



Drohnen-Crashtest

Schadenspotenzial im Drohnenbetrieb

Wien, März 2022

Drohnen-Crashtest

Schadenspotenzial im Drohnenbetrieb

Autoren

Stefan Georgiev MA

Fachliche Verantwortung

Stefan Georgiev MA

Auftraggeber

Dr. Armin Kaltenegger

Gender-Hinweis

Zugunsten besserer Lesbarkeit findet entweder die männliche oder weibliche Form von personenbezogenen Hauptwörtern Verwendung. Dies impliziert keinesfalls eine Benachteiligung des jeweils anderen Geschlechts. Gemeint und angesprochen sind alle Geschlechter.

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	5
Das (Schadens-)Potenzial	5
Die Methodik	5
Die Ergebnisse	5
1. Einleitung	6
2. Methodik	7
2.1. Die Drohnen	7
2.2. Die Simulanzmedien	8
2.3. Die Verletzungen durch Aufprallenergie	10
2.4. Die Sensoren	10
3. Ergebnisse der Crashtests	11
3.1. Test 1: Drohne mit Abfluggewicht von 38 Gramm	11
3.2. Test 2: Drohne mit Abfluggewicht von 80 Gramm	12
3.3. Test 3: Drohne mit Abfluggewicht von 130 Gramm	13
3.4. Test 4: Drohne mit Abfluggewicht von 208 Gramm	14
3.5. Test 5: Drohne mit Abfluggewicht von 356 Gramm	15
3.6. Test 6: Drohne mit Abfluggewicht von 495 Gramm	16
3.7. Test 7: Drohne mit Abfluggewicht von 563 Gramm	17
3.8. Test 8: Drohne mit Abfluggewicht von 554 Gramm	18
3.9. Test 9: Drohne mit Abfluggewicht von 562 Gramm	20
3.10. Test 10: Drohne mit Abfluggewicht von 563 Gramm	21
3.11. Test 11: Drohne mit Abfluggewicht von 600 Gramm	22
3.12. Test 12: Drohne mit Abfluggewicht von 1.337 Gramm	23
3.13. Test 13: Drohne mit Abfluggewicht von 1.751 Gramm	24
3.14. Test 14: Handverletzungen durch Propeller	27
4. Conclusio	28

Executive Summary

Das (Schadens-)Potenzial

Prognosen zeigen, dass der globale Drohnenmarkt bis 2025 einen geschätzten Marktwert von 63,6 Milliarden Dollar erreichen wird. Drohnen bieten enorme Aufwands- und Kostenreduktionen und werden vermehrt von diversen Unternehmen eingesetzt, etwa für Inspektionen, in der Forschung, im Bauwesen, in der Landwirtschaft etc. Im Zuge von Kollisionen können Drohnen jedoch aufgrund der beachtlich hohen Geschwindigkeiten, die sie erreichen können, großen Schaden anrichten. In den letzten Jahren häuften sich internationale Meldungen über Beinahe-Kollisionen und über gefährliche Vorfälle, bei denen Menschen gefährdet oder gar verletzt wurden: Drohnen, die Fußgänger verletzten, mit Fahrzeugen auf der Autobahn kollidierten, beinahe mit Hubschraubern und Passagierflugzeugen zusammenstießen oder Flughäfen lahmlegten. Die Sicherheit im Umgang mit Drohnen ist demnach ein Thema, das von Tag zu Tag wichtiger wird: Rund 100.000 Drohnen schweben immerhin bereits über österreichischen Boden – Hobbyflieger miteingerechnet. Eine Studie des KfV aus dem Jahr 2019 hat ergeben, dass sich sowohl Drohnenexperten als auch die Bevölkerung Gedanken um Schäden in Zusammenhang mit Drohnenabstürzen machen. Das KfV hat sich mit den Drohnen-Crashtests zum Ziel gesetzt, die tatsächliche Verletzungsgefahr, die von Drohnen ausgehen kann, zu untersuchen.

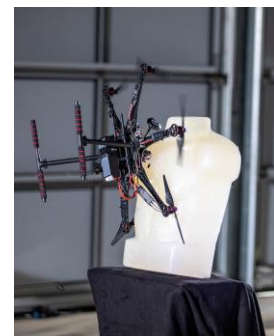
Die Methodik



Im Rahmen der Crashtests wurden diverse Drohnen auf ihr Schadenspotenzial untersucht. Es wurden insgesamt 13 Geräte mit einem Abfluggewicht von 38 bis 1.751 Gramm für die Tests herangezogen. Zur Bemessung der Schäden wurden ballistische Simulanzmedien (Kopf- und Torsomodelle eines Erwachsenen) eingesetzt. Diese waren aus ballistischem Gel bzw. ballistischer Seife hergestellt und mit empfindlichen Beschleunigungssensoren ausgestattet. Die Sensoren hatten einen weitläufigen Dynamikbereich, der das Erfassen von sehr hohen g -Kräften (bis zu $\pm 200 g$) erlaubte. Mithilfe der Modelle konnten nicht nur die Aufprallenergie, sondern auch mögliche Schnittverletzungen sichtbar gemacht werden.

Die Ergebnisse

Die Drohnen-Crashtests haben gezeigt, dass es bei unsachgemäßer Handhabung mit jeder Drohne zu Verletzungen kommen kann. Ob es sich dabei um kleine Kratzer oder eine lebensgefährliche Verletzung handelt, hängt von Gewicht und Aufprallgeschwindigkeit der Drohne ab. Selbst bei einer geringen Geschwindigkeit geht von hochdrehenden Propellern und scharfen Kanten am Gestell eine Gefahr aus. Empfindliche Organe und Körperteile wie etwa Augen, Ohren, Gesicht und Finger sind besonders gefährdet. Sogar eine kleine Drohne mit einem Gewicht von 38 Gramm und einer Geschwindigkeit von ca 11 km/h verursachte im Versuch Gesichtsverletzungen. Bei Drohnen ab 250 Gramm waren die Verletzungen schwerwiegender: von einer gebrochenen Nase und gebrochenen Fingern bis hin zu einer punktierten Lunge. In keinem der Tests wurde die für eine Gehirnerschütterung notwendige Aufprallenergie erreicht. Jedoch hat eine Drohne mit 1.751 Gramm Gewicht ein 35 kg schweres Torsomodell zu Boden geschleudert. Ein Bodensturz kann dabei zu zusätzlichen Verletzungen führen. So ist auch eine Gehirnerschütterung als mögliche Folge nicht auszuschließen.



1. Einleitung

Drohnen (f)liegen voll im Trend: Auch in Österreich machen immer mehr Menschen das Navigieren unbemannter ferngesteuerter Luftfahrzeuge zu ihrem Hobby. Derzeit sind bereits rund 100.000 Drohnen österreichweit im militärischen, gewerblichen oder auch nur rein privaten Einsatz. Prognosen zeigen, dass der globale Dohnenmarkt bis 2025 einen Marktwert von 63,6 Milliarden Dollar erreichen wird. Drohnen bieten enorme Aufwands- und Kostenreduktionen und erweisen sich in immer mehr täglichen Einsatzbereichen als nutzbringende Innovation. Dies betrifft vor allem die Bereiche Land- und Forstwirtschaft, Kartographie, Transport und Logistik, Umweltschutz, Wissenschaft und Forschung, Industrie und Infrastruktur sowie polizeiliche und militärische Sicherheitsaktivitäten und Hilfeinsätze.

Der rapide Anstieg an vielfältiger Nutzung bringt aber auch ein gewisses Risiko mit sich. Viele Drohnen zeichnen sich durch das Erreichen beachtlicher Geschwindigkeiten aus und richten im Fall von Kollisionen mitunter große Schäden an. In den letzten Jahren häuften sich Meldungen über gefährliche Vorfälle (z. B. im Umfeld von Flughäfen), Beinahe-Kollisionen oder Unfälle mit Drohnen, bei denen Menschen verletzt wurden. Drohnensicherheit ist also ein Thema, das von Tag zu Tag wichtiger wird.

Eine Studie des KfV aus dem Jahr 2019 zeigte, dass sich sowohl Drohnenexperten als auch die Bevölkerung Gedanken um Schäden im Zusammenhang mit Drohnenabstürzen machen. Grundsätzlich wird von den Experten die Absturzgefahr bzw. die Gefährdung anderer Teilnehmer durch fehlerhafte Nutzung als hohes Risiko gesehen, selbst wenn sich die Technologie ständig verbessert.

Aus diesem Grund hat sich das KfV zum Ziel gesetzt, mittels Crashtests die tatsächliche Verletzungsgefahr, die von Drohnen ausgehen kann, zu untersuchen.

2. Methodik

Im Rahmen der Crashtests wurden diverse Drohnen auf ihr Schadenspotenzial untersucht. Für die Untersuchung wurden insgesamt 13 Geräte mit einem Abfluggewicht zwischen 38 und 1.751 Gramm herangezogen. Zur Bemessung der Schäden wurden ballistische Simulanzmedien (Kopf- und Torsomodelle eines Erwachsenen) eingesetzt. Diese waren aus ballistischem Gel bzw. ballistischer Seife hergestellt und mit empfindlichen Beschleunigungssensoren ausgestattet. Die Sensoren hatten einen weitläufigen Dynamikbereich, der das Erfassen von sehr hohen g -Kräften (bis zu $\pm 200 g$) erlaubte. Mithilfe der Modelle konnten nicht nur die Aufprallenergie, sondern auch mögliche Schnittverletzungen sichtbar gemacht werden. Die aufwändigen Tests wurden in einer geschlossenen Anlage des **NÖ Feuerwehr- und Sicherheitszentrums (www.noefsz.at)** in Tulln durchgeführt.

2.1. Die Drohnen

Um das Verletzungsrisiko von Drohnen – vor allem im Hobbybereich – zu untersuchen, wurden 13 Drohnen in unterschiedlichen Ausführungen getestet. Die Kategorie „offen“ unterteilt sich in drei Subkategorien – A1, A2 und A3, die die erlaubte Entfernung von Menschen bzw. Menschenmassen bestimmen. Diese Subkategorien unterteilen sich in weitere fünf Klassen (C0, C1, C2, C3 und C4), die Drohnen nach Gewicht und Geschwindigkeit klassifizieren.

Sub-kategorie	Entfernung von Menschen bzw. Menschenmassen	Max. Flughöhe	CE-Kennzeichnung	Max. Abfluggewicht*	Pilotenkompetenz	Technische Voraussetzungen	Registrierung des Betreibers
A1	Flug über Unbeteiligte, aber nicht über Menschenmassen	120 m über Grund	C0	< 250 g	Keine erforderlich	- < 19 m/s (68,4 km/h)	Nur wenn Kamera eingebaut ist
			C1	< 900 g	Online-Ausbildung; Online-Test	- < 19 m/s (68,4 km/h) - Geo-Sensibilisierung** - Remote ID***	Ja
A2	30 m Abstand zu unbeteiligten Personen oder 5 m im langsamen Flugbetrieb (unter 3 m/s)		C2	< 4 kg	Online-Ausbildung; Online-Test; Theorietest bei einer genehmigten Stelle;	- Geo-Sensibilisierung - Remote ID	
A3	Mind. 30 m Abstand zu unbeteiligten Personen; 1:1 Regel – 1 m Abstand für 1 m Höhe; 150 m Abstand zu Industrie-, Wohn-, Freizeit- und Erholungsgebieten		C3	< 25 kg	Online-Ausbildung; Online-Test	- Geo-Sensibilisierung - Remote ID	
			C4			- Keine automatisierten Flüge erlaubt	

Tabelle 1: Subkategorien der Kategorie "offen" laut der Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge

Da Drohnen aus den **Subkategorien A1 und A2 (Klasse C0, C1 und C2)** unter Umständen nah an Menschen heranfliegen und diese gegebenenfalls überfliegen dürfen, erhöht sich gleichzeitig mit der Wahrscheinlichkeit eines Zusammenstoßes auch die Verletzungsgefahr. Im Hinblick

darauf wurden für die Crashtests Drohnen ausgewählt, die unter diese zwei Kategorien fielen. Zudem spielte der Hersteller für die Auswahl keine Rolle. Der Schwerpunkt wurde auf Produkte der niedrigeren Preisklasse gesetzt, die über wenig bis keine Sicherheitsmerkmale wie etwa Kollisionsvermeidungssystem, Objekterkennung, fortgeschrittene Rückkehrfunktionen etc. verfügten.

Test Reihenfolge	Anzahl Rotoren	Klasse	Abfluggewicht ¹ in Gramm	Spannbreite ² in cm	Propeller-Durchmesser in cm
1	4	C0	38	10	3
2	4	C0	80	20	10
3	4	C0	130	21	11
4	4	C0	208	26	12
5	4	C1	356	27	12
6	4	C1	495	29	17
7	4	C1	526	36	19
8	4	C1	554	36	19
9	4	C1	562	35	21
10	4	C1	563	36	19
11	4	C1	600	35	19
12	4	C2	1.337	53	24
13	6	C2	1.751	60	25

Tabelle 2: Liste der im Test eingesetzten Drohnen samt Eigenschaften

2.2. Die Simulanzmedien

Für die Messungen der angerichteten Schäden wurde bei den Crashtests auf die in der Ballistik üblichen Simulanzmedien zurückgegriffen. Zur Anwendung kamen Kopf- und Torsomodelle aus ballistischer Gelatine, um Parameter wie etwa die Aufprallenergie zu erfassen. Des Weiteren wurden Kopf-, Torso- und Handmodelle aus ballistischer Seife verwendet, um mögliche Schnittverletzungen zu bemessen. Das dynamische Verhalten der Drohne beim Aufprall auf die Simulanzmedien wurde dabei mittels Hochgeschwindigkeitsvideografie dokumentiert.

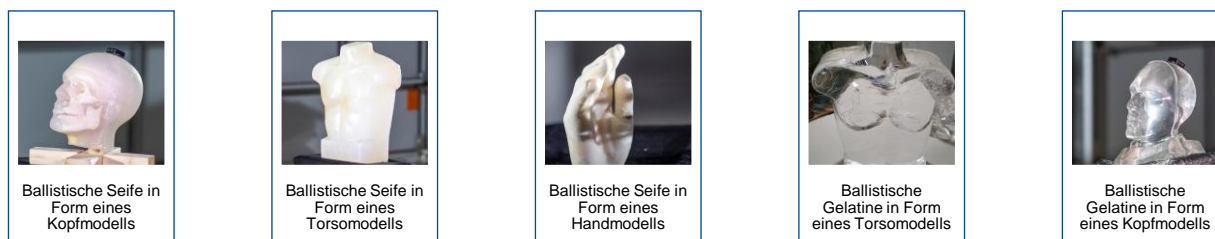


Abbildung 1: In den Crashtests eingesetzte Kopf-, Torso- und Handmodelle

¹ Gewicht des Geräts samt Akku und Nutzlast (z.B. Kamera)

² Abgemessen diagonal von Rotor zu Rotor, exkl. Propeller

Ballistische Gelatine (oder kurz Ballistik-Gel) ist ideal für Gewebesimulationen geeignet. Im Bereich der Waffenforschung und Forensik sowie Kriminalistik wird sie zur Simulation weicher Körper verwendet. Dabei handelt es sich um herkömmliche Gelatine, die eine bestimmte Festigkeit aufweist und nahezu identisch mit der realen Masse, dem Gewicht und der Konsistenz von Muskelgewebe ist. Sie simuliert gut die Dichte und Viskoelastizität von menschlichem Muskelgewebe und wird als Standardmedium bei Schusswaffentests eingesetzt. Obgleich ballistische Gelatine die Zugfestigkeit von Muskeln oder Körperstrukturen wie Haut und Knochen nicht spiegelt, dient sie gut zur Nachahmung von Gewebe und stellt aufgrund ihrer ähnlichen Eigenschaften für die meisten ballistischen Tests ein wirklichkeitsgetreues Simulationsobjekt dar. Für Projektile mit (im Vergleich zur Munition) sehr niedriger Geschwindigkeit kommt sie als Modell jedoch nur bedingt in Frage. Zum Zweck dieser Studie wurden Modelle aus Ballistik-Gel eingesetzt, da die Flexibilität des Materials sich gut dafür eignet, die erlebte Aufprallenergie, sprich jene Energie, die von der Drohne auf ein Körperteil übertragen wird, möglichst realitätsnah darzustellen und mittels Beschleunigungssensoren zu erfassen.

Ballistische Seife eignet sich im Gegensatz dazu für Untersuchungen, bei denen menschliches Gewebe Gegenstand der Untersuchung ist. Aufgrund der im Vergleich zu Ballistik-Gel höheren Festigkeit des Materials, genügt Ballistik-Seife nicht den Anforderungen, wenn es um die Bemessung von Aufprallenergie geht. Das Material eignet sich allerdings gut dafür, Schnittverletzungen sowie stumpfe Aufprallverletzungen zu demonstrieren. Zudem wurden im eingesetzten Seifen-Handmodell Hühnerknochen und im Seifen-Kopfmodell ein künstlicher Schädel platziert, um die physikalischen Merkmale dieser Körperteile möglichst realitätsgetreu darzustellen.

Im Zuge eines jeden Tests kam es zu mehreren Versuchen. Zunächst wurden die Aufprallenergien unter der Verwendung von Ballistik-Gel-Modellen (Kopf und Torso) und mithilfe eines Beschleunigungssensors gemessen. Anschließend wurden die Tests wiederholt, wobei die Seifen-Modelle (Kopf und Torso) eingesetzt wurden, um mögliche Schnittverletzungen zu offenbaren.

2.3. Die Verletzungen durch Aufprallenergie

Als Richtwert für die Bemessung des Verletzungspotenzials wurde das Modell Wayne State Tolerance Curve (WSTC) angewendet. Es veranschaulicht den Zusammenhang zwischen linearer Kopfbeschleunigung, Beschleunigungsdauer und Eintritt der Gehirnerschütterung. **Abbildung 2** zeigt jene Kurve, die die Toleranzgrenze zu lebensbedrohlichen Kopfverletzungen markiert: Ergibt die Kombination aus Beschleunigung und Dauer einen Wert oberhalb der Kurve, so kann dies irreversible tödliche Schädel-/Hirnverletzungen zur Folge haben. Gemäß dem Modell ist der Mensch in der Lage, für eine sehr kurze Zeit sehr hohe Beschleunigungen ohne unmittelbare Lebensgefahr zu überstehen. Analog dazu gilt, je länger die Einwirkungsdauer bei niedriger Beschleunigungsintensität desto höher ist die Gefahr, lebensgefährliche Kopfverletzungen davonzutragen. Eine Gehirnerschütterung tritt demnach erst bei ca. 95 g und einer Einwirkungsdauer von weniger als 10 Millisekunden ein, vergleichbar etwa mit einem Kopfstoß gegen eine Wand mit ca. 10 m/s (Panenka, et al., 2013).

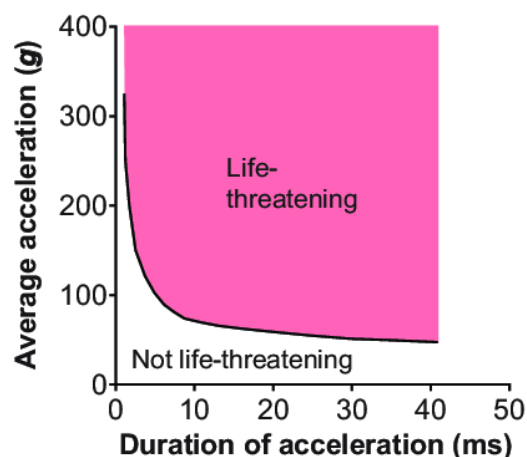



Abbildung 2: Wayne State Tolerance Curve (WSTC),
Quelle: DMM Disease Models & Mechanisms, Nov. 2013

2.4. Die Sensoren

Um die erlebten Aufprallenergien zu bemessen, wurden die Kopf- und Torsomodelle mit Beschleunigungssensoren ausgestattet, die einen Dynamikbereich von ± 200 g-Kräften hatten. Diese Sensoren bemessen Beschleunigung in 3 Achsen – jeweils eine Achse für jede Richtung: links/rechts, nach oben/nach unten, nach vorne/nach hinten.

3. Ergebnisse der Crashtests

3.1. Test 1: Drohne mit Abfluggewicht von 38 Gramm

Eigenschaften der Drohne		
	Modell	Spielzeug-Drohne
	Ausführung	Quadrocopter
	Spannbreite	10 cm
	Abfluggewicht	38 Gramm
	Propeller	Durchmesser: 3 cm Kunststoff nicht-faltbar
	Erreichte Geschwindigkeit	3,2 m/s

Der erste Testversuch wurde mit einer Spielzeug-Minidrohne durchgeführt, die ein Abfluggewicht von 38 Gramm auf die Waage brachte. Dabei wurde für ca. 10 Millisekunden eine Beschleunigung von 1 g erreicht (**Abbildung 3**).

Die Messung der Aufprallenergie ergab einen sehr geringen Wert, sodass keine stumpfen Verletzungen verursacht wurden. Allerdings sind die Propeller am Seifen-Kopfmodell direkt in Kontakt mit der Vorderfläche eines Auges gekommen, was beim Menschen eine Hornhautabschürfung³ zur Folge haben könnte (

Abbildung 4).

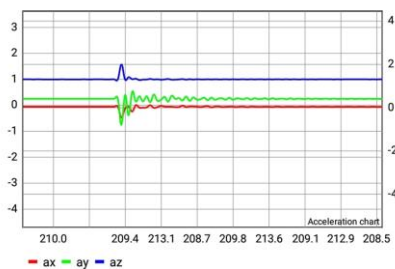



Abbildung 3: Beschleunigung Test 1, Abfluggewicht: 38 Gramm

Abbildung 4: Test 1, Verletzungen im Augenbereich

³ Eine Hornhautabschürfung ist ein Kratzer auf der klaren Vorderfläche des Auges (Hornhaut).

3.2. Test 2: Drohne mit Abfluggewicht von 80 Gramm


Eigenschaften der Drohne		
	Modell	Spielzeug-Drohne
	Ausführung	Quadrocopter
	Spannbreite	20 cm
	Abfluggewicht	80 Gramm
	Propeller	Durchmesser: 10 cm Kunststoff faltbar
	Erreichte Geschwindigkeit	3,25 m/s

In den Versuchen zu Test 2 wurde eine Spielzeugdrohne mit einem Abfluggewicht von 80 Gramm eingesetzt. Dabei wurde eine sehr geringe Aufprallenergie von unter 1 g gemessen. Dennoch zerkratzten die Propeller die Haut im Gesicht und auf der Nase, was – ähnlich dem Ergebnis aus Test 1 – im direkten Kontakt mit dem Auge zu Verletzungen führen kann.



Abbildung 5: Test 2, Verletzungen im Gesicht

3.3. Test 3: Drohne mit Abfluggewicht von 130 Gramm

Eigenschaften der Drohne		
	Modell	Spielzeug-Drohne
	Ausführung	Quadrocopter
	Spannbreite	21 cm
	Abfluggewicht	130 Gramm
	Propeller	Durchmesser: 10 cm Kunststoff faltbar
	Erreichte Geschwindigkeit	3,1 m/s

Hier kam eine Drohne mit einem Abfluggewicht von 130 Gramm zur Anwendung, die eine Geschwindigkeit von 3 m/s erreichte. Die gemessene Aufprallenergie war wiederum sehr gering, jedoch gab es kleine Kratzer im Gesichtsbereich, die durch die Propeller verursacht wurden.

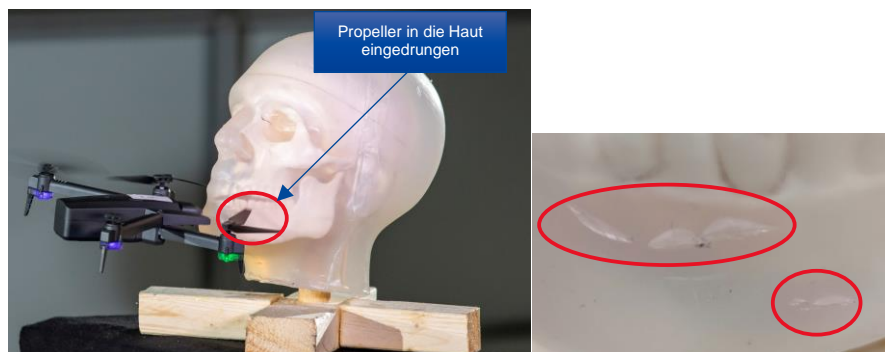



Abbildung 6: Test 3, Drohne beim Aufprall (links) und Verletzungen im Mundbereich (rechts)

3.4. Test 4: Drohne mit Abfluggewicht von 208 Gramm

Eigenschaften der Drohne		
	Modell	Spielzeug-Drohne
	Ausführung	Quadrocopter
	Spannbreite	26 cm
	Abfluggewicht	208 Gramm
	Propeller	Durchmesser: 12 cm Kunststoff faltbar
	Erreichte Geschwindigkeit	2,1 m/s

Im Zuge von Test 4 wurden keine Verletzungen verzeichnet. Aufgrund der geringen Geschwindigkeit und des relativ geringen Gewichts wurde keine Beschleunigung am Kopfmodell gemessen. Zudem wurden aufgrund der sehr leicht faltbaren Propeller und der weichen Propellerblätter hier keine signifikanten Kratzwunden verursacht.

3.5. Test 5: Drohne mit Abfluggewicht von 356 Gramm

Eigenschaften der Drohne		
	Modell	Kamera-Drohne
	Ausführung	Quadrocopter
	Spannbreite	27 cm
	Abfluggewicht	356 Gramm
	Propeller	Durchmesser: 12 cm Kunststoff faltbar
	Erreichte Geschwindigkeit	4,5 m/s

Für Test 5 wurde eine Kamera-Drohne der niedrigen Preisklasse mit einem Abfluggewicht von 356 Gramm samt Nutzlast herangezogen. Dabei wurde eine Beschleunigung von über 2 g am Kopf gemessen (**Abbildung 7**). Das Seifen-Kopfmodell erlitt durch die Propeller nur leichte Kratzverletzungen.

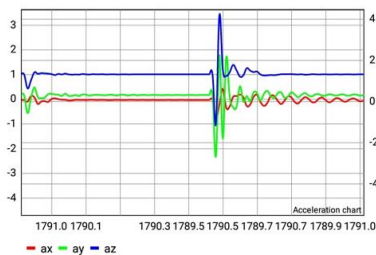



Abbildung 7: Beschleunigung Test 5, Abfluggewicht 356 Gramm, gemessen am Kopfmodell

3.6. Test 6: Drohne mit Abfluggewicht von 495 Gramm

Eigenschaften der Drohne		
	Modell	Kamera-Drohne
	Ausführung	Quadrocopter
	Spannbreite	27 cm
	Abfluggewicht	495 Gramm
	Propeller	Durchmesser: 12 cm Kunststoff nicht faltbar
	Erreichte Geschwindigkeit	4,7 m/s

Bei diesem Test wurde eine Beschleunigung von fast 2 g am Kopfmodell gemessen. Die Propeller richteten leichte Kratzverletzungen an. Die trotz hoher Geschwindigkeit und hohem Abfluggewicht gering ausgefallene Aufprallenergie lässt sich durch die Ausführung der Drohne sowie die Form des Gestells erklären: Aufgrund der weichen runden Kanten ist die Drohne beim Test vom Aufprallobjekt (Kopfmodell aus Gel sowie Kopfmodell aus Seife) abgerutscht. Somit wurde nur ein Teil der Energie auf das Aufprallobjekt übertragen.

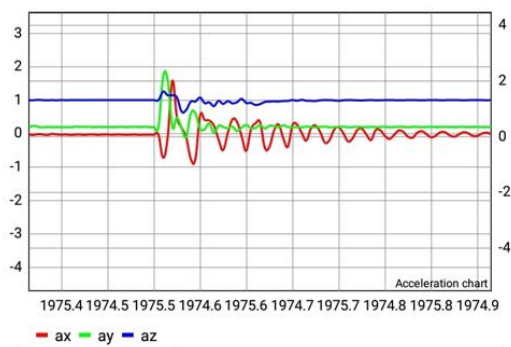



Abbildung 8: Test 6, bemessene Beschleunigung, Abfluggewicht 495 Gramm



Abbildung 9: Test 6, Propellerschäden am Kopfmodell

3.7. Test 7: Drohne mit Abfluggewicht von 563 Gramm

Eigenschaften der Drohne

	Modell	Kamera-Drohne
	Ausführung	Quadrocopter
	Spannbreite	36 cm
	Abfluggewicht	526 Gramm
	Propeller	Durchmesser: 19 cm Kunststoff faltbar
	Erreichte Geschwindigkeit	4,2 m/s

Im Fall von Test 7 wurde ein Aufprall mit einer Beschleunigung von über 4 g am Kopfmodell gemessen. Auch wenn der Wert höher als bei den vorherigen Tests ausfiel, war die Dauer von 10 Millisekunden so gering, dass eine derartige Kollision mit einem Menschen weder stumpfe Verletzungen noch eine Gehirnerschütterung verursachen könnte. Jedoch hinterließ der Aufprall einen tiefen Abdruck an der Stirn des Kopfmodells. Dies deutet auf die Möglichkeit einer Hautdurchdringung hin. Aufgrund der großen Spannbreite haben die Propeller beim direkten Frontalcrash das Kopfmodell nicht erfasst.

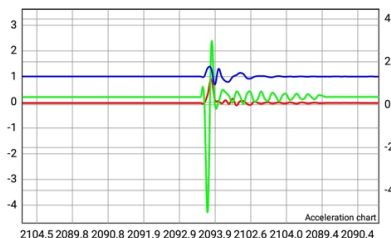


Abbildung 10: Beschleunigung Test 7, Abfluggewicht 526 Gramm

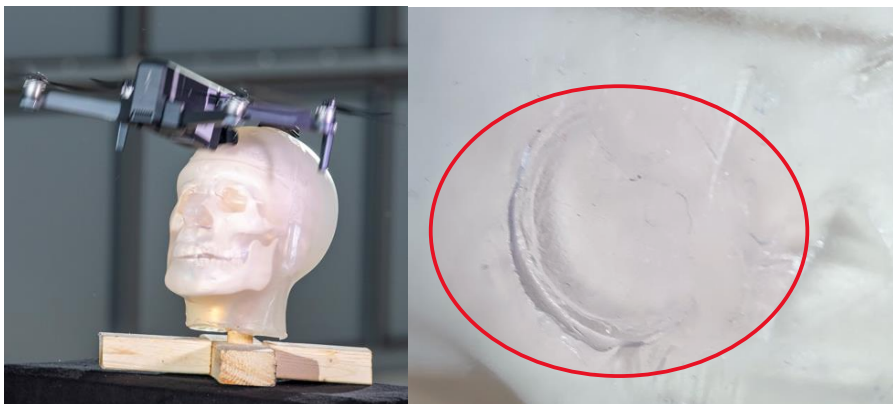
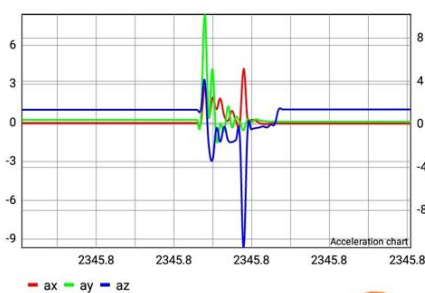


Abbildung 11: Test 7, Aufprall der Drohne (links) und angerichteter Schaden (rechts)

3.8. Test 8: Drohne mit Abfluggewicht von 554 Gramm

Eigenschaften der Drohne		
	Modell	Kamera-Drohne
	Ausführung	Quadrocopter
	Spannbreite	36 cm
	Abfluggewicht	554 Gramm
	Propeller	Durchmesser: 19 cm Kunststoff faltbar
	Erreichte Geschwindigkeit	5,6 m/s



Das im Test 8 eingesetzte Drohnenmodell besaß einen „Sportmodus“, anhand dessen die Drohne eine höhere Geschwindigkeit von 16 m/s (ca. 57 km/h) erreichen konnte. Beim Aufprall betrug die g -Kraft über 8 g (**Abbildung 12**, Achse ay – grün). Der starke Aufprall führte dazu, dass das Kopfmodell zu Boden geschleudert wurde (**Abbildung 13**). Aus den negativen Werten der Achse az – blau in **Abbildung 12** ist ersichtlich, dass das Kopfmodell beim Bodensturz einer Entschleunigung von mehr als 9 g ausgesetzt war.

Abbildung 12: Test 8, Beschleunigung, Abfluggewicht 554 Gramm



Abbildung 13: Ausschnitt aus der Hochgeschwindigkeitsaufnahme, Test 8, Kopfmodell aus Ballistik-Gel


Des Weiteren richtete die Drohne beim Aufprall auf das Seifen-Kopfmodell in Gegenüberstellung mit den vorigen Crashtests schwerwiegendere Verletzungen an. Ein direkter Aufprall auf das Kopfmodell führte zu einer signifikanten Verformung im Nasenbereich (**Abbildung 14**). Diese Verformung deutet sehr stark auf einen möglichen Nasenbruch hin.



Abbildung 14: *Test 8, Aufprall der Drohne, Auszug aus der Hochgeschwindigkeitsaufnahme (links) und angerichteter Schaden im Nasenbereich (rechts)*

Die Drohne selbst wurde beim Zusammenstoß so stark beschädigt, dass es zu einer internen Beschädigung der Elektronik (Kurzschluss) kam, gefolgt von einer kurzen Rauchentwicklung. Sowohl ein Kurzschluss als auch eine mechanische Beschädigung am Akku können zu einem Akkubrand führen. Akkubrände breiten sich sehr schnell aus, entwickeln sehr hohe Temperaturen und lösen eine äußerst starke Verrauchung aus. All dies kann zu indirekten Verletzungen bzw. Sachschäden in Folge eines Drohnenabsturzes führen.

3.9. Test 9: Drohne mit Abfluggewicht von 562 Gramm

Eigenschaften der Drohne		
	Modell	Kamera-Drohne
	Ausführung	Quadrocopter
	Spannbreite	35 cm
	Abfluggewicht	562 Gramm
	Propeller	Durchmesser: 21 cm Kunststoff faltbar
	Erreichte Geschwindigkeit	4,7 m/s

Die im Test 9 eingesetzte Drohne erreichte eine Geschwindigkeit von ca. 14 m/s und eine Beschleunigung von über 9 g beim Aufprall auf das Kopfmodell aus Ballistik-Gel. Dabei haben die Propeller tiefe Schnittverletzungen samt Hautdurchdringung an der Stirn verursacht (**Abbildung 17**).

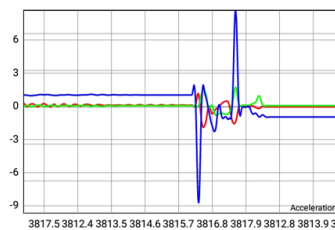


Abbildung 15: Test 9, Beschleunigung beim Aufprall

Abbildung 16: Test 9, Drohne beim Aufprall

Abbildung 17: Test 9, durch Propeller verursachte Schnittverletzung an der Stirn

3.10. Test 10: Drohne mit Abfluggewicht von 563 Gramm

Eigenschaften der Drohne		
	Modell	Kamera-Drohne
	Ausführung	Quadrocopter
	Spannbreite	36 cm
	Abfluggewicht	562 Gramm
	Propeller	Durchmesser: 19 cm Kunststoff faltbar
	Erreichte Geschwindigkeit	3,9 m/s

Die im Test 10 eingesetzte Drohne erreichte im Sportmodus eine Geschwindigkeit von ca. 18 m/s. Beim Aufprall auf das Kopf-Modell wurde eine Beschleunigung von über 10 g gemessen. Der Aufprall auf das Torso-Modell verursachte leichte Prellungen sowie leichte Schnittverletzungen.

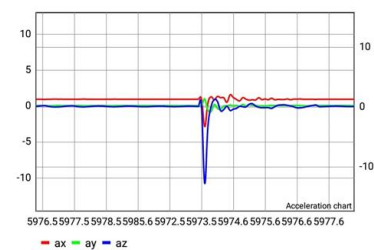



Abbildung 18: Test 10, Beschleunigung, Abfluggewicht 563 Gramm

Abbildung 19: Test 10, Drohne beim Aufprall auf das Seifen-Torsomodell

Abbildung 20: Test 10, Prellungen durch scharfe Kanten am Torsomodell

3.11. Test 11: Drohne mit Abfluggewicht von 600 Gramm

Eigenschaften der Drohne		
	Modell	Kamera-Drohne
	Ausführung	Quadrocopter
	Spannbreite	35 cm
	Abfluggewicht	600 Gramm
	Propeller	Durchmesser: 21 cm Kunststoff faltbar
	Erreichte Geschwindigkeit	5 m/s

Aufgrund eines automatischen Sicherheitsmodus und der eingebauten Objekterkennung erreichte die Drohne im Test 11 nur eine Geschwindigkeit von 5 m/s. Folglich war die durch den Aufprall verursachte Beschleunigung sehr gering. Nichtsdestotrotz verursachten die leistungsstarken Rotoren schwerwiegende Verletzungen. Im Zuge des Tests fügten die Propeller im Nacken nahe der Halsschlagader Schnittwunden mit einer Tiefe von ca. 1,5 cm zu. Hätten die Rotorblätter mit diesen Parametern tatsächlich einen Menschen getroffen, wären potenziell lebensbedrohliche Verletzungen die Folge gewesen (**Abbildung 21**).

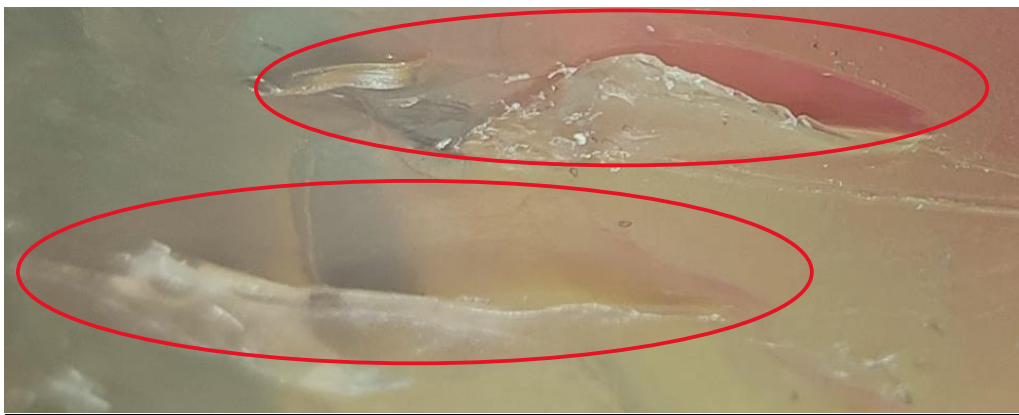


Abbildung 21: Test 11, Schnittwunden im Nackenbereich nahe der Halsschlagader

3.12. Test 12: Drohne mit Abfluggewicht von 1.337 Gramm

Eigenschaften der Drohne		
	Modell	Flugmodell
	Ausführung	Quadrocopter
	Spannbreite	53 cm
	Abfluggewicht	1.337 Gramm
	Propeller	Durchmesser: 24 cm Kunststoff nicht faltbar
	Erreichte Geschwindigkeit	7,2 m/s

Das Flugmodell in diesem Test besaß vier Rotoren und hatte ein Abfluggewicht von 1.337 Gramm, außerdem wurden 2212-920 KV Rotoren mit einer max. Schubkraft von 900 Gramm eingebaut. Dank der leistungsstarken Rotoren konnte das Gerät trotz eines Gewichts von über 1,3 kg eine Geschwindigkeit von ca. 14 m/s (ca. 50 km/h) erreichen. Dabei kam die Drohne während der Kollision mit dem Torsomodell auf eine Beschleunigung von ca. 7 g. Durch den starken Zusammenstoß brach ein Propellerblatt ab. Dadurch touchierte die scharfe Kante des Gestells unterhalb des Rotors die Oberfläche des Torsomodells und fügte ihm eine schwere Schnittverletzung zu (ca. 1 cm tief und 3 cm lang). Obwohl nicht lebensgefährlich, deutet dies auf eine schwere Verletzung hin, die gegebenenfalls einer medizinischen Versorgung bedürfte.

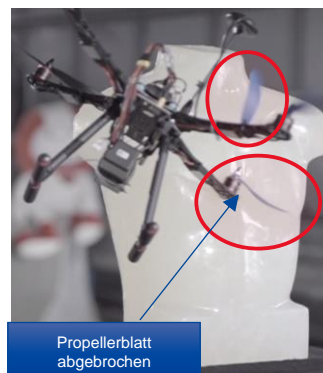
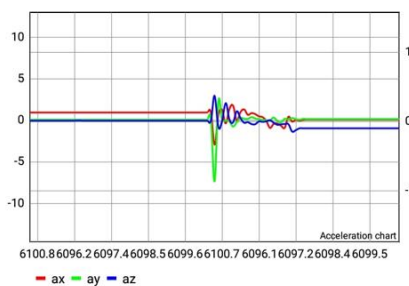



Abbildung 22: Test 12, Beschleunigungswerte beim Aufprall, Drohne mit Abfluggewicht von 1.337 Gramm

Abbildung 23: Test 12, Drohne beim Aufprall auf das Seifen-Torsomodell

Abbildung 24: Test 12, angerichtete Schnittverletzungen

3.13. Test 13: Drohne mit Abfluggewicht von 1.751 Gramm

Eigenschaften der Drohne		
	Modell	Flugmodell
	Ausführung	Hexacopter
	Spannbreite	60 cm
	Abfluggewicht	1.751 Gramm
	Propeller	Durchmesser: 24 cm Carbon nicht faltbar
	Erreichte Geschwindigkeit	9,1 m/s

Für Test 13 wurde ein Flugmodell mit 6 Rotoren und einem Abfluggewicht von über 1,7 kg herangezogen, welches mit denselben leistungsstarken Rotoren wie das vorige Modell ausgestattet war. Weiters kamen in diesem Testversuch Propellerblätter aus Carbon zur Anwendung, die eine sehr hohe Festigkeit aufwiesen. Im Zuge dieses Tests kam es zu beachtlichen Beschleunigungswerten von ca. 11 g, die am Torsomodell gemessen wurden. Zudem wirkte der Aufprall über eine längere Zeit (ca. 40 ms), was zu einer stärkeren Wirkung der Aufprallkraft führte. Zusätzlich zu den stumpfen Verletzungen, die durch den heftigen Zusammenstoß verursacht wurden, drang eines der Propellerblätter ca. 8 cm tief ins Gewebe ein. Das Resultat deutet an dieser Stelle auf eine mögliche Punktierung der Lunge hin.

Es muss ferner erwähnt werden, dass der starke Aufprall das 35 kg schwere Torsomodell zu Boden schleuderte. Ein Bodensturz kann schließlich zu weiteren Verletzungen wie etwa einer Gehirnerschütterung führen.

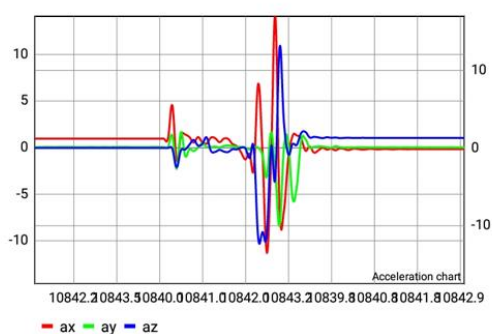


Abbildung 25: Test 13, Beschleunigungswerte beim Aufprall

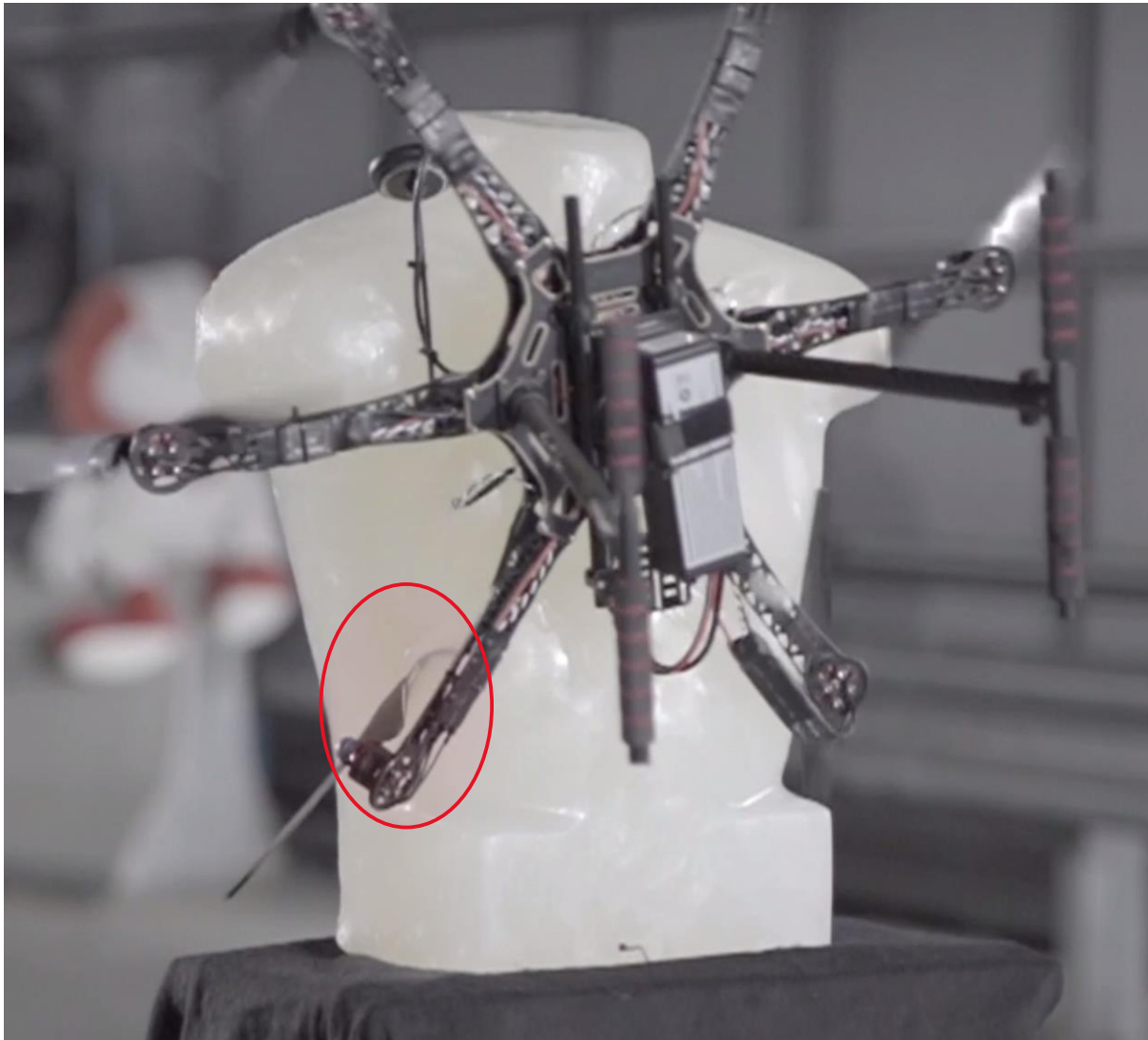


Abbildung 26: Test 13, ein Propellerblatt durchdringt die Lunge



Abbildung 27: Test 13, Schnittverletzungen durch Propeller (links) und Schnittverletzungen durch scharfe Kante (rechts)



Abbildung 28: *Test 13, das Torsomodell wird zu Boden geschleudert*

3.14. Test 14: Handverletzungen durch Propeller

Bei diesem Test kam ein Flugmodell zum Einsatz, das mit Carbon-Propellern ausgestattet war. Als Simulanzmedium diente ein Handmodell aus Ballistik-Seife mit eingelegten Hühnerknochen, um mögliche Handverletzungen darstellen zu können. Im Versuch wurden sehr tiefe Schnittverletzungen erzeugt. Aufgrund der Festigkeit des Handmodells wurden zwar keine Knochen gebrochen, jedoch kann eine derartige Verletzung in der Realität nicht ausgeschlossen werden. Des Weiteren wurde festgestellt, dass im Gegensatz zu festen Propellerblättern faltbare Propeller deutlich leichtere Verletzungen verursachen.



Abbildung 29: Test 14, Handverletzungen durch Carbon-Propeller

4. Conclusio

Die auf den vorangegangenen Seiten dargestellten Drohnen-Crashtests haben gezeigt, dass es **bei unsachgemäßer Handhabung mit jeder Drohne zu Verletzungen kommen kann**. Ob es sich dabei um kleine Kratzer oder eine lebensgefährliche Verletzung handelt, hängt von Gewicht und Aufprallgeschwindigkeit der Drohne ab. Selbst bei einer geringen Geschwindigkeit geht von **hochdrehenden Propellern und scharfen Kanten** am Gestell eine Gefahr aus. Empfindliche Organe und Körperteile wie etwa **Augen, Ohren, Gesicht und Finger sind besonders gefährdet**. Sogar eine kleine Drohne mit einem Gewicht von 80 Gramm und einer Geschwindigkeit von ca. 11 km/h verursachte im Versuch Gesichtsverletzungen. Bei Drohnen ab 250 Gramm waren die Verletzungen schwerwiegender: **von gebrochenen Nasen und Fingern bis hin zu einer punktierten Lunge**. Allerdings wurde in keinem der Testversuche die für eine Gehirnerschütterung notwendige Aufprallenergie erreicht.

Das größte Gefahrenpotenzial in der Handhabung von Drohnen stellen die Propeller dar: Selbst in den Tests mit kleineren Drohnen verursachten die Propeller sowie die scharfen Kanten des Gestells Verletzungen an den Simulanzmedien. **Eine zusätzliche Gefahr geht von der Elektronik der Drohne aus:** Beim Aufprall können elektronische Komponenten beschädigt werden, was einen Kurzschluss und in der Folge einen Schaden am Akku auslösen kann. Sowohl mechanische Beschädigungen als auch Kurzschlüsse am Akku können zu einem Akkubrand führen.

Anhand der Tests ließ sich eine wichtige Schlussfolgerung ziehen: Für einen sicheren Betrieb kommt es **weniger auf die Technik, sondern primär auf die Fähigkeiten und das Verhalten des Drohnenlenkers** an. Unabhängig von der Größe der Drohne ist somit ein wesentlicher Faktor für das Unfallrisiko und daher stets von zentraler Bedeutung jene Person, die die Drohne lenkt. Wer fundierte Kenntnisse und Erfahrung im Umgang mit Drohnen hat, kann die Drohne wesentlich kontrollierter steuern und somit auch die Unfallgefahr deutlich reduzieren. **Mit der EU-Drohnenverordnung, die seit Ende 2020 in Kraft ist**, wurden in dieser Hinsicht wichtige Regelungen geschaffen, welche klare und gute Rahmenbedingungen für den verantwortungsvollen Umgang mit Drohnen bieten.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: In den Crashtests eingesetzte Kopf, Torso- und Handmodelle	8
Abbildung 2: Wayne State Tolerance Curve (WTCS), Quelle: DMM Disease Models & Mechanisms, Nov. 2013	10
Abbildung 3: Beschleunigung Test 1, Abfluggewicht: 38 Gramm	11
Abbildung 4: Test 1, Verletzungen im Augenbereich	11
Abbildung 5: Test 2, Verletzungen im Gesicht	12
Abbildung 6: Test 3, Drohne beim Aufprall (links) und Verletzungen im Mundbereich (rechts) .	13
Abbildung 7: Beschleunigung Test 5, Abfluggewicht 356 Gramm, gemessen am Kopfmodell ..	15
Abbildung 8: Test 6, bemessene Beschleunigung, Abfluggewicht 495 Gramm	16
Abbildung 9: Test 6, Propellerschäden am Kopfmodell	16
Abbildung 10: Beschleunigung Test 7, Abfluggewicht 526 Gramm	17
Abbildung 11: Test 7, Aufprall der Drohne (links) und angerichteter Schaden (rechts).....	17
Abbildung 12: Test 8, Beschleunigung, Abfluggewicht 554 Gramm	18
Abbildung 13: Ausschnitt aus der Hochgeschwindigkeitsaufnahme, Test 8, Kopfmodell aus Ballistik-Gel	18
Abbildung 14: Test 8, Aufprall der Drohne, Auszug aus der Hochgeschwindigkeitsaufnahme (links) und angerichteter Schaden im Nasenbereich (rechts)	19
Abbildung 15: Test 9, Beschleunigung beim Aufprall	20
Abbildung 16: Test 9, Drohne beim Aufprall	20
Abbildung 17: Test 9, durch Propeller verursachte Schnittverletzung an der Stirn	20
Abbildung 18: Test 10, Beschleunigung, Abfluggewicht 563 Gramm	21
Abbildung 19: Test 10, Drohne beim Aufprall auf das Seifen-Torsomodell	21
Abbildung 20: Test 10, Prellungen durch scharfe Kanten am Torsomodell	21
Abbildung 21: Test 11, Schnittwunden im Nackenbereich nahe der Halsschlagader	22
Abbildung 22: Test 12, Beschleunigungswerte beim Aufprall, Drohne mit Abfluggewicht von 1.337 Gramm	23
Abbildung 23: Test 12, Drohne beim Aufprall auf das Seifen-Torsomodell	23
Abbildung 24: Test 12, angerichtete Schnittverletzungen	23
Abbildung 25: Test 13, Beschleunigungswerte beim Aufprall	24
Abbildung 26: Test 13, ein Propellerblatt durchdringt die Lunge	25
Abbildung 27: Test 13, Schnittverletzungen durch Propeller	25
Abbildung 28: Test 13, das Torsomodell wird zu Boden geschleudert	26
Abbildung 29: Test 14, Handverletzungen durch Carbon-Propeller.....	27

Literaturverzeichnis

Civil Aviation Safety Authority / Monash University. (2013). *Human injury model for small unmanned aircraft impacts*. Melbourne: Monash University. Abgerufen am 10. November 2021

Panenka, W., Cheng, W., Good, C., Namjoshi, D., Richards, D., Cripton, P., & Wellington, C. (November 2013). Towards clinical management of traumatic brain injury: A review of models and mechanisms from a biomechanical perspective. *DMM Disease Models & Mechanics*, 6(6). Abgerufen am 10. November 2021 von <https://journals.biologists.com/dmm/article/6/6/1325/3460/Towards-clinical-management-of-traumatic-brain>

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Subkategorien der Kategorie "offen" laut der Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge..... 7

Tabelle 2: Liste der im Test eingesetzten Drohnen samt Eigenschaften 8



KFV (Kuratorium für Verkehrssicherheit)

Schleiergasse 18

1100 Wien

T +43-(0)5 77 0 77-DW oder -0

F +43-(0)5 77 0 77-1186

E-Mail kfv@kfv.at

www.kfv.at

Medieninhaber und Herausgeber: Kuratorium für Verkehrssicherheit

Verlagsort: Wien

Herstellung: Eigendruck

Fotos: KFV / Matthias Fischer / Digital Pictures

Copyright: © Kuratorium für Verkehrssicherheit, Wien. Alle Rechte vorbehalten.

SAFETY FIRST!