheinlichkeit können im klinischen Setting bereits seit 50 Jahren durch die Anwendung von Scoring Systemen erfolgreich vorhergesagt werden. Zur Abschätzung des Mortalitätsrisikos sind sie vor allem in Bereichen der Notfall- und Intensivmedizin von Bedeutung<sup>16</sup>. Ein Beispiel ist der APACHE-Score (Acute Physiology And Chronic Health Evaluation). Dieser ist ein etabliertes Verfahren, das seit dem Jahr 1978 in der Intensivmedizin zur Prognose der Überlebenswahrscheinlichkeit von intensivstationierten Patienten verwendet wird. Im Laufe der Zeit wurde dieser Score mehrfach validiert und überarbeitet, wodurch der aktuelle APACHE IV-Score entstanden ist<sup>18</sup>.

Vorhersagemodelle tragen dazu bei, die Qualität der medizinischen Versorgung zu steigern, indem sie eine Grundlage für Evidenz-basierte Behandlungsstrategien bieten und die Entscheidungsfindung sowohl für medizinisches Personal als auch für Patienten unterstützen<sup>19</sup>.

### **3.2 Rechercheprozess und Studiendesign**

Im Rahmen der Literaturrecherche wurde eine selektive Recherche der Datenbanken PubMed und Webseiten offizieller Behörden (BFU, Luftfahrt Bundesamt (LBA), National Transportation Safety Board (NTSB), European Union Aviation Safety Agency (EASA), International Civil Aviation Organisation (ICAO), International Air Transport Association (IATA)) durchgeführt<sup>20 21 22 23 24 25</sup>. Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde methodisch eine nicht-interventionelle, statistische Studie auf Basis einer Sekundärdatenanalyse durchgeführt.

Zur wissenschaftlichen Einordnung der Thematik dieser Arbeit wurde eine tabellarische Darstellung der in der Datenbank PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>) verzeichneten Publikationen zu ausgewählten Schlüsselwörtern im Zusammenhang mit Kleinflugzeug-Unfällen und -Sicherheit erstellt (Stand Oktober 2023). Es sei darauf hingewiesen, dass aufgrund von bestehenden Duplikaten die summierte Anzahl der Einträge in den Jahresabschnitten möglicherweise höher ist als die Gesamtzahl der Treffer, die angegeben ist (Tabelle 3).

### **3.3 Beschreibung der Grundgesamtheit**

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Flugunfälle mit Kleinflugzeugen in Deutschland analysiert. Hierfür wurde eine Vollerhebung der Untersuchungsberichte der online Datenbank der BFU, sowie eine Abfrage der jährlichen Unfallstatistik durchgeführt<sup>26</sup>. Analysiert wurden alle Untersuchungsberichte, die in den Jahren 2000 bis 2020 aufgeführt wurden (Datenentnahme 06.02.2021).

Untersuchungsberichte werden von der BFU für alle Unfälle, schwere Störungen, sowie vereinzelt für nicht-schwere Störungen erstellt. Die Berichte enthalten zunächst eine Kurzbeschreibung des Ereignisses. Im Anschluss findet eine Darstellung der Ereignisse und des Flugverlaufs statt, sowie darauffolgenden anonymisierten Angaben zu den beteiligten Personen und des Luftfahrzeuges.

Des Weiteren enthalten die Berichte meteorologische Informationen, Angaben zum Flugplatz, zur Unfallstelle und Feststellungen am Luftfahrzeug, sowie medizinische und pathologische Angaben. Falls vorhanden, finden sich in den Berichten u.a. Angaben zum Funkverkehr oder der Flugdatenaufzeichnung. Abgeschlossen werden die meisten Berichte mit einer abschließenden Beurteilung, sowie Schlussfolgerungen mit möglichen Sicherheitsempfehlungen.

Die Länge der Untersuchungsberichte, sowie die beschriebenen Untersuchungen können je nach Ausmaß des Unfalls und dem möglichen Nutzen der Untersuchung für zukünftige Flugsicherheit variieren <sup>27, 28</sup>.

### **3.4 Ein- und Ausschlusskriterien**

Für die Analyse wurden Untersuchungsberichte mit Kleinflugzeugen der Luftfahrzeugklassen < 2.000kg und 2.000kg – 5.700kg betrachtet. Die Analyse beschränkte sich auf motorisierte Kleinflugzeuge, da sich die Ursachen und Folgen von Flugunfällen im Vergleich zu unmotorisierten Flugzeugen erheblich unterscheiden. Der verwendete Zeitraum bezog sich auf Untersuchungsberichte die zwischen den Jahren 2000 – 2020 (letzte Datenentnahme am 06.02.2021) aufgeführt wurden.

Bezugnehmend auf der Definition von Unfällen und Störungen nach dem Flugunfall-Untersuchungs-Gesetz (FIUUG), wurde eine detaillierte Analyse aller „Unfälle“ durchgeführt, während aufgeführte „Störungen“ ausgeschlossen wurden. Des Weiteren wurden Berichte, welche durch nicht-deutsche Behörden untersucht wurden, ausgeschlossen. Waren in einem Untersuchungsbericht, zwei Flugzeuge involviert, wurden diese als zwei separate Unfälle gewertet (Tabelle 1).

<b>Einschlusskriterien</b>	<b>Ausschlusskriterien</b>
Alle Unfallberichte der BFU...	Alle Unfallberichte der BFU...
...mit motorisierten Kleinflugzeugen.	...mit nicht-motorisierten Kleinflugzeugen.
...die ab dem Jahr 2000 aufgeführt wurden.	
...die als „Unfall“ bezeichnet wurden.	...die als „Störung“ bezeichnet wurden.
...mit Flugzeugen mit einem maximalen Abflugmasse (MTOW) < 5700 kg.	...durch nicht deutsche Behörden.

Tabelle 1 - Ein- und Ausschlusskriterien der zur Analyse verwendeten Daten

### 3.5 Kategorisierung

Die in den Unfallberichten der BFU untersuchten Aspekte sind nachfolgend tabellarisch dargestellt. Zusammenhängende Variablen wurden als Kategorien zusammengefasst, während die einzelnen Aspekte in der jeweiligen Kategorie als Subkategorie aufgeführt sind (Tabelle 2).

Im Folgenden findet eine Beschreibung der untersuchten Aspekte statt. Die Monate, Jahreszeiten, sowie die Wochentage wurden zur Beschreibung der *Daten* des Unfallzeitpunktes genutzt. Die Jahreszeiten wurden wie folgt definiert: März - Mai (Frühling), Juni - August (Sommer), September - November (Herbst) und Dezember - Februar (Winter). Als *Notsituation* wurden ein Ausfall des Triebwerkes sowie eine Brandentstehung während des Fluges oder nach dem Aufprall gewertet.

Die *Flugzeugparameter* beinhalten verschiedene Informationen über das betroffene Kleinflugzeug. Dazu gehören Angaben zum Typ des Flugzeugs, der maximalen Abflugmasse (MTOW), zur Anzahl der Triebwerke, sowie zur Art des Fahrwerks (einfahrbar oder festgestellt). Darüber hinaus wurden die Anzahl der Sitze und Personen an Bord ermittelt. Zur Analyse der *Flugzeugtypen* wurden alle Flugzeughersteller, welche in zehn oder mehr Untersuchungsberichten dokumentiert wurden als Subkategorie aufgeführt, wobei hierbei nur der Flugzeughersteller und nicht das individuelle Modell betrachtet wurde. Alle weiteren wurden die Subkategorie „Sonstige Hersteller“ zugeordnet.

Das Luftfahrtbundesamt unterteilt die in Deutschland zugelassenen Luftfahrzeuge in verschiedene Kennzeichenklassen. Im Rahmen dieser Studie wurden dabei die Klassen „E“ bis „I“ betrachtet. Diese beinhalten Ein- und Mehrmotorige Flugzeuge mit einer *Maximalen Abflugmasse* unter 2 Tonnen und zwischen 2 – 5,7 Tonnen<sup>28</sup>. Für die Betrachtung der MTOW

wurde lediglich die Einteilung nach der Gewichtsklasse unabhängig der Anzahl der Motoren vorgenommen.

Eine weitere Kategorie stellen Informationen über die Flugphase zum Zeitpunkt des Unfalls dar und ob sich dieser *in der Nähe (10km) eines geeigneten und geplanten Landeplatzes* ereignet hatte. Die *Flugphasen* können grob in fünf Phasen unterteilt werden. Zunächst beginnt der Flug mit dem Start (Take-off) und dem anschließenden Anstieg. Nach dem Reiseflug beginnt der Sinkflug, welcher durch die Landung abgeschlossen wird. Die Start- und Anstiegsphase wurde in dieser Studie als Startphase zusammengefasst.

Zu den *Pilotenparametern* gehören Informationen zur Fluglizenz des ersten Piloten, die Anzahl der Crew Mitglieder, sowie Angaben zur Erfahrung des Piloten (insgesamt und auf dem verunfallten Flugzeugmodell). Des Weiteren wird in dieser Kategorie analysiert, ob es bei dem Piloten zu Fehlwahrnehmungen / Illusionen gekommen sei und ob menschliche Faktoren zum Unfallgeschehen beigetragen haben. Die in den Untersuchungsberichten angegeben *Fluglizenzen* umfassten die Privatpilotenlizenz (PPL), Berufspilotenlizenz (CPL), Verkehrspilotenlizenz (ATPL), Sportpilotenlizenz (SPL) und die Leichtluftfahrt - Pilotenlizenz (LAPL). Im Rahmen der Analyse wurde eine Subkategorie für SPL und LAPL zusammen gebildet.

Für die Analyse der *gesamten Flugerfahrung des Piloten* in Stunden wurde sich an der Einteilung nach Bazargan et. al. anhand von FAR Teil 61 orientiert. Dabei wurde unterschieden in Piloten mit weniger als 100 Stunden, zwischen 100 und 300 Stunden, 300 bis 2.000 Stunden, 2.000 bis 5.000 Stunden, sowie alle Piloten mit mehr als 5.000 Stunden Flugerfahrung <sup>29</sup>. Beobachtet wurde zudem das Vorkommen von *Illusionen*. Dieser Begriff bezieht sich auf visuelle oder sensorische Wahrnehmungsfehler, die Piloten während des Fluges erleben können. Diese Illusionen können durch verschiedene Faktoren verursacht werden, wie zum Beispiel die Umgebung, die Flugbedingungen oder die individuelle Wahrnehmung des Piloten. Illusionen können gefährlich sein, da sie das Urteilsvermögen und die Handlungsweise des Piloten beeinflussen können, was zu potenziell gefährlichen Situationen führen kann.

In der Kategorie „*Flugbedingungen*“ wurden Tag-/Nachtbedingungen, Vorhandensein von Frostzuständen und die Art der angewandten Flugregeln (VFR/IFR) analysiert in Bezug auf den Ausgang eines Kleinflugzeugunfalls. Unfälle wurden der Tageszeit zugeordnet, wenn sich dieser in der Zeit zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang ereignete. Die Flugtechniken VFR und IFR beziehen sich auf die zum Zeitpunkt des Unfalls verwendete Technik.

Kategorien	Subkategorien
Kalendarische Daten	Datum [TT MM JJJJ]
	– Jahr [Bsp. 2000]
	– Monate [Januar – Dezember]
	– Jahreszeiten [Frühling, Sommer, Herbst, Winter]
	– Wochentage [Montag – Sonntag]
	– Wochenende [ja, nein]
	– Quartale [Erstes-, zweites-, drittes-, viertes Quartal]
Notsituation	Triebwerksausfall [ja, nein]
	Brand [ja, nein]
Flugzeugparameter	Kategorie [ $\leq$ 2000kg, 2000 – 5700kg]
	Multi-engine [ja, nein]
	Single-engine [ja, nein]
	Anzahl der Sitze [Anzahl]
	– Sitze > 4 [ja, nein]
	Anzahl der Personen an Bord [Anzahl]
	– Anzahl der Personen an Bord $\leq$ 3 [ja, nein]
	– Anzahl der Personen an Bord > 3 [ja, nein]
	Fahrwerk [einziehbar, festgestellt]
	Flugzeugtyp [Name]
	– Diamond Aircraft Industries [ja, nein]
	– Cessna Aircraft Company Inc. [ja, nein]
– Piper Aircraft, Inc. [ja, nein]	
– Beechcraft Corporation [ja, nein]	
– Flugzeugtyp sonstige [ja, nein]	
Maximale Abflugmasse (MTOW) [kg]	
Lokalisation und Flugphase	Distanz [<10km, >10km]
	Flugphase [Start/Steigflug, Reiseflug, Sinkflug/Landeanflug, Landung]
Pilot Faktoren	Cockpit Crew/Besatzung [Anzahl]
	Erfahrung des Piloten- gesamt [Stunden]
	Erfahrung des Piloten- auf diesem Muster [Stunden]
	Lizenz des Piloten [PPL, CPL, SPL, LAPL, ATPL]

	– PPL [ja, nein]
	– CPL [ja, nein]
	– SPL, LAPL [ja, nein]
	– ATPL [ja, nein]
	– Berufs- oder Privatpilotenlizenz [Berufspilotenlizenz, Privatpilotenlizenz]
	Visuelle Täuschung oder Wettereinflüsse (Illusions) [ja, nein]
	Menschliche Faktoren [ja, nein]
Wetter	Zeit [Tag, Nacht]
	Frostzustände [ja, nein]
	Flugregeln [IFR, VFR]
Sonstige	Anlass des Fluges [Transport, Freizeitflug, Rundflug, sonstiger Fluggrund, Luftfahrtveranstaltung, Trainingsflug, Testflug]
	- Transport [ja, nein]
	- Freizeitflug [ja, nein]
	- Rundflug [ja, nein]
	- Sonstiger Fluggrund [ja, nein]
	- Luftfahrtveranstaltung [ja, nein]
	- Trainingsflug [ja, nein]
	- Testflug [ja, nein]
	Missachtete Regeln [ja, nein]
Ergebnis	Tot [ja, nein]
	– Tot [%]
	– Tot [Anzahl]
	Lebend [Anzahl], [ja/nein]
	– Unverletzt [ja/nein], [Anzahl]
	– Leicht verletzt [ja/nein], [Anzahl]
	– Schwer verletzt [ja/nein], [Anzahl]
	Verletzungsschwere Punkte [1,2,3,4]
	– zusammengefasste Verletzungsschwere [leichter- / schwerer Ausgang]

Tabelle 2 – Kategorienkonstrukt der Untersuchungsberichte der BFU

Im Ergebnisteil werden die Kategorien und Subkategorien entsprechend ihrer Häufigkeit und der Verletzungsschwere präsentiert. Die Auswertung basiert auf der Anzahl der Untersuchungsberichte, in denen die entsprechende Verletzungsschwere verzeichnet ist. Die angegebene Verletzungsschwere entspricht dabei der schwerstverletzten Person aus einem Bericht.

### **3.6 Statistische Verfahren**

Die aus den Untersuchungsberichten gewonnenen Daten der BFU (Tabelle 2) zu den einzelnen Subkategorien wurden in Excel festgehalten. Im Anschluss wurden die Daten aufbereitet, um eine erfolgreiche Datenanalyse durchführen zu können. Die vollständige Excel Urdatenliste wurde anschließend in das Statistik Programm SPSS (IBM® Armonk, New York, USA) zur Erstellung der deskriptiven Statistik und zur Entwicklung der Scores übertragen und kodiert.

Im sog. Data View Fenster erfolgte in jeder Zeile die Abbildung eines Flugunfalls. In den Spalten sind die als Subkategorie erfassten Aspekte ersichtlich. Die Subkategorien wurden mit Zahlenwerten verknüpft und somit verkodet. Durch die Kodierung repräsentieren diese Zahlenwerte die Informationen der Subkategorien. Als Variablentyp wurde für jede Subkategorie die Ganzzahl ausgewählt. Die Eingabe der Daten in die Datensoftware erfolgte manuell. Fehlende Informationen zu Flugzeugparametern (z.B. Motor, Anzahl der Sitze, Fahrwerk) wurden, falls möglich, ergänzt. Alle weiteren Werte wurden als fehlend kodiert. Zur Datenbereinigung erfolgte nach gewissenhafter Eingabe eine Durchsicht auf unplausible Werte.

Im Rahmen der deskriptiven Statistik erfolgten Korrelationsanalysen mittels Chi<sup>2</sup>-Test, sowie Mann-Whitney-U-Test. Dabei wurde der Zusammenhang aller aufgeführten Kategorien, sowie Sub- und Subsubkategorien jeweils mit zwei Ausgangssituationen ermittelt: einem „tödlichen Ausgang“ und einem „schweren Ausgang“. Bei einem p-Wert unter 0,05 wurde von einem statistisch signifikanten Zusammenhang ausgegangen. Der positive oder negative Einfluss wird dabei durch die Odds Ratio angegeben und mittels Kreuztabellen berechnet.

Für die statistische Ausarbeitung wurde eine Statistikberatung der Universität zu Köln in Anspruch genommen. Zur Beantwortung der Fragestellungen wurden drei Berechnungen mittels logistischer Regression durchgeführt. Hierbei wurden die Variablen verwendet, welche in der Korrelationsanalyse einen signifikanten Einfluss auf das untersuchte Outcome haben. Im Falle einer metrischen oder kategorialen Variable wurden diese als Dummy-Variablen kodiert. Zum Ausschluss einer Multikollinearität zwischen den unabhängigen Variablen, wurde eine Kollinearitätsstatistik mittels linearer Regression durchgeführt.

Von den in die Studie einbezogenen Kategorien und Subkategorien wurden Parameter identifiziert, die für die Disposition in Notfalleitstellen und damit für eine effiziente Versorgung am Unfallort relevant sind. Diese wurden als Kernparameter ausgewählt, da sie im Falle eines Notrufs abgefragt und bewertet werden können. Diese sind in Anhang A blau hervorgehoben.

Zur Beantwortung der Fragestellungen wurden drei Berechnungen mittels binärer logistischer Regression (schrittweise Rückwärtsmethode) durchgeführt. Für die erste Berechnung wurde als abhängige Variable das Outcome „Tod“, sowie als unabhängige Variablen alle für dieses Outcome signifikanten Subkategorien.

Die zweite Regressionsanalyse beinhaltet ebenfalls die abhängige Variable „Tod“. Als unabhängige Variablen flossen alle signifikanten Subkategorien ein, welche als Kernparameter für die Disposition in Notfalleitstellen ausgesucht wurden und ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf einen tödlichen Ausgang haben.

Die dritte Berechnung diente der Prognose der Verletzungsschwere wofür die abhängige, binäre Variable „Verletzungsschwere zusammengefasst“ verwendet wurde, wobei die Wahrscheinlichkeit eines schweren Ausgangs untersucht wurde. Die unabhängigen Variablen waren alle Subkategorien mit einem signifikanten Einfluss auf die Subkategorie „Verletzungsschwere zusammengefasst“.

Die errechneten Werte der Parameter (in SPSS als „RegressionskoeffizientB“ dargestellt) können nun zur Prognose eines tödlichen Kleinflugzeugabsturzes in die Formel der logistischen Regression eingefügt werden (Abbildung 1). Der Regressionskoeffizient gibt an wie stark sich die logarithmische Chance des Ereignisses ( $P(y=1)$ ) verändert, wenn die Variable um eine Einheit steigt, während alle anderen Variablen konstant gehalten werden.

$P(y = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \dots + \beta_k \cdot x_k + \varepsilon)}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>x_k</math> = unabhängige Variablen</li> <li><math>\beta_k</math> = Regressionskoeffizienten</li> <li><math>\varepsilon</math> = Fehlerwert</li> </ul>
---	--

*Formel 1 - Formel logistische Regression*

Im Falle des Zutreffens einer Kategorie, wird der Regressionskoeffizient mit „1“ multipliziert. Ist die Kategorie nicht zutreffend, wird mit „0“ multipliziert. Trifft keine Kategorie zu wird die Wahrscheinlichkeit der Ereignisses ( $P(y=1)$ ) durch den Wert „Konstante“ dargestellt.

Zur Bewertung der Regressionsmodelle führt SPSS verschiedene Tests durch. Der Chi<sup>2</sup>-Test („Omnibus-Test der Modellkoeffizienten“ in SPSS) überprüft die Gesamtsignifikanz des Modells, wobei ein p-Wert unter 0,05 als signifikant betrachtet wird. Der Wald-Test dient in der

logistischen Regression dazu, die Bedeutung einzelner Regressionskoeffizienten zu überprüfen. Er untersucht, ob der geschätzte Einfluss einer Variablen tatsächlich ungleich null ist oder ob dieser auch rein zufällig zustande gekommen sein könnte. In der SPSS-Ausgabe findet sich dazu die Spalte „Wald“, in der die Teststatistik angegeben ist: Je höher dieser Wert ausfällt, desto stärker spricht er dafür, dass der Effekt der Variablen tatsächlich existiert. Ergänzend dazu zeigt die Spalte „Sig.“ den zugehörigen p-Wert. Dieser gibt an, wie wahrscheinlich es ist, dass der beobachtete Effekt nur durch Zufall entstanden ist. Üblicherweise gilt ein p-Wert kleiner als 0,05 als Hinweis auf einen statistisch signifikanten Einfluss. Eine weitere wichtige Kennzahl ist der Standardfehler (S.E.), der die Genauigkeit der Schätzung des Regressionskoeffizienten beschreibt. Je kleiner dieser Wert, desto verlässlicher ist die Schätzung und desto stabiler ist der Einfluss der Variable einzuschätzen. Schließlich enthält die Spalte „df“ (degrees of freedom, Freiheitsgrade) die Anzahl der Koeffizienten, die im jeweiligen Test geprüft werden. Wird nur ein einzelner Regressionskoeffizient getestet, beträgt der Wert in der Regel 1. Die Odds Ratio ( $\text{Exp}(B)$ ) zeigt den Einfluss der Parameter auf einen tödlichen/schweren Ausgang an, wobei ein  $\text{Exp}(B)$  von 1,0 keinen Einfluss bedeutet und ein  $\text{Exp}(B)$  von 2,0 eine Steigerung der Wahrscheinlichkeit um den Faktor 2 und somit um 100% ( $2,0 - 1,0 = 1,0$ , 100%). Die Prozentuale Risikosteigerung wird somit mit folgender Formel berechnet:  $(\text{Exp}(B)-1) * 100$ . Zur Beurteilung der Modellgüte wird das Nagelkerke  $R^2$  herangezogen, wobei gemäß Backhaus et al. ein Wert von  $> 0,5$  als sehr gute Varianzaufklärung gilt<sup>30</sup>.

Im Rahmen dieser Promotionsarbeit fand ausschließlich eine retrospektive Analyse bereits vorliegender Daten statt. Diese wurden zuvor von einer Bundesbehörde erhoben, deren Vorgehen durch gesetzliche Vorgaben reglementiert ist. Um ein hohes Maß an Auswertungs- und Interpretationsobjektivität zu gewährleisten, wurden zur Analyse ausschließlich statistische Verfahren angewandt.

Die Reliabilität zeigt die Zuverlässigkeit des Erhebungsinstrumentes und die Stabilität der Messung an. Sie ist ein Maß dafür, wie sich bei wiederholten Messungen die erhaltenen Werte gleichen. Innerhalb dieses Forschungsprojektes wurde eine Analyse bereits erhobener Sekundärdaten mithilfe statistischer Verfahren durchgeführt. Aufgrund der einheitlichen Vorgehensweise und der damit verbundenen geringen Varianz wurde eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse angestrebt.

### **3.7 Ethische Aspekte**

Ziel der Datenerhebung, durch die Bundesbehörde BFU, ist die Verbesserung der Flugsicherheit und dient nicht dazu das Verschulden des Unfalls festzustellen<sup>11</sup>. Die Daten für dieses Projekt wurden ausschließlich aus bereits anonymisierten, veröffentlichten

Sekundärdaten gewonnen und erlauben keine Rückschlüsse auf einzelne Personen. Hierdurch war keine Genehmigung des institutionellen Prüfungsausschusses oder der Ethikkommission erforderlich. Die Autorin dieser Arbeit gewährleistete einen professionellen wissenschaftlichen Umgang mit dem Material in Orientierung an die WMA Deklaration von Helsinki <sup>31</sup>.

## 4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden Ergebnisse aus den Daten der Grundgesamtheit mit Hilfe computergestützter deskriptiver statistischer Verfahren dargestellt und beschrieben. Ziel dieser Promotionsarbeit ist die Identifikation von signifikanten Faktoren, welche im Rahmen von Kleinflugzeugabstürzen mit schweren- oder tödlichen Ausgängen korrelieren. Aufbauend darauf wurden die Faktoren selektiert werden welche elementar sind, um eine Vorhersage über die Verletzungs- und Überlebenschancen der Insassen treffen zu können

### 4.1 Forschungsstand

Um die Thematik dieser Arbeit wissenschaftlich einordnen zu können, wird nachfolgend ein kurzer Überblick über den aktuellen Forschungsstand gegeben (Tabelle 3). Die in der folgenden Tabelle dargestellten Daten dienen lediglich zur Veranschaulichung der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit dem genannten Thema.

Suchwörter	Treffer gesamt	Treffer vor 2000 (% von Treffer gesamt)	Treffer 2000 - 2009 (% von Treffer gesamt)	Treffer seit 2010- Okt. 2023 (% von Treffer gesamt)
General aviation	6.289	1.257 (19,9%)	1.234 (19,6%)	3.813 (60,5%)
General aviation safety	842 Ab 1958	123 (14,6%)	187 (22,2%)	534 (63,3%)
General aviation accident	464 Ab 1946	147 (31,5%)	114 (24,5%)	205 (44,0%)
General aviation logistic regression	158 Ab 1994	5 (3,2%)	25 (15,8%)	128 (81,0%)

Tabelle 3 - Publikationszahlen zu Kleinflugzeug Unfällen und -Sicherheit in PubMed (Stand Oktober 2023)

### 4.2 Gesamtübersicht der eingeschlossenen Datensätze

Die letzte Datenentnahme erfolgte am 06.02.2021, wobei die jüngsten Untersuchungsberichte im Jahr 2019 festgehalten wurden. Innerhalb des Zeitraums zwischen 2000 und 2019 wurden der BFU insgesamt 1.860 Flugunfälle und schwere Störungen mit Kleinflugzeugen gemeldet (Abbildung 2).

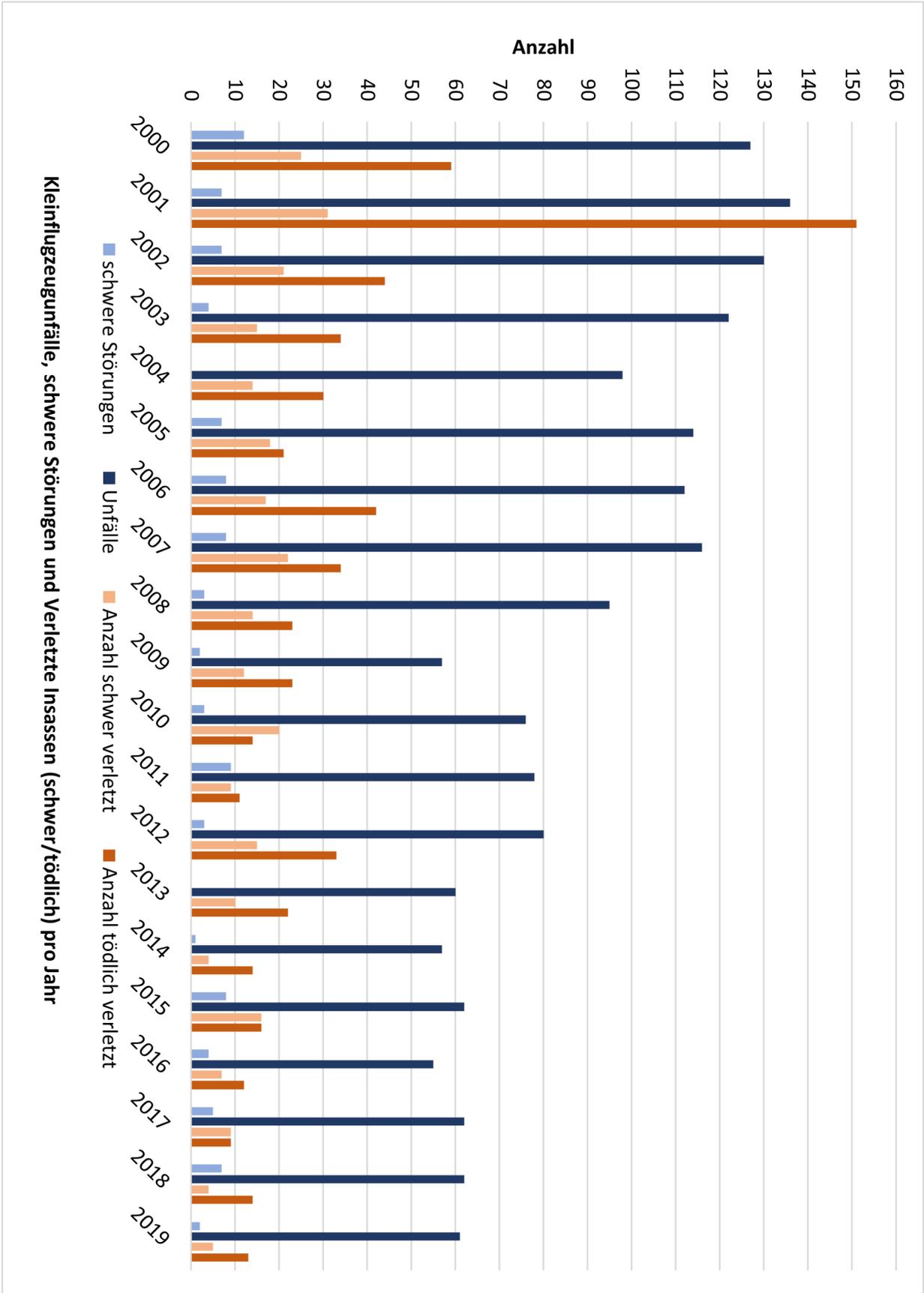


Abbildung 1 - Anzahl [n] der gemeldeten Kleinflugzeugunfälle und schwere Störungen, sowie die Anzahl der schwer- und tödlich Verletzten Personen von 2000 – 2019

In diesem Zeitraum wurden 288 Personen schwer- und 619 Personen tödlich verletzt. Von 1.860 initialen Meldungen, wurden 339 (18,2%) näher untersucht und in einem Untersuchungsbericht dokumentiert (Stand 30.06.2023)<sup>32,33</sup>. Unter Berücksichtigung der Ein- und Ausschlusskriterien konnten von 339 Untersuchungsberichten 285 (84,1%) in diese Studie einfließen (Abbildung 3).

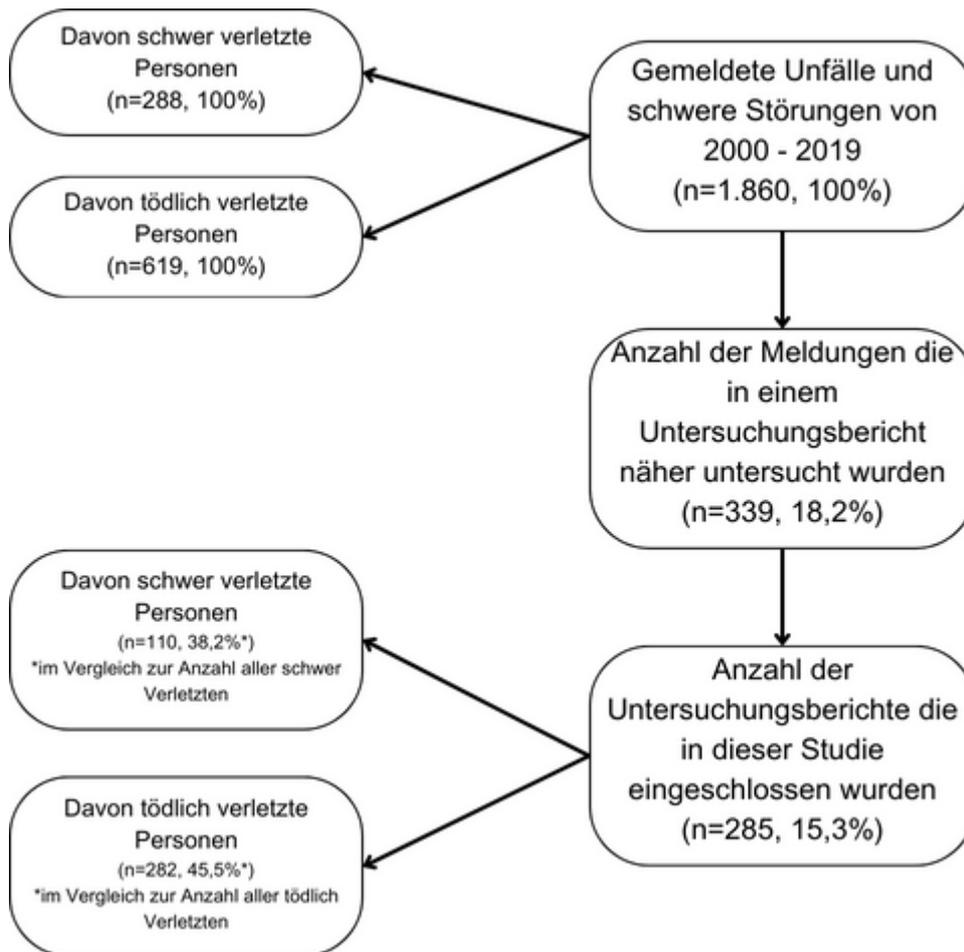


Abbildung 2 - Übersicht der gemeldeten und eingeschlossenen Störungen und Unfälle

### 4.3 Beschreibung der definierten Kategorien

#### 4.3.1 Ausgang des Unfalls

In allen 285 eingeschlossenen Untersuchungsberichten wurden Angaben zur Verletzungsschwere gemacht. Angaben zur Anzahl der Insassen fanden sich in 284 (99,6%) von insgesamt 285 Untersuchungsberichten. Von insgesamt 650 betroffenen Personen

wurden dabei 282 (43,4%) tödlich-, 110 (16,9%) schwer- und 102 (15,7%) leicht verletzt. 156 (24%) Personen blieben unverletzt (Abbildung 4).

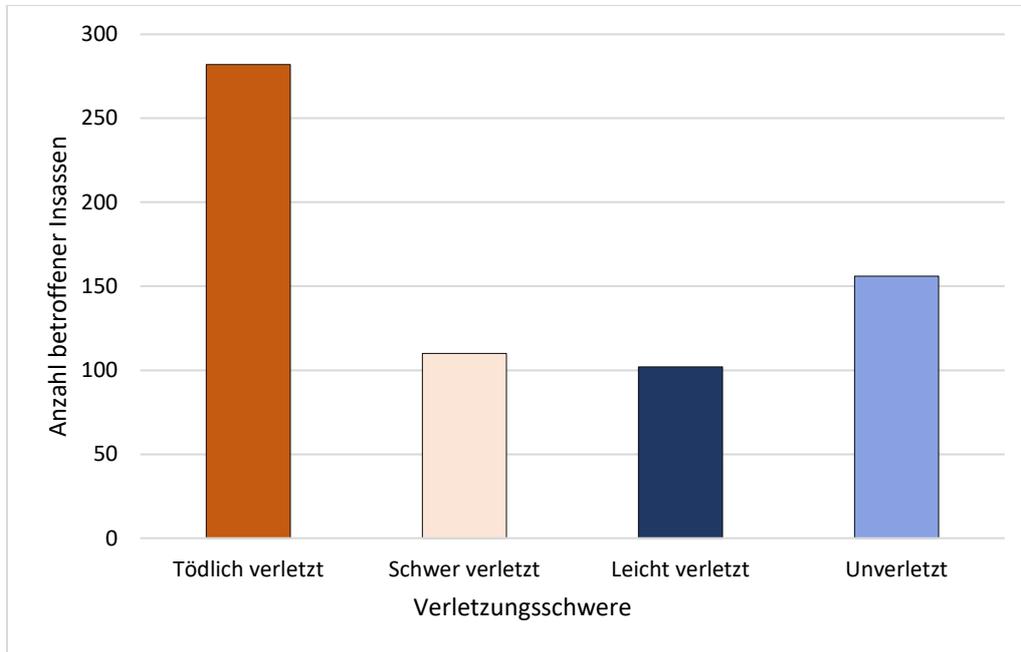


Abbildung 3 - Häufigkeitsverteilung [n] der Verletzungsschwere

### 4.3.2 Kalendarische Daten

Bei allen 285 (100%) Untersuchungsberichten floss die Monatsangabe in die Darstellung der Untersuchungsberichte mit ein. Die meisten Untersuchungsberichte wurden in den Monaten August (n = 44, 15,4%) und September (n = 38, 13,3%) erfasst. Die Monate Januar, März, April, Juni, Juli, August und September zeigen jeweils einen höheren Anteil an Überlebten Insassen im Vergleich zu tödlich Verletzten (n = 124, 61,4% ohne tödlichen Ausgang, n = 78, 38,6% mit tödlichem Ausgang).

In den verbleibenden Monaten endeten Unfälle und schwere Störungen jeweils für einen höheren Anteil der Insassen tödlich (n = 31; 37,3% ohne tödlichen Ausgang, n = 52; 62,7% mit tödlichem Ausgang). Dies konnte vor allem im letzten Quartal des Jahres beobachtet werden, wobei im Oktober 68,8% (n = 11/16), im November 60% (n = 9/15) und im Dezember 85,7% (n = 12/14) der Untersuchungsberichte mindestens einen tödlich verunglückten Insassen dokumentierten (Abbildung 5).

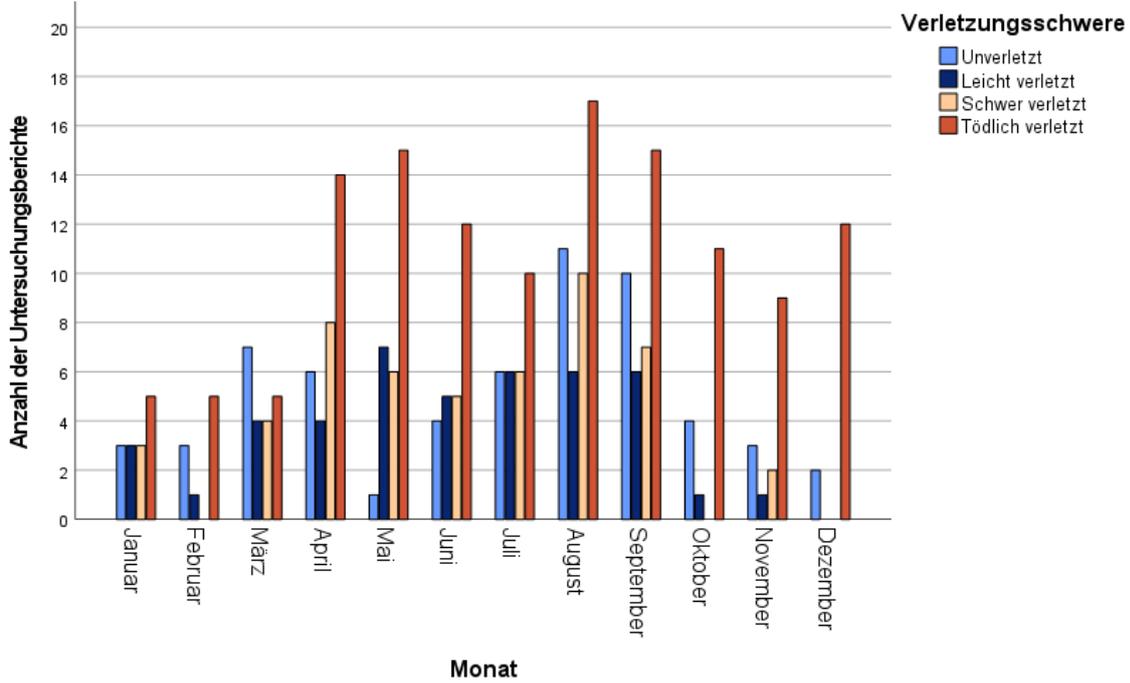


Abbildung 4 - Anzahl [n] der Untersuchungsberichte unterteilt nach Verletzungsschwere pro Monat

Prozentual endeten weniger Unfälle und schwere Störungen im Frühling ( $n = 34/81, 42\%$ ) und im Sommer ( $n = 39/98, 39,8\%$ ) für mindestens einen Insassen tödlich, als im Herbst ( $n = 35/69, 50,7\%$ ) und im Winter ( $n = 22/37, 59,5\%$ ) (Abbildung 6).

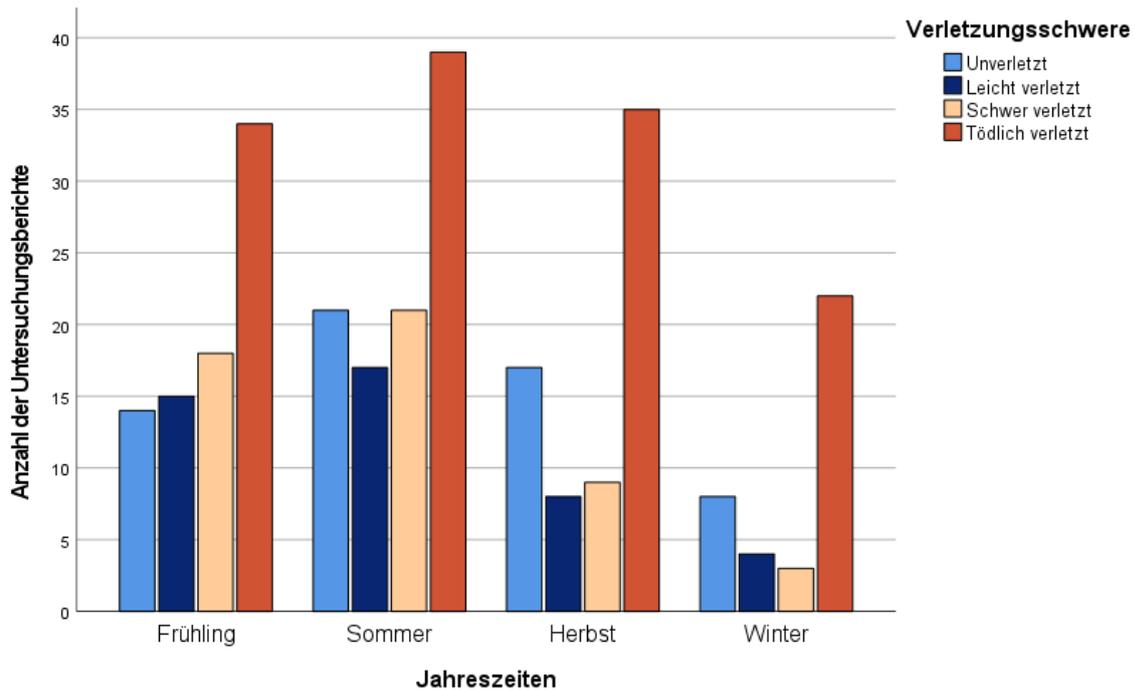


Abbildung 5 - Anzahl [n] der Untersuchungsberichte unterteilt nach Verletzungsschwere pro Jahreszeit

Insgesamt fielen 51,6% (n = 147) der Untersuchungsberichte auf das Wochenende (Freitag bis Sonntag) im Vergleich zu den Tagen unter der Woche (Montag bis Donnerstag) (n = 138, 48,4%). Untersuchungsberichte mit tödlich Verletzten wurden am Wochenende in 43,5% (n = 64) beobachtet, während unter der Woche 47,8% (n = 66) letal für mindestens einen Insassen endeten (Abbildung 7).

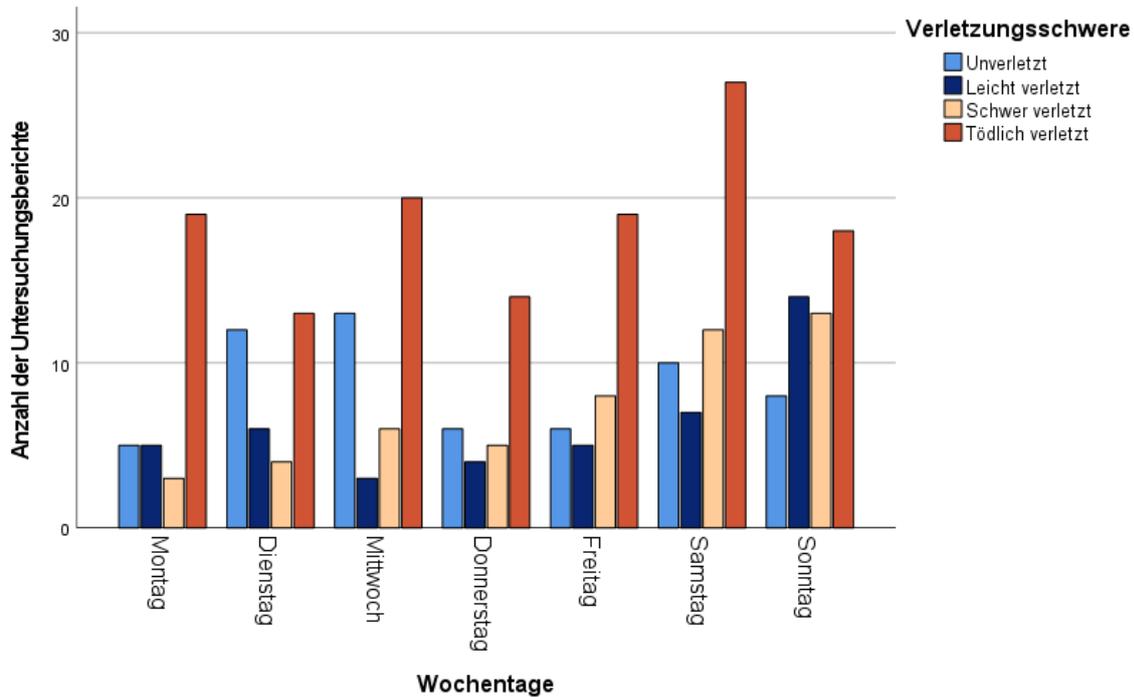


Abbildung 6 - Anzahl [n] der Untersuchungsberichte unterteilt nach Verletzungsschwere pro Wochentag

### 4.3.3 Art der Notsituation

Von 285 Untersuchungsberichten, enthielten 280 (98,2%) Berichte Informationen, ob sich ein Ausfall der Triebwerke ereignet hatte. Dabei konnte bei 63 (22,5%) Unfällen und schweren Störungen ein Triebwerksausfall dokumentiert werden, wobei 23,8% (n = 15) tödlich ausgingen. Kam es nicht zu einem Triebwerksausfall (n = 217, 77,5%), starb mindestens ein Insasse in 52,5% (n = 114) der Fälle.

In allen 285 eingeschlossenen Untersuchungsberichten wurden Angaben zur Brandentwicklung festgehalten, wobei ein Brand in 24,9% (n = 71) der Fälle dokumentiert wurde. Dabei kam es in 78,9% (n = 56) zu tödlichen Verletzungen. Ohne Einfluss von Bränden (n = 214, 75,1%) führten 34,6% (n = 74) der Fälle zu mindestens einem tödlichen Ausgang.

#### 4.3.4 Flugzeugparameter

Unfälle mit Kleinflugzeugen, die der Kategorie „sonstige Hersteller“ zugeordnet wurden, wurden in 48,8% (n = 139) der Untersuchungsberichte dokumentiert. Ein tödliches Ereignis wurde in 75 (54%) Untersuchungsberichten festgehalten. Dem Luftfahrzeughersteller „Cessna“ wurden 66 (23,2%) Unfälle und schwere Störungen zugeordnet, wovon 19 (28,8%) letal ausgingen. Für Kleinflugzeuge des Herstellers „Piper Aircraft“ wurden 20 (41,7%) tödliche- von insgesamt 48 (16,8%) Unfällen verzeichnet. Weitere 14 (4,9%) ereigneten sich mit Flugzeugen des Herstellers „Beechcraft“. Hierbei kam bei 7 (50%) Unfällen mindestens ein Insasse ums Leben. Unfälle mit Flugzeugen des französischen Herstellers „Avions Robin“ wurden 18 (6,3%) mal erfasst mit insgesamt 9 (50%) letalen Ereignissen (Abbildung 8).

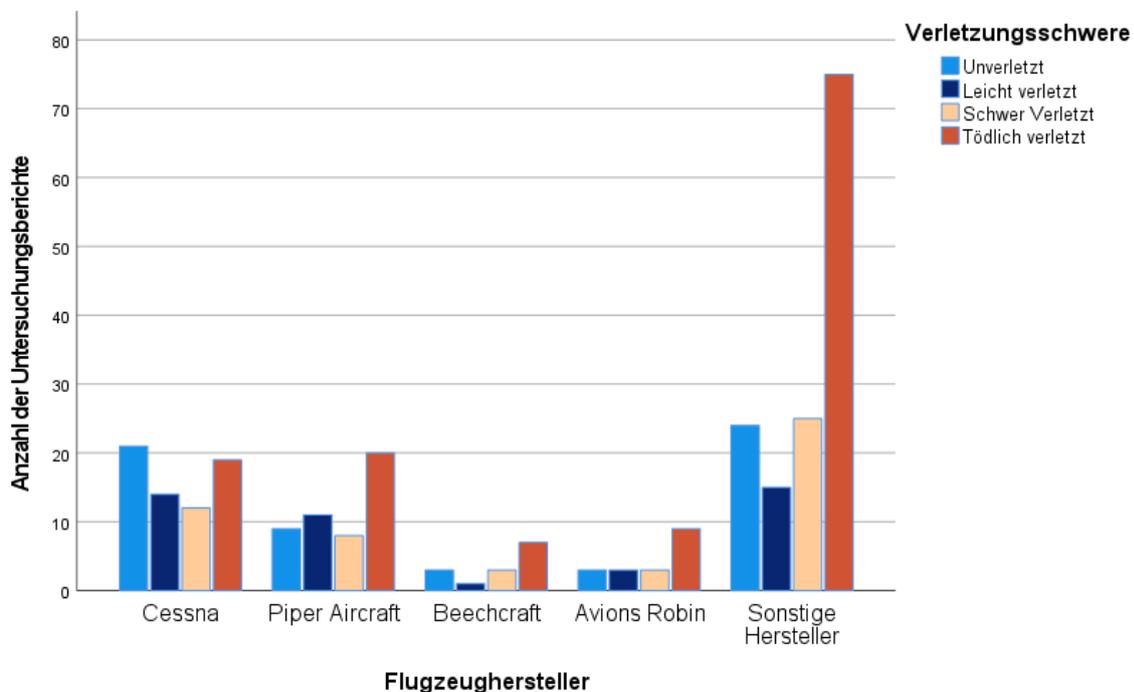


Abbildung 7 - Anzahl [n] der Kleinflugzeugunfälle unterteilt nach Flugzeughersteller und Verletzungsschwere der Insassen

Ein Anteil von 83,5% (n = 238) ist den Kleinflugzeugen mit einer *maximalen Abflugmasse* <2 Tonnen zuzuschreiben, wobei sich in 47,5% (n = 113) tödliche Verletzungen zutragen. In der Gewichtsklasse mit Flugzeugen zwischen 2 – 5,7 Tonnen (n = 47, 16,5%) ereignete sich in 36,2% (n = 17) ein letaler Unfall.

Die *Anzahl der Triebwerke* war in 284 (99,6%) Untersuchungsberichten angegeben. Davon waren 234 (82,4%) Kleinflugzeuge einmotorig, wovon in 109 (46,6%) Fällen von einem tödlichen Ausgang berichtet wurde. Unfälle und schwere Störungen mit mehrmotorigen

Kleinflugzeugen ereigneten sich in 17,6% (n = 50). Hierbei wurde in 40% (n = 20) mindestens eine Person tödlich verletzt.

Das *Fahrwerk* eines Flugzeuges besteht aus Rädern mit Reifen, Felgen und Bremsen, die an gedämpften Federbeinen, oder starren Systemen aufgehängt sind. Dieses Gebilde kann sowohl feststehend als auch einfahrbar sein <sup>34</sup>. Diese Information konnte 281 (98,6%) Untersuchungsberichten entnommen werden, wobei das Fahrwerk in 176 (62,6%) Fällen festgestellt und bei 105 (37,4%) Kleinflugzeugen einfahrbar war. Ereignete sich ein Unfall oder eine schwere Störung mit festgestelltem Fahrwerk ging diese in 72 (40,9%) Vorfällen tödlich aus. Bei einfahrbarem Fahrwerk ereigneten sich tödliche Unfälle in 51,4% (n = 54).

Als weitere Subkategorie der Flugzeugparameter wurden die *Anzahl der Sitze* des verunglückten Flugzeuges erfasst und konnte 283 (99,3%) Untersuchungsberichten entnommen werden. Die Anzahl der Sitze variierte von einem bis zwölf Sitzen, sowie einem Flugzeug mit 19 Sitzen. Kleinflugzeuge mit vier Sitzen wurden als häufigste Form in 119 Berichten (42,0%) verzeichnet. Eine detaillierte Übersicht über die Verletzungsschwere anhand der Anzahl der Sitze ist nachfolgend in Abbildung 9 graphisch dargestellt.

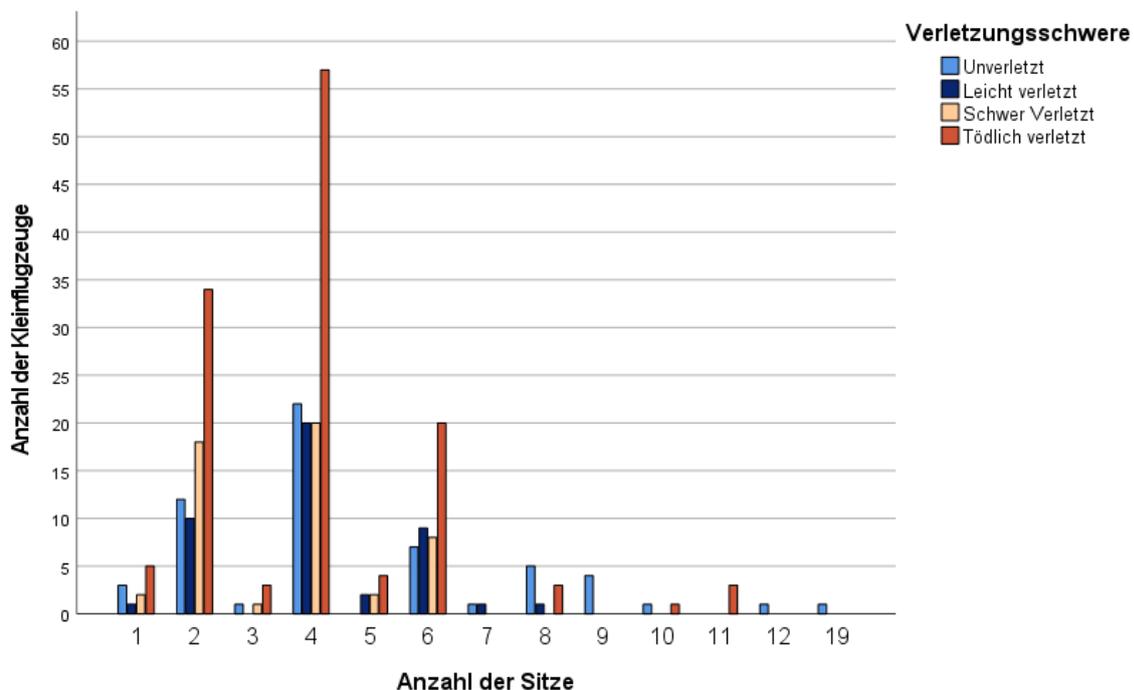


Abbildung 8 - Anzahl der Kleinflugzeuge [n] unterteilt nach Verletzungsschwere unterteilt nach Anzahl der Sitze

Die *Anzahl der Personen an Bord* weicht von der Anzahl der Sitze ab. Obwohl nur 90 (31,8%) Flugzeuge in den Untersuchungsberichten drei oder weniger Sitze an Bord haben, ereigneten

sich 232 (81,7%) Unfälle mit ein bis drei Personen an Bord. Informationen zur Insassenzahl konnten 284 (99,6%) Berichten entnommen werden und variierten von einem bis neun Passagieren. Tödliche Vorfälle mit ein bis drei Personen an Bord wurden 112 (53,1%) mal registriert, während für Unfälle mit vier oder mehr Passagieren (n=52, 18,3%) 18 (24,6%) tödliche Ereignisse erfasst werden konnten (Abbildung 10).

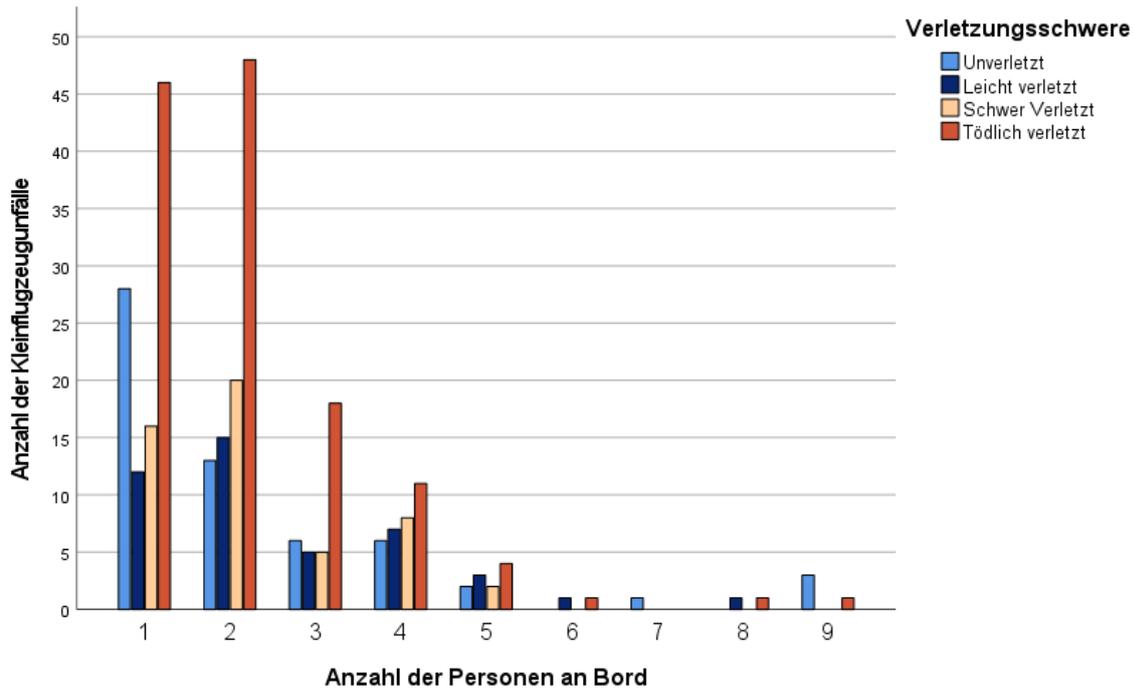


Abbildung 9 - Anzahl der Kleinflugzeuge [n] unterteilt nach Verletzungsschwere unterteilt nach Anzahl der Personen an Bord

#### 4.3.5 Lage und Flugphase

Informationen über die *Flugphasen* wurden in 99,6% (n = 284) der Untersuchungsberichte erfasst. Am häufigsten ereigneten sich Flugunfälle in der Startphase (n = 83, 29,2%), gefolgt von der Landephase (n = 79, 27,8%). Während des Reisefluges wurden 70 (24,6%) Unfälle dokumentiert. Während des Sinkfluges ereigneten sich die wenigstens Unfälle (n = 52, 18,3%). Unfälle mit mindestens einem tödlich verletzten Passagier waren mit 74,3% (n = 52) in der Phase des Reisefluges zu finden. Während des Sinkfluges trugen sich 31 (59,6%) tödliche Ausgänge zu. Diese wurden in der Startphase 35 (42,2%) mal erfasst und am seltensten in der Landephase mit 13,9% (n = 11) dokumentiert (Abbildung 11).

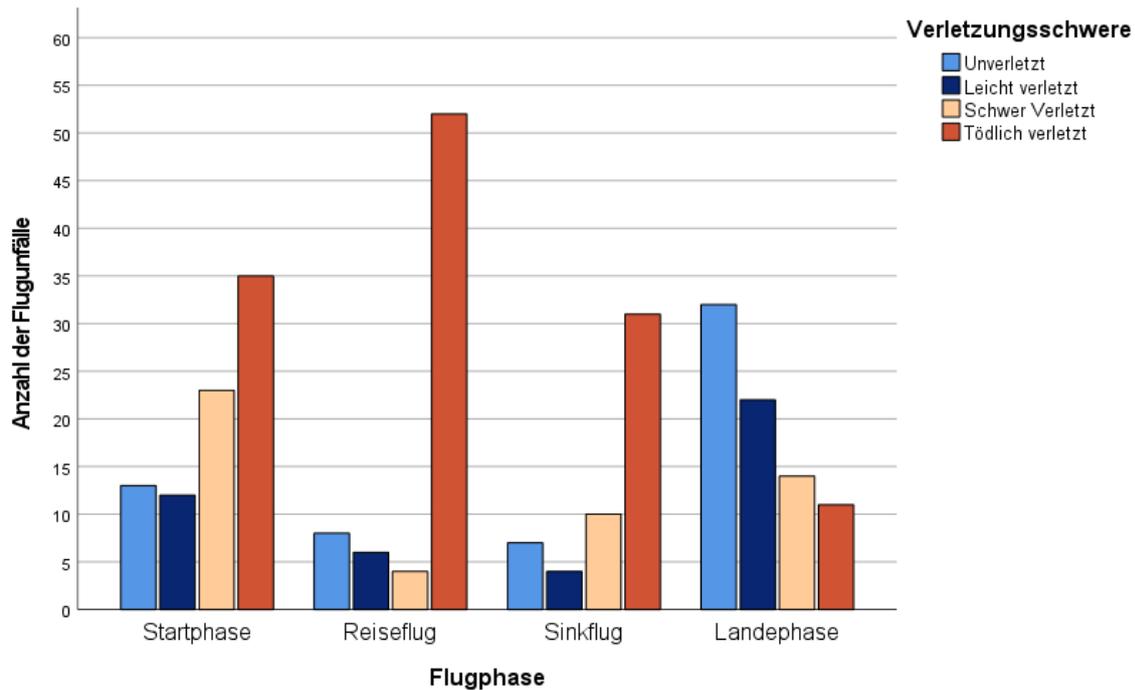


Abbildung 10 - Anzahl der Flugunfälle [n] unterteilt nach Verletzungsschwere und Flugphase

Die Entfernung zu einem geeigneten und geplanten Landeplatz wurde in 99,6% (n = 284) der Untersuchungsberichte angegeben, wobei im Rahmen dieser Studie eine Unterscheidung zwischen einer Luftlinie kürzer oder weiter als zehn Kilometer entfernt, stattgefunden hat. In 81% (n = 230) war die Distanz unter 10 km, wobei sich bei 88 Unfällen (38,3%) ein Insasse tödlich verletzte. Im Falle von einer größeren Entfernung (n = 54, 19%) zogen sich in 77,8% (n = 42) Passagiere letale Verletzungen zu.

#### 4.3.6 Pilotenparameter

Angaben zu den Fluglizenzen der Piloten fanden sich in 273 (95,8%) Untersuchungsberichten. Insgesamt hatten 196 (71,8%) Flugzeugführer eine Privatpilotenlizenz (PPL). Zur Gruppe der Berufspiloten (CPL) gehörten 20,1% (n = 55). Weitere 17 (6,2%) trugen die Airline-Transport Pilotenlizenz (ATPL). Die Sportpilotenlizenz (SPL), sowie die Leichtluftfahrzeug-Pilotenlizenz (LAPL) waren zusammen in 1,8% (n = 5) vertreten. Tödliche Zwischenfälle wurden bei allen Lizenzen in vergleichbarer Häufigkeit (zwischen 40% und 47%) verzeichnet (Abbildung 12).

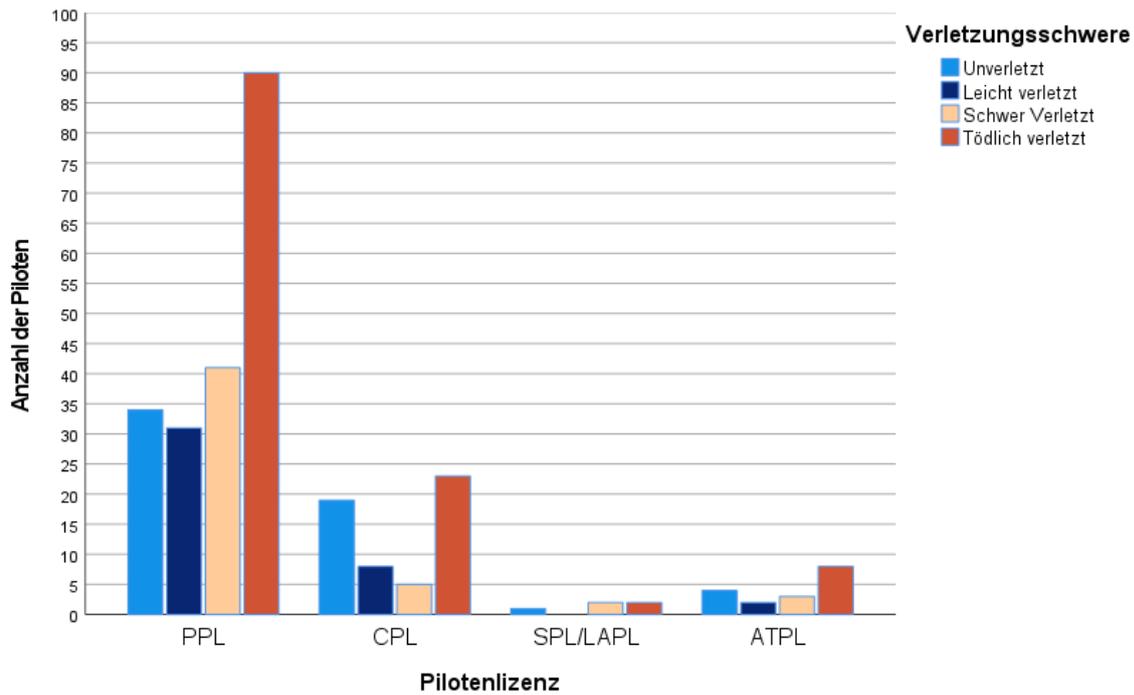


Abbildung 11 - Anzahl der Piloten [n] unterteilt nach Verletzungsschwere und Pilotenlizenz

Die Anzahl der Crew Mitglieder im Cockpit wurde in 284 (99,6%) Untersuchungsberichten angegeben, wobei 252 (88,7%) Kleinflugzeuge mit nur einem Piloten besetzt waren. Unfälle mit nur einem Piloten resultierten in 115 (45,6%) Fällen mit einem tödlichen Ereignis. Unfälle und schwere Störungen mit einem zweifach besetzten Cockpit (n = 32, 11,3%) führten zu 15 (46,9%) letalen Ausgängen.

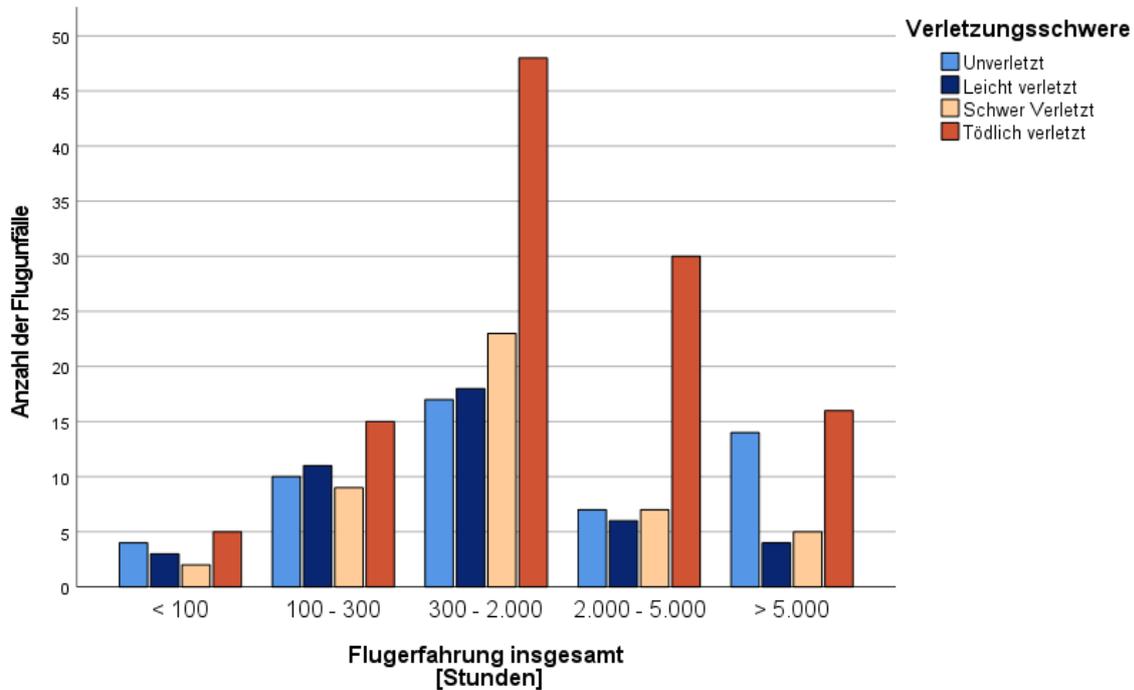


Abbildung 12 - Anzahl der Flugunfälle [n] unterteilt nach Verletzungsschwere und Flugferahrung des Piloten in Stunden

Angaben zur *gesamten Flugerfahrung der Piloten* konnten 254 (89,1%) Untersuchungsberichten entnommen werden. Unfälle mit den unerfahrensten Piloten (n = 14, 5,5%) hatten in 35,7% (n = 5) tödliche Folgen. Zwischen 100 und 300 Flugstunden konnten 45 (17,7%) Piloten nachweisen, wobei sich in 15 (33,3%) Fällen tödliche Unglücke ereigneten. Die häufigste Kategorie bilden Piloten mit Erfahrungsstunden zwischen 300 und 2.000 Stunden (n=106, 41,7%). Unfälle mit Piloten dieser Erfahrungsstufe resultierten in 45,3% (n = 48) mit letalen Ausgängen.

Lag die Flugerfahrung zwischen 2.000 – 5.000 Stunden (n = 50, 19,7%), führten 60% (n = 30) dieser Unfälle zu tödlichen Ereignissen. Sehr erfahrene Piloten mit über 5.000 Stunden Flugerfahrung waren in 15,4% (n = 39) der Unfälle und schweren Störungen beteiligt. Davon resultierten 16 (41,0%) Fälle für mindestens einen Passagier letal (Abbildung 13).

Die *Erfahrung des Piloten auf dem verunfallten Flugmodell* war in allen eingeschlossenen Untersuchungsberichten dokumentiert (n = 285, 100%). Unter 100 Stunden Flugerfahrung auf dem Modell hatten 35,8% (n = 102) der Piloten. Innerhalb dieser Gruppe wurde bei 44 (43,1%) Ereignissen ein Reisender tödlich verletzt. Weitere 39 Piloten (13,7%) hatten eine Flugerfahrung zwischen 100 und 300 Stunden, wobei sich tödliche Unglücke 16 (41,0%) mal ereigneten.

Am häufigsten wiesen die Piloten 300 bis 2.000 Flugstunden Erfahrung auf (n=133, 46,7%). Tödliche Verletzungen ereigneten sich dabei in 51,9% (n = 69). Neun Piloten (11,1%) konnten 2.000 bis 5.000 Stunden Erfahrung auf dem verunfallten Modell vorweisen, wobei sich nur bei einem (3,2%) Unfall letale Verletzungen ergaben. Bei den Piloten mit über 5.000 Stunden Erfahrung auf dem verunfallten Modell (n = 2, 0,7%) gab es keine tödlichen Verletzungen (Abbildung 14).

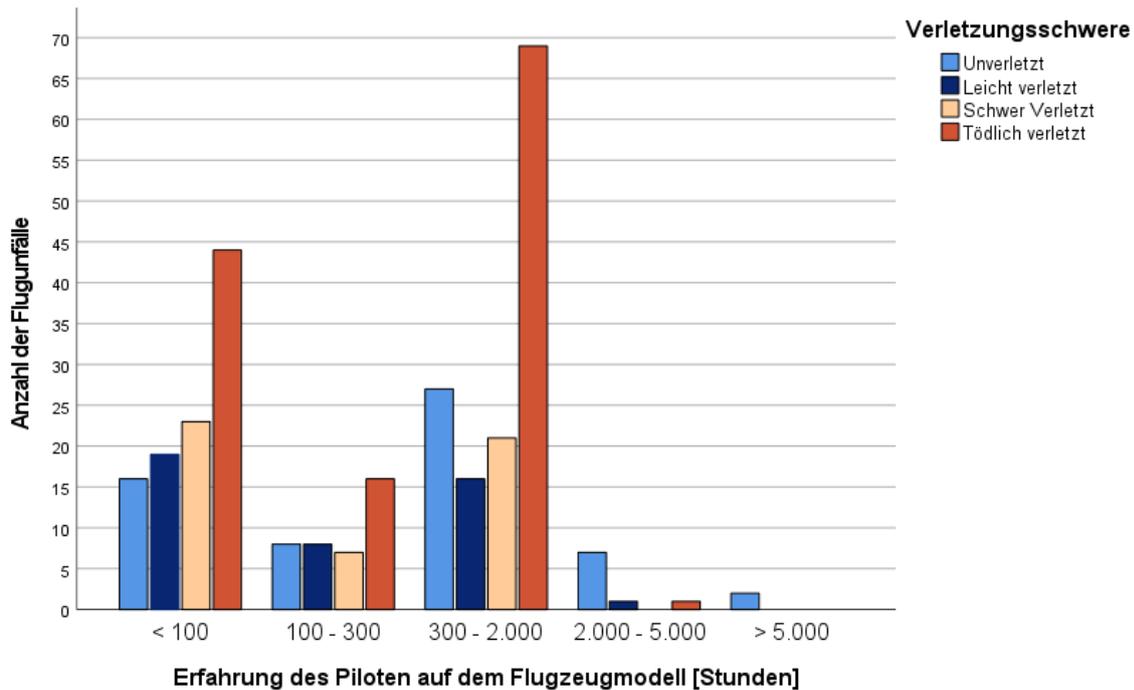


Abbildung 13 - Anzahl der Flugunfälle [n] unterteilt nach Verletzungsschwere und Flugerfahrung des Piloten auf dem Modell in Stunden

In 29,1% (n = 83) von 285 Unfällen und schweren Störungen wurden *Illusionen* berichtet, wobei diese in 67,5% (n = 56) zu letalen Verletzungen führten. Ohne Illusionen (n = 202, 70,9%), wurden 74 (36,6%) tödliche Ausgänge dokumentiert.

Insgesamt wurden 275 Untersuchungsberichte ausgewertet, in denen der Einfluss von *menschlichen Faktoren* auf die Unfallentstehung dokumentiert wurde. Unter diesen Berichten wurde festgestellt, dass in 79,3% der Fälle (n = 218) Flugunfälle von menschlichen Faktoren beeinflusst wurden. Fast die Hälfte (n = 108, 49,5%) der Unglücke wies tödliche Verletzungen für mindestens einen Insassen auf. Ohne den Einfluss menschlicher Faktoren (n = 57, 20,7%) wurden Passagiere in 26,3% (n = 15) tödlich verletzt.

#### 4.3.7 Flugbedingungen

Unfälle am Tag betrafen 91,6% (n = 261) der Flugunfälle. In der *Nacht* ereigneten sich 8,4% (n = 24) der Unglücke. Tödliche Ereignisse ereigneten sich prozentual gleichermaßen am Tag (n = 119, 45,6%) und in der Nacht (n = 11, 45,8%).

Von den untersuchten Flugunfällen traten *Frostzustände* in 6,3% der Fälle auf (n = 18), wobei dabei 11 Unfälle (61,1%) tödlich verliefen. Die Mehrheit der Flugunfälle ereignete sich jedoch ohne Frostbedingungen (n = 267, 93,7%). Von diesen Unfällen wurden 44,6% (n = 119) als tödliche Ereignisse dokumentiert.

Angaben zu den verwendeten *Flugregeln* zum Unfallzeitpunkt wurden in 281 (98,6%) Untersuchungsberichten festgehalten. Im Rahmen dieser Studie wurden 255 (90,7%) Unfälle erfasst, bei denen, zum Zeitpunkt des Unfalls, mittels Sichtflugregeln geflogen wurde. Hiervon konnten letale Verletzungen bei 117 (45,9%) Ereignissen erfasst werden. Flüge unter Instrumentenflugregeln fanden in 9,3% (n = 26) statt und waren für 12 (46,1%) tödliche Unglücke verantwortlich.

#### **4.3.8 Sonstiges**

In allen 285 Untersuchungsberichten wurden Angaben zur *Intention des Fluges* festgehalten. Dabei wurden sechs Hauptgründe identifiziert, während alle anderen Gründe der Kategorie "sonstige Fluggründe" zugeordnet wurden. Zwölf Flüge (4,2%) wurden zum Zweck des Transportes gestartet, wobei 50% (n = 6) letale Ereignisse verzeichneten. Freizeitflüge wurden in 63 (22,1%) Fällen mit 28 (44,4%) tödlichen Unfällen dokumentiert. Sightseeing Flüge machten 15% (n = 43) der Unfälle aus. Hierbei wurden Passagiere bei 15 (34,9%) Vorfällen tödlich verletzt. Flüge bei Luftfahrtveranstaltungen machten 7,4% (n = 21) und davon neun (42,9%) letale Unfälle aus. Trainingsflüge konnten 27 (9,5%) Unfällen und elf (40,7%) tödlichen Unglücken zugeordnet werden. Während Testflügen ereigneten sich sechs (2,1%) Unfälle wovon zwei Drittel (n = 4, 66,6%) tödlich ausgingen. Schließlich wurden 113 (39,6%) Unfälle und schwere Störungen der Kategorie „sonstige Fluggründe“ zugeordnet. In dieser Kategorie waren insgesamt 57 (50,4%) tödliche Fälle zu verzeichnen.

In 98,9% der untersuchten Berichte (n = 282) konnte festgestellt werden, ob eine *Missachtung der Regeln* vorlag. Diese wurden in 73,4% (n = 207) nicht missachtet und die Unfallursache konnte anderen Gründen zugeordnet werden. Tödlich verletzt wurden Insassen dabei in 93 (44,9%) Fällen. Bei Missachtung der Regeln (n = 75, 26,6%) wurden Passagiere bei 36 (48,0%) Flugunfällen tödlich verletzt.

#### **4.4 Ergebnisse durch Signifikanztestung**

Zur Beantwortung der Forschungsfrage welche Faktoren einen signifikanten Einfluss auf die Verletzungs- und Überlebenswahrscheinlichkeit von Insassen aus Kleinflugzeugunfällen haben, wurden Analysen mittels Pearson Chi<sup>2</sup>-Test durchgeführt. Dabei wurde der Zusammenhang aller aufgeführten Kategorien, sowie Sub- und Subsubkategorien jeweils mit zwei Ausgangssituationen ermittelt: einem „tödlichen Ausgang“ und einem „schweren Ausgang“. Bei einem p-Wert unter 0,05 wurde von einem statistisch signifikanten Zusammenhang ausgegangen (vgl. Tabelle 4). Die Ergebnisse aller Berechnungen sind im Anhang in Anhang A veranschaulicht.

Kategorie	Sub-kategorie	Subsub-kategorie	p-Wert tödlicher Ausgang	Odds ratio - Tod	p-Wert schwerer Ausgang	Odds ratio - Schwer
Kalendarische Daten	Monat	Dezember	0,005	6,61	-	-
		Gesamt	0,003		-	-
	Quartale des Jahres	Drittes Quartal des Jahres	0,040	0,61	-	-
		Letztes Quartal des Jahres	0,002	2,96	-	-
	Wochentag	Dienstag	0,050	0,738	-	-
Art der Not-situation	Feuer		< 0,001	8,96	< 0,001	7,58
	Triebwerksausfall		< 0,001	0,34	-	-
Flugzeug Parameter	Flugzeughersteller	Cessna	0,007	0,47	0,001	0,41
		Sonstige Hersteller	0,010	1,85	0,003	2,11
	MTOW		0,046	1,92	< 0,001	3,14
	Anzahl der Triebwerke		-	-	0,013	2,17

Kategorie	Subkategorie	Subsubkategorie	p-Wert tödlicher Ausgang	Odds ratio - Tod	p-Wert schwerer Ausgang	Odds ratio - Schwer
<b>Flugzeug Parameter</b>	Fahrwerk		0,030	1,71	-	-
	Entfernung > 10km zum Landeplatz		< 0,001	5,27	0,003	2,99
<b>Lage und Flugphase</b>		Reiseflug	< 0,001	4,55	< 0,001	2,90
	Flugphase	Sinkflug	-	-	0,010	2,49
		Lande- phase	< 0,001	0,15	< 0,001	0,15
<b>Piloten Parameter</b>	Fluglizenz	CPL	-	-	0,027	0,51
	Flug- erfahrung (Gesamt)	2.000 – 5.000 Stunden	0,037	1,95	-	-
	Flug- erfahrung (auf dem Modell)	2.000 – 5.000 Stunden	0,019	0,12	< 0,001	0,07
	Illusionen		< 0,001	3,60	0,005	2,24
	Mensch- liche Faktoren		0,001	2,73	< 0,001	3,26

Tabelle 4 - Signifikante Variablen für einen tödlichen- oder schweren Ausgang

## **4.5 Scores**

### **4.5.1 Allgemeiner Score zur Prognose von tödlichen Flugunfällen**

Die erste Formel dient der Vorhersage von tödlichen Kleinflugzeugunfällen. Es entsprachen 98,2% (n=280) der Untersuchungsberichte den Einschlusskriterien. Mithilfe von logistischen Regressionsverfahren wurden sechs Faktoren ermittelt, die entscheidend für die Vorhersage sind (Tabelle 5). Die z-Tests der Regressionskoeffizienten aller Variablen und der Konstante zeigen eine hohe Signifikanz von  $p < 0,001$ . Dies wird auch durch das Konfidenzintervall von  $\text{Exp}(B)$  verdeutlicht, wobei der Wert 1 bei keiner Variable eingeschlossen ist.

							95% Konfidenzintervall für EXP(B)	
	Regressions- koeffi- zient B	Standard- fehler	Wald	df	Sig.	Exp (B)	Unterer Wert	Oberer Wert
<b>Feuer</b>	2,749	0,456	36,391	1	< 0,001	15,622	6,396	38,158
<b>MTOW &lt;2.000 kg</b>	1,986	0,588	11,387	1	< 0,001	7,285	2,299	23,086
<b>Reiseflug</b>	1,343	0,394	11,612	1	< 0,001	3,832	1,770	8,297
<b>Landung</b>	-1,920	0,455	17,841	1	< 0,001	0,147	0,060	0,357
<b>Fahrwerk einfahrbar</b>	1,636	0,392	17,418	1	< 0,001	5,133	2,381	11,066
<b>Illusionen</b>	1,676	0,376	19,875	1	< 0,001	5,347	2,559	11,173
<b>Konstante</b>	-4,940	0,920	28,813	1	< 0,001	0,007		

*Tabelle 5 - Variablen in der Gleichung - Score tödlicher Unfall*

Im Falle eine Brandentwicklung steigt das Risiko um 1462,2% an ( $15,622 - 1 = 14,622$ ). Unfälle mit Kleinflugzeugen unter 2.000 kg MTOW steigern das Risiko statistisch um 628,5% ( $7,285 - 1 = 6,285$ ) an. Bei einem Flugunfall, welcher sich im Reiseflug ereignete, steigt die Wahrscheinlichkeit eines tödlichen Absturzes um 283,2% ( $3,832 - 1 = 2,832$ ). Ein Flugunfall während der Landung verringert sich die Wahrscheinlichkeit eines tödlichen Ereignisses um 85,3% ( $0,147 - 1 = -0,853$ ). Bei festgestelltem Fahrwerk kommt es zu einer Risikosteigerung

um 413,3%. Kommt es bei dem Piloten zu Illusionen erhöht sich das Risiko eines tödlichen Unfalls um 434,7%.

Die errechneten Parameter können nun zur Prognose eines tödlichen Kleinflugzeugabsturzes in die Formel der logistischen Regression eingefügt werden (Formel 1).

$$p(Tod) = \frac{1}{1 + e^{-(-4.940 + (2.749 \cdot Feuer) + (1.986 \cdot MTOW < 2.000kg) + (1.343 \cdot Reiseflug) + (-1.920 \cdot Landung) + (1.636 \cdot Fahrwerk festgestellt) + (1.676 \cdot Illusionen))}}$$

Formel 2 - Formel zur Prognose eines tödlichen Kleinflugzeugabsturzes

Im Folgenden ist eine fiktive Situation aufgeführt, um die Anwendbarkeit zu verdeutlichen. Ereignet sich ein Flugunfall mit einem Kleinflugzeug unter 2.000 kg MTOW und festgestelltem Fahrwerk während des Reisefluges mit Ausbruch eines Feuers und Sichteinschränkung des Piloten, welches zu Illusionen führte, beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass bei diesem Unfall ein Insasse tödlich verletzt wurde 98,8% (Abbildung 16).

$$p(Tod = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(-4.940 + (2.749 \cdot 1) + (1.986 \cdot 1) + (1.343 \cdot 1) + (-1.920 \cdot 0) + (1.636 \cdot 1) + (1.676 \cdot 1))}}$$

= 0.9884562475  
= 98,8%

Formel 3 - Fiktive Berechnung zur Prognose tödlicher Verletzungen

Zur Beurteilung der Modellgüte wird das Nagelkerne R<sup>2</sup> analysiert, wobei das logistische Regressionsmodell eine Varianzaufklärung mit einem Nagelkerkes R<sup>2</sup> von 0,543 zeigt<sup>31</sup>. Der Omnibus Test der Modellkoeffizienten weist einen einem p-Wert unter 0,001 auf.

Insgesamt wurden 78,6% der beobachteten Kleinflugzeugunfälle mit dem Modell entsprechend eines tödlichen Ausgangs korrekt klassifiziert. Von den tödlichen Unfällen wurden 116 (85,3%) von insgesamt 136 Fällen richtig vorhergesagt. Ereignete sich kein tödlicher Unfall (n = 144, 51,4%) wurden 104 (72,2%) Unfälle korrekt vorhergesagt.

#### 4.5.2 Score zur Prognose von tödlichen Flugunfällen für Rettungsleitstellen

Die zweite Formel wurde für die Implementierung in Rettungsleitstellen konzipiert, wobei ausschließlich abfragbare und ermittelbare Variablen als unabhängige Variablen für die Regressionsanalyse verwendet wurden. 283 (99,3%) der Untersuchungsberichte konnten für die Analyse verwendet werden. Dabei wurden vier Faktoren als wesentlich für die Prognose identifiziert (Tabelle 6). Die z-Tests der Regressionskoeffizienten der Variablen und der Konstante zeigen eine Signifikanz von  $p < 0,05$ . Der Wert „1“ wird im 95% Konfidenzintervall für  $\text{Exp}(B)$  nicht inkludiert.

	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Wald	df	Sig.	Exp (B)	95% Konfidenzintervall für Exp(B)	
							Unterer Wert	Oberer Wert
<b>Letztes Quartal</b>	1,133	0,450	6,343	1	0,012	3,106	1,286	7,504
<b>Feuer</b>	2,256	0,388	33,733	1	< 0,001	9,544	4,458	20,433
<b>Distanz &gt; 10 km</b>	1,361	0,403	11,381	1	< 0,001	3,900	1,769	8,599
<b>Landung</b>	-1,586	0,375	17,897	1	< 0,001	0,205	0,098	0,427
<b>Konstante</b>	-1,887	0,526	12,872	1	< 0,001	0,151		

Tabelle 6 - Variablen in der Gleichung - Score Rettungsleitstelle

Die prozentuale Risikosteigerung berechnet sich ebenfalls nach folgender Formel:  $(\text{Exp}(B) - 1) * 100$ . Demnach steigt das Risiko bei Flugunfällen im letzten Quartal des Jahres um 210,6%, bei einem Brand um 854,4% und bei einem Flugunglück, welches sich weiter als 10 km von einer geeigneten Landefläche ereignete, um 290%. Flugunfälle während des Landevorgangs senken das Risiko um 79,5%.

Ereignet sich ein Flugzeugunfall mit einem Kleinflugzeug, kann das Risiko eines tödlichen Ereignisses ( $p(\text{Tod}=1)$ ) für Rettungsleitstellen mit folgender Formel berechnet werden (Abbildung 17).

$$\frac{1}{1 + e^{-\left(1,887 + (1,133 \cdot \text{Letztes Quartal}) + (2,256 \cdot \text{Feuer}) + (1,361 \cdot \text{Dis tan } z > 10\text{km}) + (-1,586 \cdot \text{Landung})\right)}}$$

Formel 4 - Formel zur Prognose eines tödlichen Kleinflugzeugabsturzes für Rettungsleitstellen

Dieses logistische Regressionsmodell weist eine Varianzaufklärung von  $R^2 = 0,415$  auf. Eine korrekte Klassifizierung fand in 76,7% der Flugunfälle statt. Von den tödlichen Unfällen ( $n = 140, 49,47\%$ ) wurden 97 (69,3%) richtig vorhergesagt. Ereignete sich kein tödlicher Flugunfall ( $n = 143, 50,5\%$ ), wurden 83,9% ( $n = 120$ ) korrekt prognostiziert.

#### 4.5.3 Allgemeiner Score zur Prognose der Verletzungsschwere

Soll eine Prognose zur Verletzungsschwere gemacht werden, kann hierfür die dritte Formel herangezogen werden. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit eines schweren Ausgangs (Unfälle mit schweren- oder tödlichen Verletzungen) mit sechs Variablen berechnet. 271 (95,1%) der eingeschlossenen Untersuchungsberichte konnten für die Regressionsanalyse verwendet werden. Die z-Tests für die Regressionskoeffizienten der Variablen und der Konstante zeigen eine Signifikanz von  $p < 0,05$ . Der Wert „1“ wird im 95% Konfidenzintervall für  $\text{Exp}(B)$  nicht inkludiert (Tabelle 7).

	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Wald	df	Sig.	Exp (B)	95% Konfidenzintervall für Exp(B)	
							Unterer Wert	Oberer Wert
<b>Flugzeugtyp</b>	0,805	0,337	5,719	1	0,017	2,237	1,156	4,329
<b>Sonstige</b>								
<b>Feuer</b>	2,496	0,556	20,154	1	< 0,001	12,128	4,080	36,055
<b>MTOW &lt; 2.000 kg</b>	2,508	0,595	17,738	1	< 0,001	12,279	3,822	39,446
<b>Landung</b>	-2,016	0,400	25,461	1	< 0,001	0,133	0,061	0,291
<b>Fahrwerk einfahrbar</b>	2,052	0,446	21,189	1	< 0,001	7,785	3,249	18,652
<b>Menschliche Faktoren</b>	1,358	0,409	11,016	1	< 0,001	3,887	1,744	8,666
<b>Konstante</b>	-5,661	1,031	30,160	1	< 0,001	0,003		

Tabelle 7 -Variablen in der Gleichung – Score schwerer Ausgang

Ereignet sich ein Flugunfall mit einem Flugzeugtyp, welcher der Kategorie „sonstiger Flugzeugtyp“ angehört, steigt das Risiko eines schweren Ausgangs um 123,7%  $((2,237 - 1) * 100)$ . Im Falle eines Brandes erhöht sich das Risiko um 1112,8%. Ebenso steigt das Risiko um 1127,9%, wenn sich das Flugunglück mit Kleinflugzeugen unter 2.000 kg MTOW ereignen. Unfälle während der Landephase senken das Risiko eines schweren Ausgangs für die Insassen um 86,7%. Bei festgestelltem Fahrwerk kommt es zu einer Risikosteigerung um 678,5%. Der Einfluss menschlicher Faktoren auf einen schweren Ausgang wird mit 288,7% angegeben. Die Wahrscheinlichkeit für  $p(\text{Verletzungsschwere schwer}=1)$  wird mit nachfolgender Formel berechnet (Abbildung 18).

$$\frac{1}{1 + e^{-(-5,661 + (0,805 \cdot \text{Flugzeugtyp Sonstige}) + (2,496 \cdot \text{Feuer}) + (2,508 \cdot \text{MTOW} < 2.000\text{kg}) + (-2,016 \cdot \text{Landung}) + (2,052 \cdot \text{Fahrwerk festgestellt}) + (1,358 \cdot \text{Menschliche Faktoren}))}}$$

*Formel 5 - Formel zur Prognose eines schweren Kleinflugzeugunfalls*

Der Omnibus-Test ergab einen p-Wert von < 0,001. Dieses logistische Regressionsmodell zeigt eine Varianzaufklärung von  $R^2 = 0,499$ .

Mittels dieser Regressionsanalyse wurden 81,2% der Flugunfälle korrekt anhand eines schweren Ausgangs klassifiziert. Von 271 eingeschlossenen Untersuchungsberichten, ereignete sich ein schwerer Unfall in 62,4% (n = 169), wovon 155 (91,7%) richtig klassifiziert wurden. Unfälle ohne schweren Ausgang (leichte- oder unverletzte Insassen) wurden in 102 Untersuchungsberichten dokumentiert. Davon wurden 65 (63,7%) korrekt vorhergesagt.

## **5 Diskussion**

Ziel des ersten Abschnitts dieser Arbeit bestand darin Faktoren zu ermitteln, welche einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Verletzungs- und Überlebenschancen von Insassen nach Kleinflugzeug Unfällen haben. In den anschließenden Analysen wurde ermittelt, welche dieser Faktoren relevant sind, um ein Scoring-System zu entwickeln.

### **5.1 Forschungsstand**

Die Zahlen aus Tabelle 3 belegen die seit 2010 zunehmende wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Flugunfällen und Flugsicherheit im Bereich von Kleinflugzeugen. Gleichzeitig verdeutlicht die Gesamtanzahl der Publikationen für Kleinflugzeuge die begrenzte Forschungstiefe in diesem Fachgebiet.

### **5.2 Parameter mit statistisch signifikantem Einfluss auf einen tödlichen- oder schweren Ausgang**

In der zeitlichen Analyse von Kleinflugzeugabstürzen wurde eine Zunahme der Unfälle in den Sommermonaten festgestellt. Dennoch weist eine Odds Ratio von 0,61 auf eine inverse Korrelation mit einem tödlichen Ausgang hin. Dies lässt sich auf die Tatsache zurückführen, dass Kleinflugzeuge in der Regel unter Sichtflugbedingungen betrieben werden, welches gute Wetterverhältnisse und Tageslicht erfordert. Daraus folgt, dass in den Sommermonaten vermehrt Flüge stattfinden, welches eine absolute Zunahme der Flugunfälle erklärt <sup>35</sup>.

Trotz einer reduzierten Unfallhäufigkeit im vierten Quartal des Jahres besteht eine signifikante positive Korrelation (Odds Ratio 2,96) mit einem tödlichen Ausgang. Diese Jahreszeit geht vermehrt mit Einflussfaktoren wie Nebel, Regen, Schnee oder ungünstige Wetterbedingungen im Allgemeinen einher, die die Sichtverhältnisse während des Fliegens erheblich beeinträchtigen können und somit zu dieser Beziehung beitragen.

Eine Studie von Li et al. ergab ein neunfach erhöhtes Risiko für tödliche Abstürze bei schlechten Wetterbedingungen<sup>14</sup>. Daher wäre zu erwarten, dass eine Korrelation mit den ersten Monaten des Jahres besteht. Das mögliche Ausbleiben einer solchen Korrelation könnte auf die begrenzte Datenmenge zurückzuführen sein. Zudem könnte es sein, dass Piloten in den ersten Monaten des Jahres verstärkt auf schlechte Wetterbedingungen vorbereitet sind und zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen ergreifen, um Unfälle zu verhindern.

Diese Maßnahmen könnten dazu beitragen, die Auswirkungen der widrigen Wetterverhältnisse abzumildern. Die beobachtete Korrelation des Wochentages Dienstag ist

höchstwahrscheinlich auf stochastische Variabilität zurückzuführen. In Anbetracht dieser Faktoren unterstreicht diese Erkenntnis die Dringlichkeit für weitere umfassende Forschungsbemühungen, um die komplexen Zusammenhänge zwischen Wetterbedingungen, Jahreszeiten und Flugunfällen eingehender zu untersuchen.

Der größte Einfluss auf einen tödlichen- oder schweren Ausgang entsteht durch einen Flugzeugbrand. Dieser Einfluss wurde bereits einheitlich in mehreren Studien beschrieben<sup>35</sup><sup>14</sup>. Im Rahmen dieser Promotionsarbeit wurde festgestellt, dass 78,9% der Flugzeugbrände zu tödlichen Ereignissen führen. Dies deckt sich mit Li et al. welcher Kleinflugzeugunfälle in den USA analysierte, wobei 69% der Unfälle mit Brandentwicklung zu tödlichen Verletzungen führten. Die Odds Ratio der logistischen Regressionsanalyse in dieser Studie (OR 15,6) deckt sich mit Berechnung von Li et al. (OR 14) und Rostykus (RR 20.4)<sup>13,35</sup>.

Der Flugzeugbrand stellt ein hohes Risiko für die Sicherheit von Kleinflugzeugen und dessen Insassen dar. Während die EASA den Einbau crash-sicherer Kraftstoffsysteme (CRFS) empfiehlt gibt es in der EU bis heute keine Vorschriften hierfür<sup>36</sup>. Bereits 1970 konnte die reduzierte Mortalität und Brandentwicklung durch CRFS in US-amerikanischen Militärhubschraubern nachgewiesen werden<sup>37</sup>. Es bleibt jedoch unklar, ob die hohe Sterblichkeit auf den direkten Einfluss von Feuer und Rauchentwicklung oder auf Verzögerungen beim Eintreffen der Rettungskräfte zurückzuführen ist.

Ein Triebwerksausfall während eines Fluges muss nicht zwangsläufig mit einem erhöhten Risiko für tödliche Ereignisse einhergehen. Dies wird durch die Ergebnisse der vorliegenden Studie gestützt, bei denen bei einer hohen Signifikanz ( $p < 0,001$ ) eine Odds Ratio von 0,34 ermittelt wurde. Diese Ergebnisse sind kohärent mit aktuellen Erkenntnissen, die darauf hinweisen, dass Kleinflugzeuge sehr gut gleiten können, wodurch selbst bei komplettem Triebwerksausfall meist eine geeignete Landefläche gefunden werden kann. Mangelndes Training der Piloten im Umgang mit technischen Defekten ist eine mögliche Ursache weshalb trotzdem fast ein Viertel der Triebwerksausfälle in dieser Studie letal ausgingen<sup>38</sup>.

Im Falle eines Triebwerksausfalls bei einem mehrmotorigen Kleinflugzeug kann es aufgrund des asymmetrischen Schubs zu einem Strömungsabriss kommen. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass die Piloten im Vergleich zu ihren Kollegen, die einmotorige Kleinflugzeuge steuern, über ein umfangreicheres Flugerfahrungsniveau verfügen. Dies ermöglicht es ihnen, die erhöhte Komplexität der Situation effektiver zu bewältigen<sup>15</sup>.

Der Flugzeughersteller Cessna war im Rahmen dieser Studie am häufigsten vertreten. Bei signifikanter Korrelation mit einem tödlichen Ausgang aber eine Odds Ratio von 0,47 kann von einem protektiven Faktor ausgegangen werden. Ebenso signifikant, jedoch mit einem Odds

Ratio von 1,85 galten Flugzeugtypen, welche der Kategorie „sonstige“ zugeordnet wurden. Es ist zu erwähnen, dass nach dem Kenntnisstand der Autorin dieser Arbeit keine vorherigen Untersuchungen existieren, die das Unfallrisiko auf der Grundlage von Flugzeugherstellern erörtert haben.

Im Jahr 2022 waren in Deutschland insgesamt 6.899 Flugzeuge mit einem Gewicht von bis zu 2 Tonnen und 607 Flugzeuge mit einem Gewicht zwischen 2 und 5,7 Tonnen zugelassen. Dabei findet jedoch keine Differenzierung der einzelnen Flugzeugtypen statt<sup>39</sup>. Stand 2019 gehörte das Modell Cessna 172 Skyhawk zu den meistgebauten Kleinflugzeugmodellen<sup>40</sup>. Die Schulung und Ausbildung von Piloten werden meist anhand von Flugzeugen durchgeführt, die weit verbreitet in der Luftfahrt zugelassen sind, darunter Modelle von Herstellern wie Cessna oder Piper Aircraft<sup>40</sup>. Die niedrigere Anzahl tödlicher Ausgänge bei diesem Flugzeugtyp könnte möglicherweise auf die größere Flugerfahrung der Piloten mit diesem Modell zurückzuführen sein. Zusätzlich könnte diese Beobachtung erklären, warum Unfälle mit selten vertretenen Flugzeugmodellen in mehr als 50% der Fälle zu tödlichen Ergebnissen führen.

Wie zuvor erläutert gehören 91,9% (n=6.899) der in Deutschland registrierten Kleinflugzeuge der Gewichtsklasse unter 2 Tonnen an (Stand 2022). Nur 3,2% (n = 221) davon sind mehrmotorig<sup>39</sup>. Die berechnete Odds Ratio von 1,92 deutet auf eine höhere Anzahl letaler Unfälle mit Flugzeugen eines MTOW unter 2 Tonnen hin. Eine positive Korrelation fand sich ebenfalls für einmotorige Kleinflugzeuge (OR 2,17).

Eine Publikation von Liebold et al. deutet darauf hin, dass leichte Flugzeuge meist von Privatpiloten geflogen werden, während größere Flugzeuge häufiger von Berufspiloten gesteuert werden<sup>41</sup>. Im Gegensatz dazu betont eine Studie aus dem Jahr 2015, dass mehrmotorige Kleinflugzeuge ein potenziell höheres Risiko für tödliche Unfälle aufweisen. Dies könnte auf die höheren Geschwindigkeiten und größeren Treibstoffkapazitäten zurückzuführen sein, die die Wahrscheinlichkeit einer Brandentwicklung bei einem Aufprall erhöhen<sup>15</sup>. Darüber hinaus erfordern mehrmotorige Flugzeuge eine höhere Landegeschwindigkeit, was das Risiko schwerwiegender Verletzungen der Insassen bei einem Unfall erhöhen kann<sup>13</sup>.

Ein weiterer Aspekt, der beachtet werden sollte, betrifft den möglichen Einfluss eines Triebwerksausfalls bei mehrmotorigen Flugzeugen, wobei das funktionelle zweite Triebwerk für falsche Sicherheit sorgen kann. Dabei sinkt die Steigleistung um mehr als die Hälfte, welches von Piloten oft nicht erkannt wird. Somit kann es zu einer unerkannten Bewegung in Richtung des Bodens kommen<sup>42</sup>. Diese Studien sind inkongruent mit den Ergebnissen dieser

Studie und sind möglicherweise auf die geringe Anzahl der Flugunfälle mit mehrmotorigen Kleinflugzeugen zurückzuführen.

In Fällen, in denen ein Flugzeug ein einziehbares Fahrwerk aufweist, wurde in über 50% der Flugunfälle ein tödliches Ereignis verzeichnet. Die statistische Signifikanz dieser Beziehung wird durch die ermittelte Odds Ratio von 0,58 bei ausgefahrenem Fahrwerk bestätigt. Flugzeuge, die über ein einziehbares Fahrwerk verfügen, stellen aufgrund ihrer erhöhten technischen Komplexität üblicherweise höhere Anforderungen an die Qualifikation der Piloten. Des Weiteren sind diese Flugzeuge oft in anspruchsvollen Umgebungen und unter herausfordernden Bedingungen im Einsatz, welche letale Flugunfälle begünstigen können<sup>13,42</sup>.

Ein Flugunfall, der sich abseits einer geeigneten und geplanten Landefläche ereignet, erhöht das Risiko eines tödlichen Ausgangs signifikant. Diese Verbindung wird in diversen wissenschaftlichen Studien konsistent beschrieben<sup>14,15,35</sup>. Dieser Zusammenhang ist vor allem auf die gesteigerte Geschwindigkeit und damit verbundene erhöhte Aufprallenergie auf den menschlichen Körper zurückzuführen<sup>35</sup>. Die abrupte Verlangsamung, die durch den Aufprall entsteht, wird gemäß Hill als führende Ursache schwerwiegender Verletzungen der Flugzeuginsassen beschrieben<sup>43</sup>. Darüber hinaus kann eine verzögerte Ankunft der Rettungskräfte die Überlebenschancen der Flugzeuginsassen erheblich reduzieren<sup>14</sup>. In dieser vorliegenden Studie wurde eine signifikante Korrelation zwischen den Flugphasen "Landung" und "Reiseflug" und dem Eintritt eines tödlichen Ausgangs festgestellt, wobei für die Landephase eine negative Korrelation (OR 0,15) und für den Reiseflug eine stark positive Korrelation (OR 4,55) berechnet wurde. Trotz des höheren Vorkommens von Unfällen während der Landephase<sup>38,44</sup> ergab die Untersuchung von Bargazan et al., dass Flugunfälle während der Landephase seltener tödliche Konsequenzen haben, im Vergleich zu Unfällen, die während des Reisefluges auftreten. Dieses Erkenntnis ist bemerkenswert, da die Landephase gemeinhin als komplexer und gefährlicher angesehen wird<sup>42</sup>. Trotz dieser Tatsache sind Flugunfälle während des Reiseflugs oft mit höheren Geschwindigkeiten und einer verzögerten Hilfeleistung durch Rettungskräfte verbunden<sup>35</sup>.

Die Betrachtung der Lizenz des Piloten ergab eine signifikante Korrelation für die Berufspilotenlizenz in Bezug auf einen schweren Ausgang. Die Odds Ratio von 0,51 deutet auf eine verringerte Anzahl schwerer Ausgänge bei Unfällen mit Berufspiloten hin. Während alle Berufspiloten über eine IFR-Berechtigung verfügen, können nur 28% der Privatpiloten im Jahr 2012 eine IFR-Berechtigung vorweisen<sup>45</sup>. Unerwartete Veränderungen der Sichtverhältnisse können somit fatale Folgen haben.

Salvatore et al. berichten in ihren Studien von einer geringeren Zahl von Flugunfällen, die auf Pilotenfehler bei Berufspiloten im Vergleich zu Privatpiloten zurückzuführen sind. Es konnte jedoch keine statistische Signifikanz für eine verringerte Anzahl Piloten-induzierter fataler Unfälle bei Berufspiloten festgestellt werden <sup>47</sup>.

Eine weitere Studie von Boyd konnte ebenfalls keine statistische signifikante Abnahme tödlicher Unfälle bei Piloten mit einer CPL nachweisen. Ebenso konnte eine Instrumentenflugberechtigung die Überlebensrate bei Flugunfällen nicht erhöhen. Dies muss jedoch kritisch betrachtet werden, da im Rahmen dieser Studie die Kohorte der einmotorigen Flugzeuge ausschließlich von Privatpiloten geflogen wurde, während mehrmotorige Flugzeuge mehrheitlich aus Berufspiloten bestanden. Die logistische Regressionsanalyse dieser Studie zeigte keine Risikoreduktion durch höher qualifizierte Piloten, wobei die gesteigerte Komplexität eines mehrmotorigen Flugzeuges und anspruchsvollere Flugbedingungen zu einer Verzerrung des Ergebnisses beigetragen haben können <sup>15</sup>.

Der Einfluss der Flugerfahrung des Piloten auf einen tödlichen Flugzeugabsturz wird in der Literatur kontrovers beschrieben. Bargazan et. al untersuchte 35.960 Flugzeugunfälle von 1983 bis 2002. Piloten mit 50 bis 350 Stunden Flugerfahrung hatten die höchste Wahrscheinlichkeit eines letalen Absturzes. Piloten mit zunehmender Flugerfahrung waren seltener in letalen Ereignissen involviert <sup>29,42</sup>. Die EASA beschrieb ebenfalls die proportionale Abnahme der Flugunfälle mit zunehmender Erfahrung des Piloten <sup>38</sup>. Dennoch konnten Rostykus et al. keine signifikante Korrelation zwischen der Erfahrung der Piloten und einem erhöhten Letalitätsrisiko beobachten <sup>13</sup>.

Die Odds Ratio von 0,12 für Piloten mit einer Erfahrung zwischen 2.000 und 5.000 Stunden auf dem verunfallten Flugzeugmodell deckt sich mit den Erkenntnissen von Bargazan et al<sup>29</sup>. Unklar bleibt jedoch weshalb im Rahmen dieser Studie die gesamte Flugerfahrung der Piloten zwischen 2.000 und 5.000 Stunden positiv mit einem tödlichen Unglück korreliert (OR 1,95). Dieses Ergebnis kann möglicherweise aufgrund der begrenzten Datenmenge und stochastischer Schwankung beobachtet werden. Es ist anzunehmen, dass bei einer größeren Datenmenge die Wahrscheinlichkeit einer Konvergenz zu den in der Literatur dokumentierten Ergebnissen zunimmt.

Eingeschränkte Sichtverhältnisse durch starke Sonneneinstrahlung, Regen oder Wolken können bei Piloten zu Wahrnehmungsfehlern und fatalen Folgen führen. Mit dem Ziel „einfach anzukommen“ fliegen viele Piloten wissentlich in Wetterlagen, die eigentlich den Einsatz von Instrumentenflugregeln erfordern würden. Darüber hinaus können langsam zunehmende

Verschlechterungen der Wetterbedingungen im Vergleich zu rapiden Veränderungen dazu führen, dass sie nicht bewusst wahrgenommen wurden <sup>48</sup>.

Wenn ein Flug unter Sichtflugregeln über der Wolkendecke erfolgt, richtet der Pilot meist die Flügel des Flugzeuges parallel zu diesen aus. Bei leichter Inklination der Wolken kann dies zu einer Verzerrung des sichtbaren Horizonts führen. Zusätzlich können Regentropfen auf der Flugzeugscheibe zu einer Lichtbrechungen führen, wodurch die angeflogene Landebahn näher oder weiter entfernt erscheinen kann <sup>49</sup>. Diese in der Literatur dokumentierten Effekte unterstreichen, die in dieser Studie identifizierte, positive Korrelation von Illusionen mit einem letalen Ausgang (OR 3,60). Des Weiteren können Flugunfälle aufgrund eingeschränkter Sichtverhältnisse durch einen unerwarteten Aufprall von hohen G-Kräften begleitet sein, welche bei der Kollision auf den Körper wirken und potenziell zu letalen Verletzungen führen können <sup>14</sup>. Wie bereits erwähnt sind diese plötzlichen Dezelerationen gemäß Hill die vorherrschende Ursache für schwerwiegende Verletzungen bei Flugunfällen <sup>43</sup>.

Human Factors sind definiert als „psychische, kognitive und soziale Einflussfaktoren, die zwischen menschlichen und technischen Systembestandteilen wirken“ <sup>46</sup>. Bei fast vier von fünf Flugunfällen in dieser Studie wurde der Einfluss menschlicher Faktoren dokumentiert. Dabei ist mit einem Odds Ratio von 2,73 eine positive Korrelation mit einem tödlichen Unfall dokumentiert. In einer Untersuchung von Dambier und Hinkelbein im Jahr 2004, bei der Kleinflugzeuge mithilfe des HFACS (Human Factors Analysis and Classification System) analysiert werden, zeigte sich ein menschliches Versagen in 84% der Flugunfälle <sup>44</sup>.

Im Sicherheitsbericht für das Jahr 2020 der Europäischen Union für Flugsicherheit wurde das Auftreten von menschlichem Versagen bei jedem fünften Unfall außerhalb der kommerziellen Luftfahrt dokumentiert <sup>38</sup>. Die Ursachen für menschliches Versagen sind selten auf einen einzelnen Faktor zurückzuführen, sondern resultieren aus einem komplexen Zusammenspiel zwischen menschlichem Verhalten und der Interaktion mit der Umgebung. Weitere Forschung und Trainings mit dem Ziel menschliche Fehler zu reduzieren sind ein elementarer Bestandteil zukünftiger Flugsicherheit <sup>47</sup>.

### **5.3 Betrachtung der Ergebnisse der logistischen Regressionsanalysen**

In vorangegangenen Flugsicherheitsanalysen für Kleinflugzeuge wurden wiederholt logistische Regressionsverfahren angewandt, wie in mehreren Studien dokumentiert <sup>14,15,29</sup>. Boyd untersuchte dabei zwölf Variablen mit Einfluss auf einen tödlichen Ausgang. Im Rahmen der multivariaten Analyse wurden schließlich vier signifikante Risikofaktoren identifiziert: Nachtflüge, verminderte Sichtverhältnisse, Flugunfälle abseits des Flughafens und Feuerereignisse. Besonders hervorzuheben ist, dass die Landung abseits des Flugplatzes den

größten Einfluss auf das Risiko hatte, wobei die Odds Ratio 14,81 betrug, gefolgt von Feuerereignissen mit einer Odds Ratio von 7,24<sup>15</sup>.

In einer weiteren Studie von Li et al. wurde ebenfalls eine Regressionsanalyse durchgeführt, wobei Flugzeugbrände den vorrangigen Einflussfaktor mit einem Odds Ratio von 13,7 darstellten<sup>14</sup>. Diese Beobachtung korreliert mit den Ergebnissen dieser Studie, wobei sich zeigt, dass das Vorhandensein von Feuer in den Prognosemodellen für einen fatalen Ausgang den signifikantesten Einflussfaktor darstellt. Die vermehrte Implementierung Aufprallsicherer Systeme ist von entscheidender Bedeutung für die Flugsicherheit bei Kleinflugzeugen. Wie von Tejada beschrieben, spielt dabei die Konstruktion des Flugzeugs eine Schlüsselrolle<sup>48</sup>.

Maßnahmen zur Reduktion von Zündquellen durch die korrekte Positionierung von Treibstoffzellen, widerstandsfähigere Treibstoffkomponenten gegenüber Brüchen oder Verformungen sowie die Verwendung feuerresistenter Materialien in Sitzen und Polstern tragen erheblich zur Steigerung der Überlebenschancen bei<sup>48</sup>. Es sollte beachtet werden, dass diese sicherheitsrelevanten Maßnahmen bereits in großen Fluggesellschaften weit verbreitet sind, während sie für Kleinflugzeuge nicht obligatorisch vorgeschrieben sind<sup>35</sup>.

Die vorliegenden Regressionsanalysen von Boyd und Li et al. haben herausgestellt, dass ungünstige Wetterbedingungen, die möglicherweise eine Umstellung auf Instrumentenflugregeln erfordern, einen erheblichen Einfluss auf das Auftreten tödlicher Flugunfälle ausüben<sup>14,35</sup>. Die berechnete Odds Ratio in dieser vorliegenden Studie (5,35) liegt innerhalb eines Bereichs, der zwischen den ermittelten Odds Ratios von Boyd (OR 2,18) und Li et al. (OR 9,1) liegt. Durch fortschreitende Technologien und Flugsimulatoren bieten sich hervorragende Möglichkeiten, Piloten auf schwierige Wetterbedingungen vorzubereiten.

Eine gründliche Schulung und Simulationsübungen können dazu beitragen, die Fähigkeiten und das Bewusstsein der Piloten für den Umgang mit herausfordernden meteorologischen Bedingungen zu verbessern. Darüber hinaus spielt eine angemessene Flugplanung unter Berücksichtigung der Wettervorhersage eine entscheidende Rolle. Durch diese Maßnahmen kann die Überlebenschancen bei Flugunfällen in ungünstigen Wetterbedingungen signifikant gesteigert werden<sup>45</sup>. Es ist jedoch anzumerken, dass weitere Forschung und Analyse erforderlich sind, um die genauen Zusammenhänge und Mechanismen zwischen Wetterbedingungen und Flugunfallrisiken besser zu verstehen und effektive Sicherheitsstrategien weiterzuentwickeln.

Der Zusammenhang zwischen einem Flugunfall außerhalb des Flugplatzes und einem letalen Ausgang wurde in zahlreichen Studien bereits ausführlich untersucht. In Boyd's logistischer

Regressionsanalyse konnte ermittelt werden, dass dieser spezifische Faktor den bedeutendsten Einfluss aufwies (OR 14.81) <sup>15</sup>. Dabei gilt zu beachten, dass diese Studie nur mehrmotorige Kleinflugzeuge berücksichtigte. Eine Studie von Li et al. ergab dass, Flugunfälle in der unmittelbaren Umgebung von Flugplätzen im Vergleich zu Unfällen außerhalb dieser Flugplätze eine sechsmal geringere Wahrscheinlichkeit aufwiesen, tödlich für die Insassen zu enden <sup>14</sup>.

Die alleinige Einbeziehung dieser Variable in das Modell, das Faktoren enthält, die von Leitstellendisponenten eruiert werden können, und die durch Anwendung der schrittweise-rückwärts (BSTEP) Methode aus beiden anderen Modellen ausgeschlossen wurde, könnte auf das Vorhandensein von Interaktionen zwischen den aufgenommenen unabhängigen Variablen hindeuten. Ein solcher Ausschluss könnte dazu beitragen, die Modellanpassung zu optimieren und eine präzisere Abbildung der komplexen Wechselwirkungen zwischen den untersuchten Faktoren zu erreichen.

Im Folgenden werden nun Parameter beschrieben, welche zur Modellstärke der entwickelten Scoring Systeme beigetragen haben, ohne dass diese in der Literatur, im Kontext von Regressionsverfahren zur Prognose letaler Flugunfälle, beschrieben wurden.

Nach dem Kenntnisstand des Autors wurde bisher keine logistische Regressionsanalyse durchgeführt, welche die Flugphase zum Zeitpunkt des Unfalls einschloss. Dies ist verwunderlich, da der Reiseflug bereits in mehreren Studien als signifikanter Einflussfaktor für einen tödlichen Flugunfall beschrieben wurde <sup>41,42</sup>. Für das Modell zur Prognose eines tödlichen Ausgangs trug ein Unfall während des Reisefluges signifikant zur Modellstärke bei.

Im Gegensatz dazu resultiert ein Unfall während der Landephase in allen drei Modellen signifikant seltener zu schweren- oder tödlichen Ausgängen. Die Landephase wird aufgrund der höheren Anzahl an Unfällen, aber geringer Letalität in Studien kontrovers diskutiert <sup>42,49</sup>. Die vorliegende Studie verdeutlicht jedoch, dass Risikofaktoren nicht ausschließlich anhand ihrer Unfallhäufigkeit bestimmt werden können. Es bedarf weiterführende Forschung und eingehende statistische Analysen zur Verifizierung dieser Erkenntnisse.

Die Einbeziehung der Variable des einfahrbaren Fahrwerks erfolgte ausschließlich in den beiden Modellen zur Prognose eines tödlichen Ausgangs. Hinsichtlich eines schweren Ausgangs ergab der Chi<sup>2</sup>-Test keine signifikanten Resultate. In beiden Modellen trug das einfahrbare Fahrwerk zur Verbesserung der Modellstärke bei. Die Tatsache, dass diese Variable in beiden Modellen enthalten ist, lässt vermuten, dass dem einfahrbaren Fahrwerk möglicherweise ein bedeutenderer Einfluss in Bezug auf einen tödlichen Ausgang zukommt als bisher bekannt.

Wie zuvor beschrieben weichen die Ergebnisse dieser Studie in Bezug auf den Einfluss der Gewichtsklasse von Kleinflugzeugen von den Erkenntnissen der bisherigen wissenschaftlichen Literatur ab<sup>13,15,41</sup>. Trotz dieser Diskrepanz war der Einfluss in dieser Studie so signifikant, dass diese Variable in den Modellen zur Prognose eines schweren- und eines tödlichen Ausgangs aufgenommen wurde. Es ist anzumerken, dass in bisherigen Studien soweit bekannt keine statistischen Analysen durchgeführt wurden, um das Outcome von Kleinflugzeugen im Kontext ihres maximalen Abfluggewichts zu erforschen. Daher besteht weiterhin Bedarf für zukünftige Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet.

Ein weiterer Parameter, welcher erstmalig mit Hilfe von Regressionsverfahren in Bezug auf die Todeswahrscheinlichkeit von Insassen eines Kleinflugzeuges untersucht wurde, ist der Einfluss menschlicher Faktoren. Trotz des Vorkommens in über 80% der Flugunfälle und der stark positiven Signifikanz ist es verwunderlich, dass der Einfluss menschlicher Faktoren lediglich in dem Modell zur Prognose eines schweren Ausgangs vorhanden ist. Im Rahmen dieser Studie fand keine Differenzierung der genauen Ursache statt. Das sogenannte Schweizer-Käse-Modell, des britischen Psychologen James Reason, beschreibt dass Unfälle in der Regel nicht auf eine einzelne Ursache zurückzuführen sind, sondern das Ergebnis einer Abfolge fehlerhafter Ergebnisse und mangelnder Abwehrreaktionen darstellen. Im Kontext der Luftfahrt wurden vier Fehlerkategorien identifiziert, darunter organisatorische Einflüsse, unzureichende Schulungen, Bedingungen, die unsicheres Verhalten begünstigen (wie Stress und Müdigkeit) sowie fehlerhafte Bewältigung des zugrunde liegenden Problems<sup>50</sup>.

Das Training zur Verminderung sogenannter „Human Factors“ hat sich in der Kommerziellen Luftfahrt bereits etabliert. Die Lufthansa Group hat für diesen Bereich die Human Factors Academy gegründet, welche nicht nur für die Cockpit- und Cabin Crews, sondern auch für Bereiche außerhalb der Luftfahrt Trainings anbietet. Dabei wird unter Bedingungen eines Notfalls an sozialen-, kommunikativen und psychologischen Kompetenzen gearbeitet. Dies wird als Crew Resource Management (CRM) bezeichnet<sup>51</sup>. Insgesamt verdeutlicht die Analyse dieses Faktors die Komplexität und die dringende Notwendigkeit weiterer Forschung im Bereich der Kleinflugzeugunfälle. Insbesondere die Identifikation und das Verständnis der genauen Ursachen und Auswirkungen menschlicher Faktoren sind von entscheidender Bedeutung, um die Sicherheit im Luftverkehr zu verbessern.

Als eindeutig identifizierbarer Faktor durch Leitstellendisponenten konnte das „Letzte Quartal des Jahres“ in die logistische Regressionsanalyse zur Prognose eines tödlichen Unfalls eingeschlossen werden und trägt als einer von vier Faktoren zur Modellstärke bei. Es ist wahrscheinlich, dass die positive Korrelation zwischen dem "Letzten Quartal des Jahres" und der Unfallhäufigkeit nicht unmittelbar auf die Monate selbst zurückzuführen ist, sondern mit

anderen variablen Faktoren korreliert, die in diesen Zeiträumen verstärkt auftreten. Aus diesem Grund erweist sich eine weiterführende Analyse als unerlässlich, um eine präzise Unterscheidung der Ursachen vorzunehmen.

Verschiedene Einflussfaktoren könnten hierbei eine Rolle spielen, wie etwa veränderte Wetterbedingungen mit vermehrtem Auftreten von Nebel und Schnee, oder die kürzere Tageslichtdauer und die daraus resultierende Reduktion der Flugstunden mit optimalen Sichtverhältnissen. Ebenso könnten aufgeschobene Flugzeugwartungsarbeiten und die gesteigerte Ermüdung der Piloten während der Wintermonate einen Beitrag leisten. Weitere Studien sind erforderlich, um festzustellen, ob einzelne Faktoren oder die Kombination mehrerer Faktoren zur Erhöhung des Risikos für tödliche Flugunfälle beitragen.

Im Rahmen dieser Studie wurde festgestellt, dass Flugunfälle mit Flugzeugmodellen, die nicht den bekannten Herstellern Cessna Aircraft, Piper Aircraft, Beechcraft oder Avions Robin zugeordnet werden können und daher der Kategorie "sonstige Flugzeughersteller" angehören, als relevanter Parameter zur Vorhersage eines schweren Ausgangs dienen. Dem Kenntnisstand der Autorin zufolge wurden bisher keine logistische Regressionsanalysen zur Prognose von tödlichen Flugunfällen in Bezug auf den Flugzeughersteller in anderen Studien durchgeführt. Es ist anzunehmen, dass die Ursachen für diese Korrelation nicht auf einen bestimmten Hersteller zurückzuführen sind. Möglicherweise sind sie auf die von Li et al. beschriebene mangelnde Vertrautheit der Piloten mit dem betreffenden Flugzeugmodell zurückzuführen<sup>14</sup>. Diese Annahme wird durch die negative Korrelation mit einem tödlichen Ausgang bei Piloten mit mehr als 2.000 Flugstunden auf dem geflogenen Modell unterstützt.

Im Gesamtkontext betrachtet, ist aufgrund der begrenzten Datenlage die Möglichkeit zur Erstellung valider Aussagen zu den zuvor erwähnten Kategorien stark eingeschränkt. Dies unterstreicht deutlich den hohen Forschungsbedarf, insbesondere im Hinblick auf jene Faktoren, die in dieser Studie in den Scoring-Systemen berücksichtigt wurden und für die keine vergleichbaren Untersuchungen vorliegen, in denen logistische Regressionsanalysen zur Vorhersage tödlicher Kleinflugunfälle durchgeführt wurden.

#### **5.4 Parameter ohne statistisch signifikanten Einfluss auf einen tödlichen- oder schweren Ausgang**

Piloten, welche bei Nacht flogen, hatten in dieser Studie kein erhöhtes Risiko für einen tödlichen Flugunfall (OR 0,71). Dies ist jedoch kontrovers zu bisherigen Studien die ein 2-fach bis 8-fach erhöhtes Risiko beschreiben<sup>14,42,52</sup>. Shao et al. untersuchten daher die genauen Ursachen, die zu einem letalen Ereignis bei Nacht führten. Dazu analysierten sie Flugunfälle

aus der NTSB Datenbank zwischen 2002 und 2012 von Privatpiloten mit Berechtigung zur Nutzung von Instrumentenflugregeln<sup>45</sup>.

Verminderte Sichtverhältnisse waren mit einer Häufigkeit von 28% die häufigste Ursache gefolgt von einem Anflug des Landeplatzes ohne die Anwendung von Instrumentenflugregeln (25%). Shao et al. empfehlen daher die Verwendung von IFR auch bei guten Sichtverhältnissen, vor allem im Anflug um eine gute Sicht des Geländes zu gewährleisten<sup>45</sup>. Boyd kam in seiner Studie zu übereinstimmenden Ergebnissen<sup>15</sup>. Die konkordanten Ergebnisse publizierter Studien deuten darauf hin, dass die Ergebnisse dieser Studie aufgrund mangelnder Daten zu ungleichen Ergebnissen kamen.

Der Einfluss der Pilotenerfahrung auf einen tödlichen Flugunfall wird kontrovers in der Literatur beschrieben. Bargazan et al. analysierten 35.960 Kleinflugzeugunfälle der NTSB-Datenbank zwischen 1983 und 2002. Dabei konnte ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen erfahrenen Piloten und einem tödlichen Ausgang festgestellt werden. Dieses zunächst paradoxe Ergebnis erklären sie durch die höhere Wahrscheinlichkeit, von komplexen Flugbedingungen worin sich geübte Piloten begeben<sup>29</sup>. In einer weiteren Studie fanden Bargazan et al. widersprüchliche Ergebnisse, welche eine signifikante Risikosteigerung bei geringerer Flugerfahrung beschreiben<sup>42</sup>. Im Gegensatz dazu konnten Boyd und Li et al. keinen signifikanten Einfluss bei veränderter Erfahrung des Piloten in Bezug auf einen tödlichen Absturz feststellen<sup>14,15</sup>. Weitere Forschung wird benötigt zur Überprüfung der Ursachen zunehmenden oder abnehmenden Risikos, welches durch vermehrte Erfahrung der Piloten entsteht.

Der Untersuchungsgegenstand des Pilotenalters wurde im Rahmen dieser Dissertationsarbeit nicht aufgegriffen. Eine Vielzahl von Autoren berichten über eine gesteigerte Sterblichkeitsrate im Zusammenhang mit Flugunfällen, bei denen Piloten ein Alter von über 60 Jahren aufweisen<sup>45 13 29</sup>. Im Gegensatz dazu ergaben Untersuchungen von Li et al. keine signifikante Auswirkung des Alters auf die Wahrscheinlichkeit eines tödlichen Kleinflugzeugunfalls. Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass in dieser Untersuchung lediglich eine Unterscheidung zwischen Personen über und unter 50 Jahren getroffen wurde<sup>14</sup>. Weitere umfassende Studien sind erforderlich, um die Gründe zu eruieren, weshalb ein höheres Lebensalter in den meisten Studien signifikant mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von tödlichen Flugunfällen einhergeht.

Das Geschlecht der Piloten wurde ebenfalls nicht als Einflussfaktor in Bezug auf einen tödlichen oder schweren Flugunfall in dieser Studie untersucht. In einer Untersuchung von Bargazan et al. wurde der Einfluss des Geschlechts auf das Auftreten menschlicher Fehler

analysiert. Dabei konnte kein Einfluss festgestellt werden. Bei Betrachtung von tödlichen Flugunfällen ereigneten sich diese häufiger mit männlichen Piloten im Vergleich zu Pilotinnen. Diese Beobachtung war jedoch im Zeitraum 1983 bis 1992 stärker ausgeprägt als zwischen 1993 und 2002 <sup>29</sup>.

In einer Untersuchung von Li et al. wurde mittels Chi<sup>2</sup>-Tests kein signifikanter Einfluss des Geschlechts auf tödliche Flugunfälle nachgewiesen <sup>14</sup>. Es ist anzumerken, dass bisher nur wenige Studien den Zusammenhang zwischen dem Geschlecht und tödlichen Kleinflugzeugunfällen untersucht haben. Darüber hinaus wurden keine eindeutigen Ursachen gefunden, die die bisherigen Ergebnisse in Bezug auf das Geschlecht erklären könnten. Dies erfordert eine vertiefte wissenschaftliche Untersuchung, da bislang keine klaren Faktoren gefunden wurden, die die beobachteten Ergebnisse in Bezug auf das Geschlecht erklären können.

## **5.5 Limitationen**

In dieser Studie sind mehrere Limitationen zu berücksichtigen. Potenzielle Übertragungsfehler wurden während des Forschungsprozesses identifiziert und durch wiederholte Sichtkontrollen sowie Plausibilitätsprüfungen der Daten mithilfe von SPSS erkannt und minimiert. Ein weiterer Einschränkungsfaktor liegt in der begrenzten Kontrolle über die Angaben der Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung. Aufgrund der anonymisierten Berichte war es nicht möglich, eine unabhängige Überprüfung der Richtigkeit der Informationen in den Unfallberichten durchzuführen.

Die begrenzte Fallzahl von 285 Ereignissen kann auf die Auswahl des zeitlichen Rahmens und die nationale Beschränkung der Studie zurückgeführt werden. Die Entscheidung, den Untersuchungszeitraum nicht auszuweiten, wurde getroffen, um die Einbeziehung veralteter Unfallursachen zu vermeiden, die das Ergebnis verzerrt hätten. Es sei jedoch angemerkt, dass in Deutschland keine vergleichbare Institution existiert, die detaillierte Untersuchungsberichte über Flugzeugunfälle erstellt. Es wird jedoch angenommen, dass die ermittelten Faktoren auf Unfälle mit Kleinflugzeugen in anderen Ländern übertragbar sein könnten. Für eine umfassendere europäische und internationale Vergleichsanalyse sind jedoch weitere Studien erforderlich.

## **5.6 Schlussfolgerungen und Implikationen für die Praxis**

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Empfehlungen ausgesprochen, durch deren Umsetzung, Verbesserungen in Bezug auf die Flugsicherheit zu erwarten sind. Die

Vorhersagemodelle, die auf der Grundlage von logistischer Regression gebildet wurden, können dazu beitragen, zukünftige Ereignisse frühzeitig zu erkennen.

Die Modelle zur Prognose eines tödlichen- und schweren Ausgangs müssen in der praktischen Anwendung validiert und verifiziert werden. Ein besonderes Augenmerk sollte Faktoren, welche in den Formeln inkludiert sind und eine hohe Odds Ratio haben, gelten. Flugsicherheitsarbeit besteht unter anderem darin diese Faktoren zu ermitteln und zu reduzieren, um die Letalität künftiger Kleinflugzeugunfälle zu reduzieren. Das Vorhersagemodell zur Prognose eines tödlichen Kleinflugzeugunfalls, welches lediglich ermittelbare Faktoren beinhaltet, wurde zur Implikation in Rettungsleitstellen entwickelt.

Angesichts der rasanten technologischen Entwicklung steigt die Nachfrage nach Bewertungssystemen und objektiven Messinstrumenten, um den Entscheidungsprozess zu unterstützen. Projekte wie SPELL (Semantic Platform for Intelligent Decision and Operations Support in Control and Situation Centers) setzen modernste Technologien ein, um die Effizienz und Reaktionsfähigkeit in anspruchsvollen Situationen zu steigern. Diese Projekte konzentrieren sich auf die Entwicklung von Systemen, die verschiedene Aspekte der Bewältigung von kritischen Ereignissen verbessern können. Ihr Hauptziel besteht darin, die Prozesse der Entscheidungsunterstützung und die frühzeitige Erkennung relevanter Indikatoren zu optimieren, um eine bestmögliche Reaktion auf vielfältige Notfallszenarien zu gewährleisten<sup>53</sup>.

Vorhersagemodelle können somit zur Prognose des Unfallschweregrades dienen. Dies ermöglicht es Leitstellendisponierenden im seltenen Fall eines Flugzeugabsturzes, objektiv gestützte Dispositionsentscheidungen zu treffen und optimale Ressourcenplanung und Versorgung Betroffener durchzuführen.

## 6 Literaturverzeichnis

- 1 Høyer CB, Nielsen TS, Nagel LL, Uhrenholt L, Boel LWT. Investigation of a fatal airplane crash: autopsy, computed tomography, and injury pattern analysis used to determine who was steering the plane at the time of the accident. A case report. *Forensic Sci Med Pathol* 2012; **8**: 179–88. <https://doi.org/10.1007/s12024-011-9239-4>.
- 2 AOPA-Germany. Allgemeine Luftfahrt. Was ist das?, 2018.
- 3 The International Council of Aircraft Owner and Pilot Associations. What is General Aviation. <https://www.iaopa.eu/what-is-general-aviation> (accessed Jun 28, 2022).
- 4 Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e.V. Wie sicher ist Fliegen? <https://www.bdl.aero/de/publikation/wie-sicher-ist-fliegen/> (accessed Oct 09, 2023).
- 5 ICAO. CONVENTION ON INTERNATIONAL CIVIL AVIATION DONE AT CHICAGO ON THE 7TH DAY OF DECEMBER 1944, 1944.
- 6 Sparenberg B. Lexikon der zivilen Luftfahrt. München: GeraMond, 2005.
- 7 International Civil Aviation Organization. <https://www.icao.int/about-icao/History/Pages/default.aspx>. <https://www.icao.int/about-icao/History/Pages/default.aspx> (accessed Jun 23, 2023).
- 8 Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung. Gesetzliche Grundlagen. [https://www.bfu-web.de/DE/BFU/GesetzlicheGrundlagen/gesetzlichegrundlagen\\_node.html;jsessionid=6A60D5BA09E88EA5DF8C5AC96A5AC097.live21323](https://www.bfu-web.de/DE/BFU/GesetzlicheGrundlagen/gesetzlichegrundlagen_node.html;jsessionid=6A60D5BA09E88EA5DF8C5AC96A5AC097.live21323) (accessed Jun 22, 2023).
- 9 Europäische Union. Verordnung (EU) Nr. 996/2010 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Oktober 2010 über die Untersuchung und Verhütung von Unfällen und Störungen in der Zivilluftfahrt und zur Aufhebung der Richtlinie 94/56/EG Text von Bedeutung für den EWR, 2018.
- 10 Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung. Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung. [https://www.bfu-web.de/DE/BFU/bfu\\_node.html;jsessionid=44B2AD24AD7DD55D17170D338465F07B.live11294](https://www.bfu-web.de/DE/BFU/bfu_node.html;jsessionid=44B2AD24AD7DD55D17170D338465F07B.live11294).
- 11 Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung. BFU Flyer. Braunschweig, 2022.
- 12 Li G, Gebrekristos HT, Baker SP. FIA Score: a simple risk index for predicting fatality in aviation crashes. *J Trauma* 2008; **65**: 1278–83. <https://doi.org/10.1097/TA.0b013e31812f60dc>.
- 13 Rostykus PS, Cummings P, Mueller BA. Risk factors for pilot fatalities in general aviation airplane crash landings. *JAMA* 1998; **280**: 997–99. <https://doi.org/10.1001/jama.280.11.997>.
- 14 Li G, Baker SP. Correlates of pilot fatality in general aviation crashes. *Aviat Space Environ Med* 1999; **70**: 305–09.

- 15 Boyd DD. Causes and risk factors for fatal accidents in non-commercial twin engine piston general aviation aircraft. *Accid Anal Prev* 2015; **77**: 113–19.  
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.01.021>.
- 16 Bein T, Unertl K. Möglichkeiten und Grenzen von Score-Systemen in der Intensivmedizin. *Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther* 1993; **28**: 476–83.  
<https://doi.org/10.1055/s-2007-998968>.
- 17 Bundesamt für Justiz. Gesetz über die Untersuchung von Unfällen und Störungen bei dem Betrieb ziviler Luftfahrzeuge. [http://www.gesetze-im-internet.de/fluug/\\_\\_\\_2.html](http://www.gesetze-im-internet.de/fluug/___2.html) (accessed Apr 20, 2021).
- 18 Fleig V, Brenck F, Wolff M, Weigand MA. Scoring-Systeme in der Intensivmedizin : Grundlagen, Modelle, Anwendung und Grenzen. *Anaesthetist* 2011; **60**: 963–74.  
<https://doi.org/10.1007/s00101-011-1942-8>.
- 19 Bundesministerium für Gesundheit. Evidenzbasierte Medizin.  
<https://www.bundesgesundheitsministerium.de/service/begriffe-von-a-z/e/evidenzbasierte-medizin/> (accessed Sep 25, 2024).
- 20 Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung. Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung.  
[https://www.bfu-web.de/DE/Home/home\\_node.html](https://www.bfu-web.de/DE/Home/home_node.html) (accessed Sep 25, 2023).
- 21 Luftfahrt-Bundesamt. Luftfahrt-Bundesamt.  
[https://www.lba.de/DE/Home/home\\_node.html](https://www.lba.de/DE/Home/home_node.html) (accessed Sep 25, 2023).
- 22 National Transportation Safety Board. National Transportation Safety Board.  
<https://www.ntsb.gov/Pages/home.aspx> (accessed Sep 25, 2023).
- 23 European Union Aviation Safety Agency. European Union Aviation Safety Agency.  
<https://www.easa.europa.eu/en> (accessed Sep 25, 2023).
- 24 International Civil Aviation Organization. Uniting Aviation. A united nations specialized agency. <https://www.icao.int/Pages/default.aspx>.
- 25 International Air Transport Association. IATA (accessed Sep 25, 2023).
- 26 Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung. Publikationen. [https://www.bfu-web.de/SiteGlobals/Forms/Suche/Untersuchungsberichtesuche\\_Formular.html?nn=4069452&cl2Categories\\_Luftfahrzeugtyp=flugzeuge\\_bis\\_2000kg+flugzeuge\\_zw\\_2000kg\\_und\\_5700kg](https://www.bfu-web.de/SiteGlobals/Forms/Suche/Untersuchungsberichtesuche_Formular.html?nn=4069452&cl2Categories_Luftfahrzeugtyp=flugzeuge_bis_2000kg+flugzeuge_zw_2000kg_und_5700kg) (accessed Sep 25, 2023).
- 27 Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung. Untersuchungsbericht zu einem Unfall am Segelfluggelände Dingel, 2023.
- 28 Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung. Untersuchungsbericht zu einem Unfall am Sonderlandeplatz Bruchsal, 2023.
- 29 Bazargan M, Guzhva VS. Impact of gender, age and experience of pilots on general aviation accidents. *Accid Anal Prev* 2011; **43**: 962–70.  
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.11.023>.

- 30 Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., & Weiber, R. *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung*. Springer Berlin, 2006.
- 31 World Medical Association. WMA Deklaration von Helsinki - Ethische Grundsätze für die medizinische Forschung am Menschen, 2013.
- 32 Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung. Statistiken. Flugunfälle und schwere Störungen. [https://www.bfu-web.de/SiteGlobals/Forms/Suche/Statistikensuche\\_Formular.html?nn=4070470](https://www.bfu-web.de/SiteGlobals/Forms/Suche/Statistikensuche_Formular.html?nn=4070470) (accessed Jun 30, 2023).
- 33 Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung. Jahresberichte. [https://www.bfu-web.de/DE/Publikationen/Jahresberichte/jahresberichte\\_node.html](https://www.bfu-web.de/DE/Publikationen/Jahresberichte/jahresberichte_node.html) (accessed Jun 30, 2023).
- 34 Kundu AK. *Aircraft design*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2010.
- 35 Li G, Baker SP. Crash risk in general aviation. *JAMA* 2007; **297**: 1596–98. <https://doi.org/10.1001/jama.297.14.1596>.
- 36 M. Masson. *Crash-resistant Fuel Systems, Seats and Structure*, 2022.
- 37 Shanahan DF, Shanahan MO. Injury in U.S. Army helicopter crashes October 1979-September 1985. *J Trauma* 1989; **29**: 415-22; discussion 423. <https://doi.org/10.1097/00005373-198904000-00001>.
- 38 European Union Aviation Safety Agency. Annual safety review 2020. <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/117065> (accessed Sep 23, 2022).
- 39 Luftfahrt-Bundesamt. Anzahl der in Deutschland zum Verkehr zugelassenen Luftfahrzeuge, 2022.
- 40 FFL Fachschule für Luftfahrzeugführer GmbH. Die Ausbildung zum Privatpiloten. <https://www.ffa-flighttraining.de/ppl-a-lizenz-ausbildung> (accessed Apr 27, 2024).
- 41 Liebold F, Hippler C, Schmitz J, Yüçetepe S, Rothschild M, Hinkelbein J. Fixed-Wing Motorized Aircraft Accidents: Analysis of Injury Severity and Concomitant Factors (2000-2019). *Aerosp Med Hum Perform* 2022; **93**: 442–49. <https://doi.org/10.3357/AMHP.5977.2022>.
- 42 Bazargan M, Guzhva VS. Factors contributing to fatalities in General Aviation accidents. *WRITR* 2007; **1**: 170. <https://doi.org/10.1504/WRITR.2007.013949>.
- 43 Hill IR. Mechanism of injury in aircraft accidents--a theoretical approach. *Aviat Space Environ Med* 1989; **60**: A18-25.
- 44 Dambier M, Hinkelbein J. Analysis of 2004 German general aviation aircraft accidents according to the HFACS model. *Air Med J* 2006; **25**: 265–69. <https://doi.org/10.1016/j.amj.2006.03.003>.
- 45 Shao BS, Guindani M, Boyd DD. Fatal accident rates for instrument-rated private pilots. *Aviat Space Environ Med* 2014; **85**: 631–37. <https://doi.org/10.3357/ase.3863.2014>.

- 46 Aeroimpulse GmbH. Human Factors - Menschliche Faktoren verstehen und beherrschen. <https://aeroimpulse.de/insights/human-factors-definition/> (accessed Sep 06, 2023).
- 47 International Air Transport Association. 2021 Safety Report. Issued April 2022, 2021.
- 48 Tejada F. General Aspects in Aircraft Accident Investigation. Madrid, 2004.
- 49 Alaziz M, Stolfi A, Olson DM. Cirrus Airframe Parachute System and Odds of a Fatal Accident in Cirrus Aircraft Crashes. *Aerosp Med Hum Perform* 2017; **88**: 556–64. <https://doi.org/10.3357/AMHP.4679.2017>.
- 50 Weimann E, Weimann P. Das Swiss Cheese Model als „critical incident reporting system“ zur Risikoreduzierung und Erhöhung der Patientensicherheit in Klinik und Praxis. *Pneumologe* 2013; **10**: 201–04. <https://doi.org/10.1007/s10405-013-0687-2>.
- 51 Lufthansa Aviation Training GmbH. Human Factors. DIE SICHERHEIT UND DER ERFOLG IHRES UNTERNEHMENS LIEGEN IN DEN HÄNDEN DER MITARBEITER:INNEN. <https://www.lufthansa-aviation-training.com/de/human-factors-training> (accessed Sep 06, 2023).
- 52 Bennett CT, Schwirzke M. Analysis of accidents during instrument approaches. *Aviat Space Environ Med* 1992; **63**: 253–61. <https://doi.org/Study>.
- 53 Verband für Sicherheitstechnik e.V. SPELL – KI in der vernetzten Leitstelle der Zukunft. <https://spell-plattform.de/> (accessed May 29, 2022).

## 7 Anhang

### 7.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Anzahl [n] der gemeldeten Kleinflugzeugunfälle und schwere Störungen, sowie die Anzahl der schwer- und tödlich Verletzten Personen von 2000 – 2019.....	26
Abbildung 2 - Übersicht der gemeldeten und eingeschlossenen Störungen und Unfälle.....	27
Abbildung 3 - Häufigkeitsverteilung [n] der Verletzungsschwere.....	28
Abbildung 4 - Anzahl [n] der Untersuchungsberichte unterteilt nach Verletzungsschwere pro Monat.....	29
Abbildung 5 - Anzahl [n] der Untersuchungsberichte unterteilt nach Verletzungsschwere pro Jahreszeit.....	29
Abbildung 6 - Anzahl [n] der Untersuchungsberichte unterteilt nach Verletzungsschwere pro Wochentag.....	30
Abbildung 7 - Anzahl [n] der Kleinflugzeugunfälle unterteilt nach Flugzeughersteller und Verletzungsschwere der Insassen.....	31
Abbildung 8 - Anzahl der Kleinflugzeuge [n] unterteilt nach Verletzungsschwere unterteilt nach Anzahl der Sitze.....	32
Abbildung 9 - Anzahl der Kleinflugzeuge [n] unterteilt nach Verletzungsschwere unterteilt nach Anzahl der Personen an Bord.....	33
Abbildung 10 - Anzahl der Flugunfälle [n] unterteilt nach Verletzungsschwere und Flugphase.....	34
Abbildung 11 - Anzahl der Piloten [n] unterteilt nach Verletzungsschwere und Pilotenlizenz	35
Abbildung 12 - Anzahl der Flugunfälle [n] unterteilt nach Verletzungsschwere und Flugerfahrung des Piloten in Stunden.....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
Abbildung 13 - Anzahl der Flugunfälle [n] unterteilt nach Verletzungsschwere und Flugerfahrung des Piloten auf dem Modell in Stunden.....	37

## 7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Ein- und Ausschlusskriterien der zur Analyse verwendeten Daten.....	17
Tabelle 2 – Kategorienkonstrukt der Untersuchungsberichte der BFU.....	20
Tabelle 3 - Publikationszahlen zu Kleinflugzeug Unfällen und -Sicherheit in PubMed .....	25
Tabelle 4 - Signifikante Variablen für einen tödlichen- oder schweren Ausgang .....	<b>Fehler!</b>
<b>Textmarke nicht definiert.</b>	
Tabelle 5 - Variablen in der Gleichung - Score tödlicher Unfall .....	42
Tabelle 6 - Variablen in der Gleichung - Score Rettungsleitstelle .....	44
Tabelle 7 -Variablen in der Gleichung – Score schwerer Ausgang .....	46

### 7.3 Formelverzeichnis

Formel 1 - Formel logistische Regression.....	22
Formel 2 - Formel zur Prognose eines tödlichen Kleinflugzeugabsturzes .....	43
Formel 3 - Fiktive Berechnung zur Prognose tödlicher Verletzungen.....	43
Formel 4 - Formel zur Prognose eines tödlichen Kleinflugzeugabsturzes für Rettungsleitstellen .....	45
Formel 5 - Formel zur Prognose eines schweren Kleinflugzeugunfalls .....	47

## 7.4 Anhang A

Kategorie	Subkategorie	Subsub- kategorie	p-Wert Tod	p-Wert schwerer Ausgang	Total (n)	
Kalendarische Daten	Monat		0,054	0,553	285	
		Januar	0,291	0,612	14	
		Februar	0,711	0,615	9	
		März	0,071	0,075	20	
		April	0,661	0,513	32	
		Mai	0,152	0,293	29	
		Juni	0,722	0,835	26	
		Juli	0,256	0,461	28	
		August	0,364	0,748	44	
		September	0,329	0,440	38	
		Oktober	0,112	0,654	16	
		November	0,402	0,417	15	
	Dezember	0,005	0,077	14		
	Jahreszeiten			0,329	0,918	285
		Frühling		0,808	0,879	81
		Sommer		0,106	0,562	98
		Herbst		0,606	0,959	69
		Winter		0,193	0,582	37
	Quartale des Jahres			0,003	0,053	285
		1. Quartal des Jahres		0,081	0,068	43
2. Quartal des Jahres			0,309	0,205	87	
3. Quartal des Jahres			0,040	0,219	110	
4. Quartal des Jahres			0,002	0,067	45	

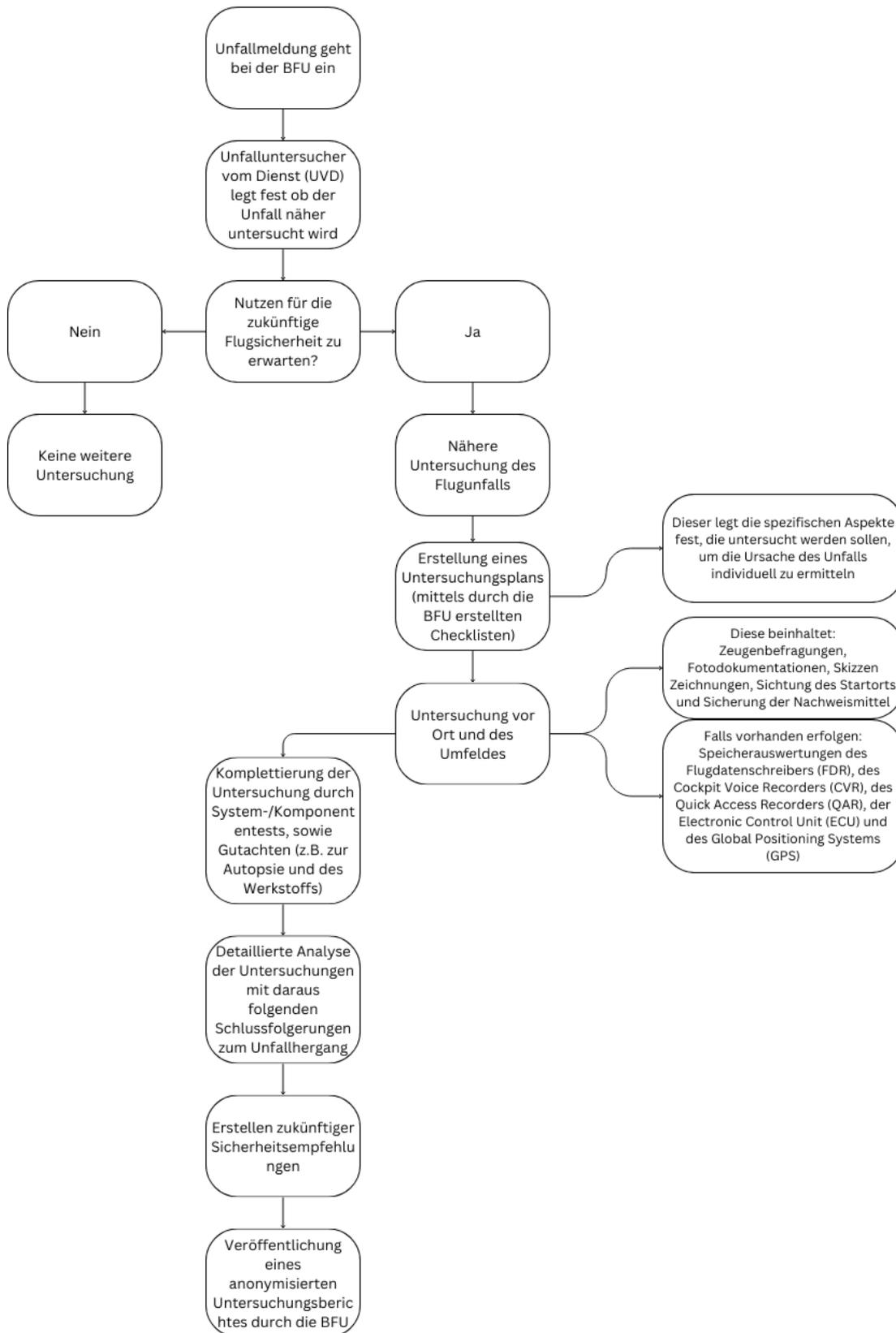
			0,447	0,394	285	
	Wochentag	Montag	0,118	0,513	32	
		Dienstag	0,403	0,050	35	
		Mittwoch	0,795	0,815	42	
		Donnerstag	0,517	0,813	29	
		Freitag	0,443	0,299	38	
		Samstag	0,930	0,287	56	
		Sonntag	0,112	0,400	53	
		Wochenende	Freitag bis Sonntag	0,518	0,370	147
Art der Notsituation	Feuer				285	
		Nein			214	
		Ja	< 0,001	< 0,001	71	
	Triebwerksausfall				280	
		Nein			217	
		Ja	< 0,001	0,133	63	
Flugzeugparameter	Flugzeughersteller		0,042	0,11	285	
		Cessna	0,007	0,001	66	
		Piper Aircraft	0,580	0,489	48	
		Beechcraft	0,556	0,528	14	
		Avions Robin	0,837	0,916	18	
		Sonstige Hersteller	0,010	0,003	139	
		MTOW	< 2.000 kg			285
			< 2.000 kg	0,046	< 0,001	230
	2.000 – 5.700 kg				54	
	Anzahl der Triebwerke				284	
Einmotorig		0,147	0,013	234		
Mehrmotorig				50		
Fahrwerk				281		
	Festgestellt	0,030	0,080	176		
	Einfahrbar			105		

				284	
	Anzahl der Sitze	1-4		75	
		> 4	0,547	0,057	209
				284	
	Anzahl der Personen an Bord	1-3		232	
		> 3	0,139	0,101	52
					284
<b>Lage und Flugphase</b>	Entfernung > 10 km zum Landeplatz	Nein		230	
		Ja	< 0,001	0,003	54
			< 0,001	< 0,001	284
	Flugphase	Start (Take-off)	0,811	0,144	83
		Reiseflug	< 0,001	< 0,001	70
		Sinkflug	0,051	0,010	52
		Landephase	< 0,001	< 0,001	79
			0,444	0,150	273
	Fluglizenz	PPL	0,831	0,089	196
		CPL	0,366	0,027	55
SPL / LAPL		0,163	0,445	5	
ATPL		0,743	0,932	17	
				284	
<b>Pilotparameter</b>	Anzahl der Crew Mitglieder im Cockpit	1	0,966	0,374	252
		2			32
			0,147	0,110	254
	Flugerfahrung (Gesamt)	< 100 Stunden	0,312	0,300	14
		100 – 300 Stunden	0,102	0,139	45
		300 – 2.000 Stunden	0,750	0,265	
		2.000 – 5.000 Stunden	0,037	0,072	50
		> 5.000 Stunden	0,717	0,199	39
	Flugerfahrung (auf dem Modell)		0,059	0,003	
		< 100 Stunden	0,718	0,569	102

Anhang A - Ergebnisse Pearson Chi<sup>2</sup>-Test und Mann-Whitney-U-Test in Bezug auf einen tödlichen- oder schweren Ausgang , Parameter für die Rettungsleitstelle XX markiert

		100 – 300 Stunden	0,655	0,527	39
		300 – 2.000 Stunden	0,087	0,172	
		2.000 – 5.000 Stunden	0,019	< 0,001	9
		> 5.000 Stunden	0,160	0,061	2
					285
	Illusionen	Nein			202
		Ja	< 0,001	0,005	83
					275
	Menschliche Faktoren	Nein			57
		Ja	0,001	< 0,001	218
					285
Flugbedingungen	Nacht	Nein			261
		Ja	0,709	0,151	24
					285
	Frostzustände	Nein			267
		Ja	0,308	0,774	18
					281
Flugregeln	VFR	0,985	0,478	255	
	IFR			26	
			0,548	0,443	285
Sonstiges	Grund des Flugantritts	Transport	0,970	0,321	12
		Freizeitflug	0,601	0,555	63
		Sightseeing	0,279	0,139	43
		Luffahrtveranstaltung	0,860	0,210	21
		Trainingsflug	0,340	0,630	27
		Testflug	0,094	0,308	6
		Sonstige Fluggründe	0,612	0,756	113
	Missachtete Regeln	Nein			207
		Ja	0,310	0,063	75

## 7.5 Anhang B



Anhang B - Standardisiertes Vorgehen der Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung bei Eingang einer Flugunfallmeldung (Gemäß einem persönlichen Gespräch mit Herr Freitag (Pressesprecher der BFU))

## 8 Vorabveröffentlichungen von Ergebnissen

Liebold F, Hippler C, Schmitz J, Yücepepe S, Rothschild M, Hinkelbein J

**Analysis of Contributing and Underlying Factors of General Aviation Aircraft Accidents in Germany (2000-2019)**

Abstracts DGLRM 2021

Liebold F, Hippler C, Schmitz J, Yücepepe S, Rothschild M, Hinkelbein J

**Fixed-Wing Motorized Aircraft Accidents: Analysis of Injury Severity and Concomitant Factors (2000–2019)**

Aerosp Med Hum Perform. 2022; 93(5):442–449

DOI: <https://doi.org/10.3357/AMHP.5977.2022>

Hinkelbein J, Schick V, Boyd DD, Hippler C

**Survival after ditching in motorized aircraft - Analysis of the NTSB database (1989-2022)**

Aerosp Med Hum Perf 2023;94(4):176

Hinkelbein J, Hippler C, Liebold F, Schmitz J, Schick V, Rothschild M

**Prediction of fatal outcomes in German general aviation accidents - a new scoring system to facilitate emergency control centres**

Eur J Anaesthesiol 2023;40(61):329

Liebold F, Hippler C, Hinkelbein J, Schmitz J, Schick V, Rothschild M

**Prediction of fatal outcomes in GA accidents by using a scoring system to facilitate adequate response of emergency control centres**

Aerosp Med Hum Perf 2023;94(4):212

Schick VC, Boyd DD, Hippler C, Hinkelbein J

**Survival after ditching in motorized aircraft (1989-2022)**

Abstracts DGLRM 2023;50