



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle SUST
Service suisse d'enquête de sécurité SESE
Servizio d'inchiesta svizzero sulla sicurezza SISl
Swiss Transportation Safety Investigation Board STSB

Schlussbericht Nr. 2390 der Schweizerischen Sicherheitsuntersuchungsstelle SUST

über den Unfall der Drohne
Matternet M2 V9, SUI-9903,

vom 9. Mai 2019

Ob der Hueb, Kreis 6, Stadt Zürich

Allgemeine Hinweise zu diesem Bericht

Dieser Bericht enthält die Schlussfolgerungen der Schweizerischen Sicherheitsuntersuchungsstelle (SUST) über die Umstände und Ursachen des vorliegend untersuchten Unfalls.

Gemäss Artikel 3.1 der 12. Ausgabe des Anhangs 13, gültig ab 5. November 2020 zum Abkommen über die internationale Zivilluftfahrt vom 7. Dezember 1944 sowie Artikel 24 des Bundesgesetzes über die Luftfahrt (LFG; SR 748.0) vom 21. Dezember 1948 (Stand am 1. Mai 2022) ist der alleinige Zweck der Untersuchung eines Flugunfalls oder eines schweren Vorfalls die Verhütung von Unfällen oder schweren Vorfällen. Die rechtliche Würdigung der Umstände und Ursachen von Flugunfällen und schweren Vorfällen ist ausdrücklich nicht Gegenstand der Sicherheitsuntersuchung. Es ist daher auch nicht Zweck dieses Berichts, ein Verschulden festzustellen oder Haftungsfragen zu klären.

Wird dieser Bericht zu anderen Zwecken als zur Unfallverhütung verwendet, ist diesem Umstand gebührend Rechnung zu tragen.

Die deutsche Fassung dieses Berichts ist das Original und daher massgebend.

Alle Angaben beziehen sich, soweit nicht anders vermerkt, auf den Zeitpunkt des Unfalls.

Alle in diesem Bericht erwähnten Zeiten sind, soweit nicht anders vermerkt, in der für das Gebiet der Schweiz gültigen Normalzeit (*Local Time* – LT) angegeben, die zum Unfallzeitpunkt der mitteleuropäischen Sommerzeit (MESZ) entsprach. Die Beziehung zwischen LT, MESZ und koordinierter Weltzeit (*Coordinated Universal Time* – UTC) lautet:

LT = MESZ = UTC + 2 h.

Zusammenfassung

Luftfahrzeug	Matternet M2 V9	SUI-9903		
Halter	Matternet Inc., 3511 EdisonWay, Menlo Park, CA 94025 USA			
Eigentümer	Matternet Inc., 3511 EdisonWay, Menlo Park, CA 94025 USA			
Drohnenpilot	Amerikanischer Staatsangehöriger, Jahrgang 1985			
Ausweis	Zum Zeitpunkt des Ereignisses konnten für diese Art von unbemannten Luftfahrzeugen keine offiziellen Ausweise erworben werden. Es fand eine Ausbildung durch den Halter statt.			
Flugstunden	insgesamt	549:51 h während der letzten 90 Tage 9:16 h		
	auf dem Vorfalldmuster	9:16 h während der letzten 90 Tage 9:16 h		
Ort	Ob der Hueb, Kreis 6 der Stadt Zürich			
Koordinaten	249 909 / 684 218 (<i>Swiss Grid</i> 1903) N 47° 23' 41" E 008° 33' 15" (WGS ¹ 84)	Höhe 555 m/M		
Datum und Zeit	9. Mai 2019, 10:39 Uhr			
Betriebsart	Gewerbsmässig ²			
Flugregeln	Nicht zutreffend			
Startort	Universität Zürich (UZH) Irchel, Zürich Oberstrass			
Zielort	Universitätsspital Zürich (USZ), Zürich Fluntern			
Flugphase	Reiseflug			
Unfallart	Absturz nach Fehlfunktion			
Personenschaden				
Verletzungen	Besatzungsmit- glieder	Passagiere	Gesamtzahl der Insassen	Drittpersonen
Tödlich	0	0	0	0
Erheblich	0	0	0	0
Leicht	0	0	0	0
Keine	0	0	0	Nicht zutreffend
Gesamthaft	0	0	0	0
Schaden am Luftfahrzeug	Zerstört			
Drittschaden	Keiner			

¹ WGS: *World Geodetic System*, geodätisches Referenzsystem: Der Standard WGS 84 wurde durch Beschluss der internationalen Zivilluftfahrtorganisation (*International Civil Aviation Organization* – ICAO) im Jahr 1989 für die Luftfahrt übernommen.

² Im Rahmen der erforderlichen Betriebsbewilligung unterscheidet das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) nicht zwischen gewerbsmässigen respektive nicht-gewerbsmässigen oder wissenschaftlichen Drohnenbetreibern.

1 Sachverhalt

1.1 Vorgeschichte und Flugverlauf

1.1.1 Allgemeines

Die Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle (SUST) ist gemäss Art. 2 der Verordnung (EU) 996/2010 in Verbindung mit Artikel 3 lit. b der Verordnung über die Sicherheitsuntersuchung von Zwischenfällen im Verkehrswesen (VSZV) grundsätzlich auch für die Untersuchung von Unfällen und schweren Vorfällen unbemannter Luftfahrzeuge zuständig. Die Drohnentechnologie beziehungsweise der Einsatz unbemannter Luftfahrzeuge gewinnt zusehends an Bedeutung und wird sich in naher Zukunft voraussichtlich zu einem wichtigen Zweig der Luftfahrt entwickeln.

Aus den Vorabklärungen zum vorliegenden Zwischenfall erkannte die SUST ein wesentliches Präventionspotential, so dass gestützt auf Art. 20 Abs. 4 VSZV eine Untersuchung eröffnet wurde. Zudem waren durch den Absturz Drittpersonen am Boden gefährdet.

1.1.2 Vorgeschichte

Es handelte sich um einen Einsatz im Auftrag der Schweizerischen Post, bei dem auf dem Hinflug zur Universität Zürich (UZH) Irchel Blutproben transportiert worden waren. Der Unfall ereignete sich auf dem Rückflug, ohne Beladung, zum Universitätsspital Zürich (USZ), Fluntern. Die Post war Auftraggeberin und Serviceanbieterin und kaufte sich die Dienstleistung bei der Firma Matternet ein, die als Halterin und Betreiberin der Drohne fungierte.

1.1.3 Flugverlauf

Rund eine Minute nach dem Start bei der Universität Zürich (UZH) Irchel löste die Drohne automatisch das Flugabbruchsystem (*Flight Termination System* – FTS) aus und leitete einen Notabstieg mit Fallschirm ein. Nach dem Ausstossen des Fallschirms riss die Verbindungsleine, und die Drohne schlug ungebremst in der Nähe von spielenden Kindern auf den Waldboden auf (vgl. Abbildung 1). Die Drohne wurde beim Aufprall zerstört; verletzt wurde niemand.

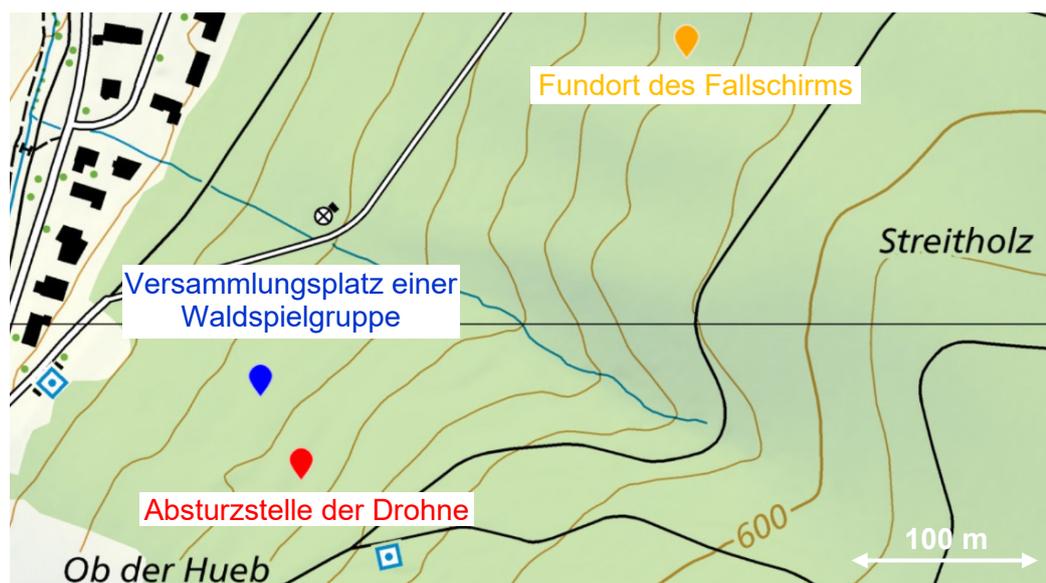


Abbildung 1: Absturzstelle der Drohne (rote Boje) im Waldstück «Ob der Hueb», rund 500 m südöstlich der Universität Zürich (UZH) Irchel, unweit von spielenden Kindern im Wald (blaue Boje). Der Fallschirm (orange Boje) wurde rund 330 m nordöstlich davon in den Bäumen geborgen. Quelle der Karte: Bundesamt für Landestopografie.

Weder die Kinder noch die beiden Kindergärtnerinnen, die den Absturz der Drohne in rund 50 Meter von der Absturzstelle (vgl. Abbildung 1) entfernt beobachteten, konnten ein akustisches Warnsignal wahrnehmen.

1.2 Angaben zum Luftfahrzeug

1.2.1 Allgemeine Angaben

Eintragungszeichen	SUI-9903
Luftfahrzeugmuster	Matternet M2 V9
Charakteristik	Drohne
Hersteller	Matternet Inc., 3511 EdisonWay, Menlo Park, CA 94025 USA
Halter/Eigentümer	Matternet Inc., 3511 EdisonWay, Menlo Park, CA 94025 USA
Baujahr	2018
Werknummer	M2-0033
Antrieb	Quadrocopter ³ mit vier elektrischen Motoren vom Typ XRotor PRO 6215 180KV Propeller Mejzlik 24"
Energiequelle	Lithium-Ionen-Batterie (Flugakkumulator) mit einer Kapazität von 756 Wh
Maximales Abfluggewicht	13.2 kg
Maximale Nutzlast	2 kg
Empfohlene Reisegeschwindigkeit für die automatische Steuerung (Autopilot)	16 m/s (entsprechend 58 km/h)
Zulässige Höchstfluggeschwindigkeit	30 m/s (entsprechend 108 km/h)
Maximale Windkomponente	8 m/s (Böen 12 m/s)
Maximale Reichweite (windstill)	20 km bei einer Nutzlast von 1 kg 15 km bei einer Nutzlast von 2 kg
Kommunikation	GSM ⁴ -Netzwerk
Zulassungsbereich	Bei Tag und Nacht
Relevante Ausrüstung zur Vermeidung von Kollisionen	Kollisionswarngerät Flarm ⁵ , Antikollisionslichter

1.2.2 Angaben zum Flugabbruchsystem

Die Drohne war mit einem autonomen Flugabbruchsystem (*Flight Termination System* – FTS) ausgestattet, das bei Bedarf das Auswerfen des Fallschirms auslöst (vgl. Abbildung 2). Dabei wird ein Schmelzdraht, der den vorgespannten FTS-

³ Ein Quadrocopter (auch Quadcopter) besitzt vier in einer Ebene angeordnete, senkrecht nach unten wirkende Rotoren oder Propeller, um Auftrieb bzw. Vortrieb zu erzeugen.

⁴ GSM: *Global System for Mobile communication*, globaler Mobilfunkstandard für Mobilfunknetze

⁵ Ein Verkehrsinformations- und Kollisionsvermeidungssystem, das in der Regel im Bereich der allgemeinen Luftfahrt insbesondere in Leicht- und Segelflugzeugen Anwendung findet.

Fallschirm in seinem Behälter innerhalb der Drohne sichert, zum Schmelzen gebracht. In der Folge werden die Motoren gestoppt. Bei vollständig geöffnetem Fallschirm sinkt gemäss Herstellerangaben die Drohne mit einer Vertikalgeschwindigkeit von 3 bis 5 m/s. Gemäss Hersteller liegt die Aufprallenergie der zu Boden gleitenden, maximal beladenen Drohne bei höchstens 156 J. Dabei ertönt ein elektrisch generiertes Warnsignal, um Drittpersonen am Boden zu warnen.



Abbildung 2: Bildsequenz des Fallschirmauswurfs bei einem Test des autonomen Flugabbruchsystems (*Flight Termination System* – FTS). Es befinden sich keine Aufkleber als Gefahren- und Warnhinweise für Ersthelfer auf der Drohne (Quelle: Matternet).

1.2.3 Steuerung der Drohne

Die Drohne war mit einem Flugregler (*flightcontroller*) vom Typ Pixhawk Cube Black 2.1 des Herstellers ProfiCNC bestückt, an dem zur Positionsbestimmung zwei redundante GNSS⁶-Module inklusive Magnetometer als Kompass angeschlossen waren.

Auf dem Pixhawk Cube wurde als Firmware⁷ ArduCopter genutzt. Diese Software steht mit offenem Quellcode (Open Source⁸) zur Verfügung, so dass man auch eigene Modifikationen daran vornehmen kann. Auf der verunglückten Drohne kam im Mai 2019 eine auf Basis ArduCopter 3.5.0-rc5 (Stand Mai 2017) von Matternet modifizierte Software-Version zum Einsatz; die Matternet eigene Versionsnummer dieser Modifikation lautete mtrr-0.4.24. Demgegenüber stand im Januar 2019 die frühere Version mtrr-0.4.20 im Einsatz.

Die Steuerung der Flugführung entlang mehrerer Wegpunkte erfolgte über ein am Flugregler angeschlossenes, von Matternet programmiertes System zur Navigation, das die Steuerkommandos zum Abfliegen der anzusteuern den Wegpunkte im geführten Betrieb (*guided mode*) an den Flugregler übergab.

Zur Stabilisierung und Steuerung der Fluglage enthielt der Pixhawk Cube drei redundante Trägheitsmesseinheiten (*Inertial Measurement Units* – IMU) unterschiedlicher Bauart, die mit Beschleunigungs- (*accelerometer*) und Drehratensensoren (*gyroscope*) sowie zwei davon mit Kompassen (*magnetometer*) ausgestattet waren. Zur barometrischen Höhensteuerung befanden sich im Pixhawk Cube zwei Drucksensoren.

Die ArduCopter-Software überführt die Rohdaten der IMU-Sensoren, der GNSS-Module und deren Magnetometer sowie der Barometer in die Systemparameter für Position, Lage, Orientierung und Bewegungsvektoren. Diese werden iterativ aus den teilweise noch fehlerbehafteten Sensordaten mit Hilfe mathematischer Verfahren wie z.B. «Glättung» und erweiterter Kalman-Filter (EKF) abgeleitet.

⁶ GNSS: *Global Navigation Satellite System*, Globales Satellitennavigationssystem als Sammelbegriff für Satellitensysteme wie *Global Positioning System* (GPS), *Global Navigation Satellite System* (GLONASS) oder das chinesische Satellitennavigationssystem BeiDou.

⁷ Als Firmware wird die in elektronischen Geräten fest (engl. *firm*) eingebettete Software bezeichnet, die dort grundlegende Funktionen leistet.

⁸ GNU General Public License Version 3 (<https://github.com/ArduPilot/ardupilot/blob/master/COPYING.txt> – zuletzt besucht am 06.06.2023)

Die Daten der redundanten Sensoren werden hierbei in mehreren Rechenprozessen (EKF-Lanes) «quasi-parallel»⁹ zueinander verarbeitet. Eine der Lanes bekommt Priorität, d.h. ihre Ergebnisse werden für die eigentliche Flugsteuerung verwendet. Falls die Daten dieser priorisierten Lane nicht mehr als genügend vertrauenswürdig eingestuft werden, weil beispielsweise einer der in die EKF-Berechnungen einbezogenen Sensoren ausgefallen ist oder unplausible Daten liefert, wird automatisch auf eine andere Lane umgeschaltet.

Ausserdem werden fortwährend EKF-Varianzen ermittelt, die sich aus der Abweichung der Ergebnisse der EKF-Lanes untereinander ergibt. Überschreiten diese EKF-Varianzen einen Grenzwert, kann bei Bedarf eine konfigurierbare Aktion ausgelöst werden. Bei der Matternet-Drohne war hieran das Flugabbruchsystem gekoppelt (vgl. Kapitel 1.2.2).

Der Softwarestand der verunglückten Drohne ermöglichte nur die parallele Berechnung von zwei EKF-Lanes, wodurch kein falsches Signal isoliert werden kann, wie es bei drei parallelen Lanes möglich wäre. Dies erlauben erst neuere Softwarestände der ArduCopter Software.

Über einen Parameter, der als «EK2_IMU_MASK» bezeichnet ist, wird in der Konfiguration des Flugreglers die Zuordnung der drei IMU softwaremässig festgelegt, nämlich welche der drei IMU in die Berechnungen für die beiden Lanes einbezogen werden.

Üblicherweise werden in der Praxis die Daten der beiden vibrationsärmeren IMU genutzt, sodass die Vibrationen einer Drohne im Flug einen möglichst geringen Einfluss haben. Als Standardwert für den Parameter ist initial zunächst der Wert 3 vorkonfiguriert¹⁰. Bei Drohnen üblicher Bauart wird damit, solange beide IMU korrekt arbeiten, die EKF-Varianz geringgehalten.

Laut Angaben des Herstellers Matternet blieb die Hardware bezüglich der Drohnensteuerung zwischen den Flügen im Januar 2019 und dem Unfallflug vom 9. Mai 2019 unverändert.

1.2.4 Service Bulletin

Im *Service Bulletin* (SB) 0000002¹¹, das Mitte April 2019 im Diskussionsforum des Herstellers des Flugreglers publiziert wurde, adressierte dieser Probleme im Zusammenhang mit den von den IMU gelieferten Daten und deren Weiterverarbeitung in den EKF-Lanes. Seit dem 2. Mai 2019 empfahl der Hersteller unter anderem, den Parameter «EK2_IMU_MASK» auf den Wert 7 zu setzen. Hierdurch sollte sichergestellt sein, dass alle drei IMU in die Berechnungen einbezogen und auch drei parallele Lanes zur Isolierung eines fehlerbehafteten Signals ermöglicht werden. Seit ArduCopter Version 3.6.12 stellte eine daraufhin optimierte *Failover*-Logik¹² sicher, dass fehlerhafte IMU-Daten bestmöglich erkannt werden und entsprechend zwischen den EKF-Lanes umpriorisiert wird.

Auf Nachfrage erklärte der Hersteller Matternet, dass der in der SUI-9903 verbaute Flugregler im letzten Quartal 2018 erworben worden war. Damit fällt er nicht in den Zeitraum des *Service Bulletin* SB 0000002, das im April 2019 von dessen Hersteller veröffentlicht wurde.

⁹ Die *Central Processing Unit* (CPU) des Pixhawk Cube Black unterstützt kein echtes Multiprocessing.

¹⁰ Es handelt sich dabei um Werte, die in eine binäre Bitmaske aufgelöst werden, z. B. 3 \equiv 110, 5 \equiv 101, 7 \equiv 111.

¹¹ SB-0000002: [Safety/Service Bulletins - CubePilot](#) – zuletzt besucht am 06.06.2023)

¹² Eine *Failover*-Logik steuert das Umschalten zwischen mehreren redundanten Systemen bzw. bei Sensoren die Nutzung, welchen der von den Sensoren gelieferten Daten Vorrang eingeräumt wird.

Zwischenzeitlich schreibt der Hersteller vor, dass "All Copter users to be on at least ArduCopter 4.x and SB2 parameters, regardless of cube age." (vgl. <https://discuss.cubepilot.org/c/MSB/16>). Dies bedeutet, dass in der Zwischenzeit nicht nur Flugregler aus dem anfangs vom SB 000002 adressierten Zeitraum gemäss den Hinweisen konfiguriert und deren Software aktualisiert werden sollen, sondern dass mittlerweile generell alle Pixhawk Cubes mindestens auf ArduCopter 4.x aufdatiert und die Parameter entsprechend angepasst werden sollen.

1.2.5 Betrieb und Überwachung

Jeder Flug der Drohne wird von einem Missionsleiter (*Flight Director* – FD) anhand von GPS-Daten überwacht, die über eine GSM-Verbindung zum Server des Betreibers geleitet werden (*streaming*). Im Weiteren stehen ihm nebst diversen meteorologischen Angaben auch Informationen zum umgebenden Luftverkehr zur Verfügung.

In allfälligen Konfliktsituationen hat der FD die Möglichkeit, mit folgenden Befehlen in den Flugverlauf einzugreifen:

- *land*: Die Drohne wird an Ort und Stelle gelandet;
- *hold*: Die Drohne schwebt an Ort und Stelle;
- *resume*: Die Drohne setzt die Mission fort;
- *return*: Die Drohne kehrt zum Ausgangsort zurück.

Eine manuelle Steuerung der Drohne jenseits der Sichtlinie (*Beyond Visual Line of Sight* – BVLOS) ist nicht möglich, sondern nur bei allfälligen Start- und Landeproblemen durch den Drohnenpiloten (*operator*) vorgesehen. Diese durchlaufen beim Drohnenbetreiber eine interne Schulung, wobei Erfahrung aus dem Drohnenbetrieb im privaten Bereich vorausgesetzt wird. Weitere Angaben zu betrieblichen Aspekten finden sich im [Summarischen Bericht](#) über den Zwischenfall der weitgehend baugleichen Drohne SUI-9909 vom 25. Januar 2019.

1.3 Meteorologische Angaben

1.3.1 Allgemeine Wetterlage

Ein Tief mit Kern über der Nordsee bestimmte das Wetter in der Schweiz. An seinem Südrand erstreckte sich die Westwindzone vom Atlantik nach Mitteleuropa.

1.3.2 Wetter zum Zeitpunkt und in der Region des Unfalls

Das Wetter war trocken und windschwach.

Wetter	bewölkt und trocken
Wolken	1/8 – 2/8 auf 1000 ft AAE ¹³ LSZH 5/8 – 7/8 auf 7000 ft AAE LSZH
Sicht	50 km
Wind Flughafen Zürich (LSZH)	200 Grad, 4 kt variierend zwischen 160 und 240 Grad
Wind Hönningerberg, ETHZ ¹⁴	in Böen um 6 kt
Temperatur und Taupunkt Flughafen Zürich (LSZH)	10 °C / 6 °C

¹³ AAE: *Above Aerodrome Elevation*, über Flugplatzbezugshöhe

¹⁴ ETHZ: Eidgenössische Technische Hochschule der Stadt Zürich

Temperatur und Taupunkt Hönggerberg, ETHZ	8 °C / 4 °C
Luftdruck (QNH)	1003 hPa (Druck reduziert auf Meereshöhe, berechnet mit den Werten der ICAO ¹⁵ -Standardatmosphäre)
Gefahren	Keine

1.3.3 Astronomische Angaben

Sonnenstand	Azimut 118°	Höhe 45°
Beleuchtungsverhältnisse	Tag	

1.4 Angaben über das Wrack, den Aufprall und die Unfallstelle

Die Drohne wurde beim Aufprall auf den Waldboden weitestgehend zerstört (vgl. Abbildung 3). Ein Blatt eines Propellers wurde an der Unfallstelle nicht gefunden. Im Weiteren fanden sich keine Überreste der Verbindungsleine zum Notfallschirm an der Struktur der Drohne. Das akustische Warnsignal war an der Absturzstelle schwach hörbar.



Abbildung 3: Endlage der zerstörten Drohne SUI-9903 an der Absturzstelle

Der abgetrennte Fallschirm mit intakter Verbindung zur Verbindungsleine verfang sich rund 330 m nordöstlich der Absturzstelle zwischen zwei Bäumen (vgl. Abbildung 4).

¹⁵ ICAO: *International Civil Aviation Organization*



Abbildung 4: Fundort des von der Drohne getrennten Fallschirms

Die Verbindungsleine war an deren drohnenseitigen Ende durchtrennt und wies Schnitt- und Rissspuren auf (vgl. Abbildung 5).



Abbildung 5: Schnitt- und Rissstelle der Verbindungsleine

Die Befestigungsstelle an der Struktur der Drohne zeigte deutliche Deformationen (vgl. Abbildung 6).



Abbildung 6: Deutlich sichtbare Deformation der scharfkantigen Befestigungsstelle (roter Kreis) an der verunfallten Drohne SUI-9903 (links) sowie die intakte Befestigung der Verbindungsleine einer baugleichen Drohne (rechts).

1.5 Untersuchungen der Antriebseinheiten und des Flugabbruchsystems

Bei der spurenkundlichen Untersuchung des FTS-Auslösemechanismus sowie der Befestigung des Fallschirms durch das Forensische Institut Zürich wurde Folgendes festgestellt:

- Der Schmelzdraht, der den Fallschirm in seinem Behälter innerhalb der Drohne sichert, war durchgebrannt, wie es im Rahmen einer FTS-Aktivierung vorgesehen ist (vgl. Kapitel 1.2.2).
- Die drohnenseitige Befestigungsstelle des Fallschirms, bei dem es sich um einen Ausleger einer Antriebseinheit handelte, wies an der deformierten Stelle eine scharfe Kante auf (vgl. Abbildung 6).
- An der Verbindungsleine konnte eine Rissfraktur ausgemacht werden. Im Vergleich zu einem baugleichen Fallschirm fehlte das letzte Stück von etwa 4 cm, was dem Umfang des Auslegers der Drohne entsprach, an dem die Leine befestigt war. Dieses fehlende Stück der Verbindungsleine konnte nicht gefunden werden.
- Alle vier Motorenachsen waren freigängig und wiesen keine Unwucht oder kein Axialspiel auf.
- Einer der vier Propeller war unbeschädigt und wies keine Unwucht auf.
- Ein Propellerblatt wurde an der Unfallstelle nicht vorgefunden.
- Die vier Antriebseinheiten bestehend aus je einem Motor und Propeller sowie dem im entsprechenden Ausleger untergebrachten Regler unterlagen einem hohen Zerstörungsgrad, der sich dem Aufprall zuschreiben liess.

1.6 Aufzeichnungen

1.6.1 Allgemeines

Die von der verunglückten Drohne geborgene Speicherkarte enthielt Aufzeichnungen von insgesamt drei Flügen vom 9. Mai 2019:

- Ein kurzer Testflug frühmorgens an der Frauenklinikstrasse in Zürich, nahe des Universitätsspitals Zürich (USZ). Dieser erfolgte im Wesentlichen manuell gesteuert und schloss mit dem Abfliegen einiger im Bereich des Spitals gesetzter Wegpunkte ab. Die Geschwindigkeit über Grund betrug bei diesem Testflug nicht mehr als 8 m/s.
- Der Hinflug vom Universitätsspital Zürich (USZ) zur Universität Zürich (UZH) Irchel;
- Der Rückflug von der Universität Zürich (UZH) Irchel zum Universitätsspital Zürich (USZ), auf dem sich der Unfall ereignete.

Darüber hinaus fanden sich in einem Ordner "Trashes" diverse Logdateien vorheriger Testflüge, die in den USA im Zeitraum zwischen 24. Januar 2019 und dem 4. April 2019 durchgeführt worden waren (vgl. Kapitel 1.6.3).

1.6.2 Logdatei des Unfallfluges

Die Logdatei des Unfallfluges umfasste Aufzeichnungen von 10:03:33 Uhr bis 12:41:26 Uhr. In dieser Zeit wurden die Antriebe dreimal aktiviert; der konkrete Flug erfolgte in der Zeit zwischen 10:37:35 Uhr (Start) und 10:38:48 Uhr (Aufschlag). Die Kartendarstellung zeigt den absolvierten Teil des Fluges einschliesslich einiger Wegpunkte (vgl. Abbildung 7).

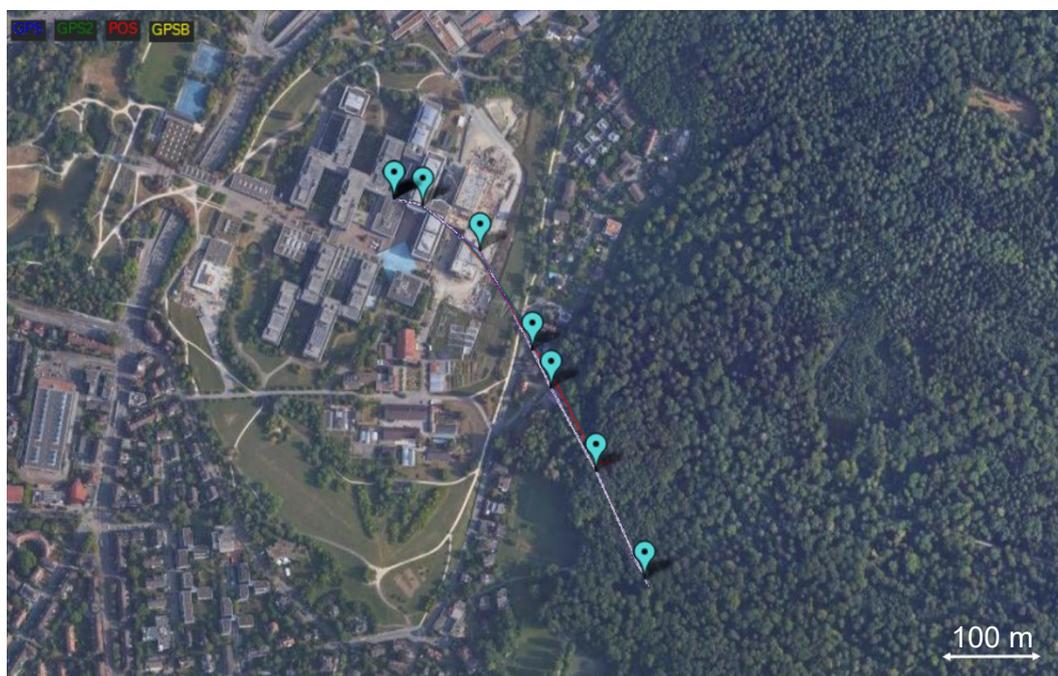


Abbildung 7: Kartendarstellung des Unfallfluges der SUI-9903 vom 9. Mai 2019 gemäss den Logdateien (Quelle: SUST)

Die Drohne stieg zunächst vertikal auf 92 m Höhe über dem Startpunkt auf und war dabei auf einem missweisenden Steuerkurs (*magnetic heading*) von anfänglich 302° ausgerichtet. Anschliessend nahm die Drohne bei fortgesetztem Aufstieg auch in horizontaler Richtung Fahrt auf und drehte sich dabei langsam in Richtung

des nächsten Wegpunktes. Um 10:38:22 Uhr erreichte sie eine Geschwindigkeit von 12.5 m/s über Grund.

Ab diesem Zeitpunkt wurden von allen drei IMU deutlich zunehmende Vibrationen aufgezeichnet, die zugehörigen Beschleunigungswerte lagen teilweise deutlich über 30 m/s^2 . Damit einhergehend beschleunigte und bremste die Drohne nun fortlaufend durch Variieren des Längsneigungswinkels (*pitch angle*), der immer wieder kurzzeitig den für diese Drohne definierten Maximalwert von -20° bis $+20^\circ$ überschritt. Dies führte zu heftigen Oszillationen der Fluglage, wobei die Geschwindigkeit der Drohne über Grund zwischen rund 13 m/s und Spitzenwerten von 17 m/s variierte.

Neben den von den *Inertial Measurement Units* (IMU) über die Beschleunigungssensoren ermittelten Vibrationen gab es ab 10:38:24 Uhr in allen drei Achsen auffällige Abweichungen zwischen den Daten der ersten beiden Einheiten (IMU1 und IMU2) und der IMU3; beispielhaft sind diejenigen entlang der Y-Achse dargestellt (vgl. Abbildung 8).

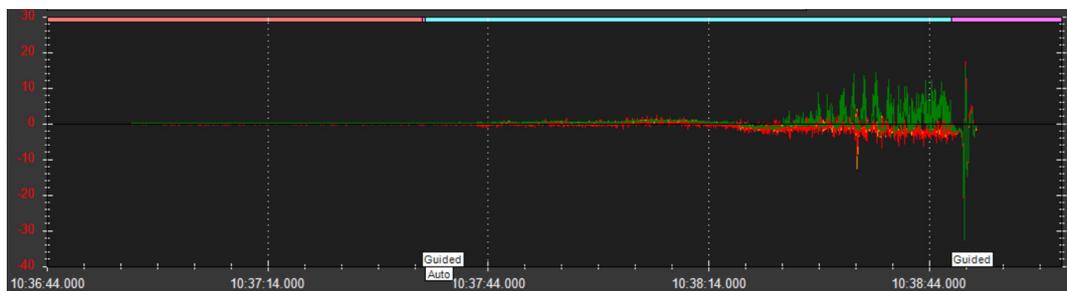


Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der Abweichungen von den dimensionslosen Werten der Beschleunigungssensoren (*accelerometer*) anhand der IMU1 (orange), IMU2 (rot) und IMU3 (grün).

Eine Detailansicht der Zeitbereiche von 10:38:21 bis 10:38:27 Uhr (vgl. Abbildung 9) bzw. von 10:38:31 bis 10:38:38 Uhr (vgl. Abbildung 10) zeigt deutlich, dass ab 10:38:24 Uhr abrupt starke Abweichungen in den Beschleunigungswerten der IMU3 auftraten, während IMU1 und IMU2 weiterhin ähnliche Beschleunigungswerte lieferten. Im weiteren zeitlichen Verlauf verstärkten sich diese Abweichungen in regelmässigen Zyklen.



Abbildung 9: Zeitlicher Ausschnitt (10:38:21 bis 10:38:27 Uhr) des Verlaufs der Abweichungen von den dimensionslosen Werten der Beschleunigungssensoren anhand der IMU1 (rot), IMU2 (grün) und IMU3 (blau) sowie die GPS-Geschwindigkeit (orange) in m/s.



Abbildung 10: Zeitlicher Ausschnitt (10:38:31 bis 10:38:38 Uhr) des Verlaufs der Abweichungen von den Werten der Beschleunigungssensoren anhand der IMU1 (rot), IMU2 (grün) und IMU3 (blau). Ab etwa 10:38:32 Uhr ist eine deutliche Oszillation (blaue Linie) mit einer Frequenz von rund $2/3$ Hz zu erkennen.

In Abweichung zum Standardwert 3 (vgl. Kapitel 1.2.3) war bei der verunglückten Drohne der Parameter «EK2_IMU_MASK» auf 5 gesetzt. Dies bedeutet, dass bei der Drohne die Daten der IMU1 und der IMU3¹⁶ für die Berechnungen der beiden EKF-Lanes herangezogen wurden.

Um 10:38:46 Uhr überschritten die Varianzen der in den EKF-Lanes parallel berechneten Werte eine kritische Grenze. In der Log-Datei wurde hier das Ereignis «EKFCHECK_BAD_VARIANCE» protokolliert, das ein Programm zur Fehlerbehandlung für die zu stark gewordenen Abweichungen auslöste. Hieran war beim vorliegenden Drohnenmuster das Flugabbruchsystem (*Flight Termination System* – FTS) gekoppelt (vgl. Kapitel 1.2.2). Die Drohne befand sich zu dem Zeitpunkt auf etwa 185 m Höhe über der Höhe des Startpunkts und aufgrund des in dem Bereich ansteigenden Höhenprofils rund 100 m über Grund. Mit der FTS-Auslösung wurden alle Motoren der vier Antriebseinheiten gestoppt. Der Aufschlag der Drohne wurde um 10:38:48 Uhr aufgezeichnet.

1.6.3 Hinflug und frühere Flüge

Ein Vergleich der Daten aus den Logdateien des Hinfluges sowie der früheren Testflüge vom 24. bis 26. Januar 2019, zeigte einige wesentliche Unterschiede zum Unfallflug vom 9. Mai 2021:

- Beim Unfallflug betrug die Stromaufnahme der Antriebseinheiten rund 30 A, als die starken Oszillationen auftraten. Im Verlauf des Hinfluges wurde eine deutlich höhere Leistung von den Antriebseinheiten abgefordert als beim Unfallflug, ohne dass es zu kritischen Vibrationen oder Oszillationen kam; die Stromaufnahme betrug dabei bis zu 40 A, wobei die Batterie-Spannung ein ähnliches Niveau hatte.
- Die Software-Version der Testflüge im Januar 2019 unterschied sich von der Software-Version des Fluges am 9. Mai 2019 (vgl. Kapitel 1.2.3).
- Trotz der deutlich höheren Fluggeschwindigkeit von bis zu 20 m/s blieben die aufgezeichneten Vibrationswerte während der Testflüge im Januar 2019 unter 30 m/s^2 . Die zugehörige Stromaufnahme der Motoren betrug rund 40 A und lag somit über den maximal erreichten Werten von 35 A während des Unfallflugs.

¹⁶ Die Nummerierung stützt sich auf die Daten aus den Logdateien; eine Zuordnung der physisch verbauten IMU-Einheiten, d.h. IMU1&2 gedämpft und IMU3 ungedämpft, ist anhand der Logdateien nicht möglich.

- Bei den damaligen Flügen ähnelten sich die Vibrationswerte der IMU1 und IMU3 weitgehend, während IMU2 deutlich abweichende Werte lieferte (vgl. Fussnote 16).
- Die Neigungswinkel der Drohne betrug vor Eintreten der Oszillationen zwischen 10° und 15°; der in der Konfiguration des Flugreglers gesetzte Maximalwert liegt bei von 20°.

1.6.4 Sensorik betreffend Umgebungsbedingungen

Der Flugakkumulator der Drohne verfügt über eine Temperatur- und Einzelzellen-Überwachung. In den Logdateien fanden sich jedoch keine Hinweise, dass diese Daten an den Flugregler und die Telemetrie weitergereicht werden. Nach Angaben von Matternet werden diese Daten von einem separaten System überwacht und aufgezeichnet.

1.7 Anforderungen an Fallschirm-Rettungssysteme

Seit September 2018 liegt unter der Bezeichnung F3322¹⁷ ein internationaler Standard vor, der das Design, die Herstellungs- und Testanforderungen für installierbare, auslösbare Fallschirm-Rettungssysteme (*Parachute Recovery System – PRS*) kleiner unbemannter Flugsysteme (*Small Unmanned Aircraft Systems – SUAS*) festlegt, um die Aufprallenergie des Systems zu verringern. Ferner soll die Einhaltung dieser Spezifikationen einen Antragsteller bei der Einholung der Genehmigung bei einer Zivilluftfahrtbehörde für den Überflug besiedelter Gebiete unterstützen.

Darin werden sowohl technische als auch betriebliche Anforderungen an die Fallschirm-Rettungssysteme aufgeführt, falls die kritische Anzahl ausgefallener Antriebseinheiten (*critical number motor failure*) erreicht wird. Unter anderem sollte nebst einem autonomen Auslösesystem auch eine manuelle Auslösevorrichtung verbaut sein.

Im Weiteren wird darin festgehalten, dass die Befestigungsleinen bei der Öffnung des Fallschirmgehäuses nicht eingeklemmt oder von Fehlstellen, Graten, scharfen Kanten beschädigt werden können. Ebenso müssen der Fallschirm, die Befestigungsleinen vor Abrieb während des Auswerfens geschützt sein und dürfen sich nicht verfangen, damit die Drohne am Fallschirm mit der festgelegten Sinkgeschwindigkeit absteigen kann.

Desgleichen wird das Anbringen von Aufklebern als Gefahren- und Warnhinweise für Ersthelfer einschliesslich Vorgaben hinsichtlich deren Grösse, Aufschrift und Positionierung auf der Drohne (vgl. Abbildung 11) festgelegt.

¹⁷ vgl. Publikation über die Standardspezifikationen für Fallschirm-Rettungssysteme kleiner unbemannter Flugsysteme («*Standard Specification for Small Unmanned Aircraft System (SUAS) Parachutes*», der *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, [ASTM-F3322-18](#)) – zuletzt besucht am 06.06.2023)



Abbildung 11: Beispiel eines Gefahren- und Warnhinweises für Ersthelfer (Quelle: F3322)

Die Sinkgeschwindigkeit einer am Fallschirm zu Boden gleitenden Drohne verhält sich proportional zur Wurzel ihrer Gesamtmasse, wie in der Standardspezifikation F3322 weiter ausgeführt wird. Hinsichtlich Grenzwerte zur Aufprallenergie, mit dem die Drohne am Fallschirm auf dem Boden auftreffen darf, verweist die Standardspezifikation auf Vorgaben der jeweiligen Zivilluftfahrtbehörden. Sie weist auch darauf hin, dass zum Zeitpunkt der Veröffentlichung die meisten Behörden noch keine Grenzwerte festgelegt hatten.

2 Analyse

2.1 Technische Aspekte

2.1.1 Softwarestand

Die Hardware der Drohne war gemäss Hersteller zwischen den Flügen im Januar 2019 und dem Unfall vom 9. Mai 2019 nicht verändert worden. Die in dieser Zeitspanne verwendeten, von Matternet modifizierten Software-Versionen fussten auf der Software ArduCopter 3.5.0-rc5 (Stand Mai 2017), die lediglich eine quasi-parallele Berechnung von zwei EKF-Lanes zulies. Dadurch war es nicht möglich, ein falsches Signal zu isolieren (vgl. Kapitel 1.2.3).

Bei den Aufzeichnungen der Testflüge vom 24. bis 26. Januar 2019 zeigten die IMU1 und IMU3 weitgehend ähnliche Vibrationswerte (vgl. Kapitel 1.6.3). Deshalb war der Wert 5 des Parameters «EK2_IMU_MASK» in der Konfiguration des Flugreglers, womit der Einbezug der IMU1 und IMU3 bzw. der Ausschluss der IMU2 in die Berechnungen für die beiden Lanes festgelegt wurde, durchaus angebracht und, in Abweichung zum Standardwert 3, nachvollziehbar. Auch zeigte am 9. Mai 2021 die Wahl dieses Parameters auf dem Hinflug zur Universität Zürich (UZH) keine Auswirkungen.

Erst auf dem Rückflug zum Universitätsspital Zürich (USZ) verzeichneten die Vibrationen der IMU3 nach rund einer Minute Flugzeit, um 10:38:24 Uhr (vgl. blaue Linie in Abbildung 9), einen Anstieg und erreichten Werte von deutlich über 30 m/s^2 , bei denen die Lagebestimmung und damit auch die Lagesteuerung durch den Flugregler (*flightcontroller*) bereits erheblich beeinträchtigt wurden und die Drohne in einen oszillierenden Zustand versetzt wurde.

Aufgrund der gegenüber Januar 2019 unveränderten Konfiguration flossen die Werte der IMU1 und IMU3 in die Berechnungen der beiden EKF-Lanes ein und führten im weiteren Verlauf infolge anwachsender Differenzen zwischen den Daten zu einem Überschreiten der EKF-Varianz, was um 10:38:46 Uhr als Ereignis «EKFCHECK_BAD_VARIANCE» in der Log-Datei protokolliert wurde (vgl. Kapitel 1.6.2).

Die Ursache der plötzlich auftretenden Vibrationen, wie sie von IMU3 in Abweichung zu den beiden anderen IMU registriert wurden, lässt sich anhand der Aufzeichnungen sowie aufgrund der Spurenlage am Wrack bzw. an der Unfallstelle nicht eindeutig festlegen. Im vorliegenden Fall lassen sich die Abweichungen am ehesten mit einer Resonanz infolge eines äusseren Faktors wie beispielweise eines Vogelschlages oder möglicher Vorschädigungen eines Propellers, die sich im Verlauf des Fluges auswirkte, erklären. Ein Fehlverhalten der IMU3 erscheint aufgrund der Aufzeichnungen als wenig wahrscheinlich.

Vom Hersteller wird als Reisegeschwindigkeit 16 m/s über Grund empfohlen. Erlaubt sind eine maximale Windkomponente von 8 m/s und Böen von 12 m/s (vgl. Kapitel 1.2.1). Im vorliegenden Fall betrug der Wind laut meteorologischem Bericht auf Basis von Daten einer nahegelegenen Wetterstation (Hönggerberg) zu dem Zeitpunkt 6 kt, also rund 3 m/s, aus Richtung 160 bis 240 Grad, d. h. schräg von vorne rechts zur Flugrichtung. Bei einer noch vergleichsweise geringen Reisegeschwindigkeit von 12.5 m/s, mit der sich die Drohne kurz vor dem Unfall vorwärtsbewegte, lassen sich das plötzliche Auftreten der so auffällig hohen Vibrationen auf den drei IMU nicht durch die schwachwindigen Wetterverhältnisse erklären. Im Weiteren lag gemäss den Logdateien zum Zeitpunkt des Eintretens der kritischen Vibrationen und Oszillationen die Stromaufnahme der Motoren rund 25 % unter derjenigen Werten, die sowohl auf dem Hinflug als auch in früheren Testflügen bei Erreichen der für dieses Drohnenmuster definierten Grenzwerte zeitweise aufgezeichnet worden waren. Auch der Neigungswinkel lag nur zwischen 10° und 15°

und somit ebenfalls deutlich unter dem in der Konfiguration des Flugreglers gesetzten Grenzwert von 20°. Aus den vorgenannten Gründen kann daher eine Überlastungssituation ausgeschlossen werden.

Ungeachtet der tieferliegenden Ursache zeigt sich, dass divergierende IMU-Werte im Verlauf des Fluges zu einem Überschreiten des zugehörigen Grenzwertes führten und das Programm zur Fehlerbehandlung ausgelöst wurde, woran das *Flight Termination System* (FTS) mit der Auslösung des Fallschirms gekoppelt war. Solange die angewandte Firmware des Flugreglers dem Softwarestand ArduCopter 3.5.0-rc5 entsprach, musste im Vorfeld eine Auswahl getroffen werden, welche zwei der drei zur Verfügung stehenden IMU in die Berechnungen einfließen sollten. Dadurch fehlte der Software des Flugreglers die als Resilienz bezeichnete Fähigkeit, bei Störungen oder bei Ausfällen einzelner Komponenten nicht vollständig auszufallen, sondern die Steuerung der Drohne aufrechtzuerhalten.

Bei Flugsteuerungen mit drei IMU konnte erst ab der Software-Version 3.6.12 mit der entsprechenden Konfiguration («EK2_IMU_MASK = 7») diese Resilienz sichergestellt werden. Fortan konnten alle drei IMU in die Berechnungen einbezogen und auch drei parallele *Lanes* zur Isolierung eines divergierenden Signals ermöglicht werden (vgl. Kapitel 1.2.4). Damit verbleibt dem Missionsleiter mehr Zeit, mit geeigneten Massnahmen eine kontrollierte Flugbeendigung herbeizuführen.

2.1.2 Service Bulletin

Der in der SUI-9903 verbaute Flugregler wurde im letzten Quartal 2018 erworben und fiel somit nicht in den Zeitraum der Änderungsanweisung (*Service Bulletin – SB*) SB 0000002, das im April 2019 veröffentlicht wurde (vgl. Kapitel 1.2.4). Erst mit der nachgelagerten Erweiterung seitens des Herstellers, wonach generell alle Pixhawk Cubes mindestens auf ArduCopter 4.x aufdatiert und die Parameter entsprechend angepasst werden sollen, traf das SB 0000002 auch für den vorliegenden Flugregler zu. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, dass Hersteller und Drohnenbetreiber angehalten sind, Updates von Firmware sowie Änderungsanweisungen (*Service Bulletin – SB*) zeitnah und transparent zu kommunizieren respektive auszuführen.

Aus Sicht Sicherheit stellt ein Diskussionsforum auf dem Internet nicht die richtige Plattform für die Publikation einer solchen, sicherheitsrelevanten Änderungsanweisung dar. Üblicherweise werden in der bemannten Luftfahrt *Safety Bulletins* über eine eigens dafür bereitgestellte Plattform, wie beispielsweise eine Übersichtsliste für alle ausgesprochenen SB, mit deren Nummer, Revisionsnummer und Ausgabedatum publiziert.

Aus diesem Grund spricht die SUST eine Sicherheitsempfehlung (vgl. Kapitel 4.1.2.2) sowie einen Sicherheitshinweis aus (vgl. Kapitel 4.2.1.2).

2.1.3 Flugabbruchsystem

Mit dem automatischen Auslösen des *Flight Termination System* (FTS) wurden die Motoren der vier Antriebseinheiten gestoppt, wie es per Design vorgesehen war.

Anhand der Deformation am Aluminiumchassis und der Rissfraktur an der Verbindungsleine kann geschlossen werden, dass diese durch die beim Ausstossen des Fallschirms entstandenen Kräfte infolge dessen Bremswirkung schlagartig verzögert und dabei an den scharfen Oberkanten des Chassis angeschnitten wurde (vgl. Abbildung 5 und Abbildung 6). Die für Zugkraft ausgelegte Verbindungsleine wurde durch die scharfe Kante an der drohnenseitigen Befestigungsstelle vorbeschädigt. In der Folge hielt sie der Zugbelastung des sich entfaltenden Fallschirms nicht stand und riss. Dadurch wurde der Notfallschirm von der Transportdrohne getrennt, und das Fluggerät stürzte ungebremst ab.

Das akustische Warnsignal wurde von Personen am Boden nahe der Absturzstelle nicht gehört, womit es seinen Zweck, Drittpersonen am Boden zu warnen, nicht erfüllte. Auch wenn im vorliegenden Fall niemand am Boden verletzt wurde, stuft die SUST das schwache Warnsignal als risikoerhöhende Faktoren (*factors to risk*) ein, denen künftig mehr Beachtung geschenkt werden sollte (vgl. Kapitel 4.1.1.2 bzw. Kapitel 4.1.1.3).

2.2 Betriebliche Aspekte

2.2.1 Flugverlauf

Die binnen rund 5 Sekunden ansteigenden Vibrationen aller drei IMU in Verbindung mit der Konfiguration des Parameters «EK2_IMU_MASK» führten im Verlauf des Unfallfluges zum Überschreiten der tolerierbaren Abweichungen zwischen den Daten der IMU1 und IMU3. Daraus folgte um 10:38:46 Uhr das automatische Auslösen des *Flight Termination System* (FTS), wodurch der Fallschirm ausgestossen wurde. Diese rasch ansteigenden Vibrationen waren dem Missionsleiter (*Flight Director* – FD) anhand der von ihm überwachten Daten nicht ersichtlich. Somit ergab sich für ihn auch kein Handlungsbedarf.

Mit dem Auslösen des Flugabbruchsystems verlor der FD die Kontrolle über die Drohne. Nach dem Reißen der Verbindungsleine an der drohnenseitigen Befestigungsstelle (vgl. Kapitel 2.1.3) stürzte diese unkontrolliert aus rund 100 m über Grund in den Wald und wurde 2 Sekunden später beim ungebremsen Aufprall auf dem Waldboden zerstört.

Auch im von der SUST untersuchten Zwischenfall der baugleichen Drohne SUI-9909 vom 25. Januar 2019 (vgl. [Summarischen Bericht](#)) wurde infolge eines Verlustes des GPS-Signals binnen weniger Sekunden eine Notlandung eingeleitet, indem das FTS ausgelöst wurde. Der FD hatte in dieser Phase keine Möglichkeiten, korrigierend in das Geschehen einzugreifen.

In beiden untersuchten Zwischenfällen zeigt sich, dass der FD keine Möglichkeiten der Einflussnahme hatte, bevor die vom Missionsprofil abweichende Drohne autonom innert kurzer Zeit das automatische Flugabbruchsystem auslöste und die Drohne in einem Totalverlust endete. Die SUST spricht daher eine Sicherheitsempfehlung aus, wonach die Bedingungen für das Auslösen des FTS überarbeitet und durch geeignete Massnahmen eine kontrollierte Flugbeendigung herbeigeführt werden sollte (vgl. Kapitel 4.1.2.3).

2.2.2 Maximale Aufprallenergie

Nach Angaben des Herstellers soll die Sinkgeschwindigkeit der zu Boden gleitenden Drohne bei vollständig geöffnetem Fallschirm zwischen 3 und 5 m/s betragen; bei maximalem Abfluggewicht liege die Aufprallenergie nicht höher als 156 J (vgl. Kapitel 1.2.2). In einer rein kinetischen Betrachtung kommt die maximale Aufprallenergie auf 165 J zu liegen.

Wie in der Standardspezifikation F3322 ausgeführt, verhält sich die Sinkgeschwindigkeit einer am Fallschirm zu Boden gleitenden Drohne proportional zur Wurzel ihrer Gesamtmasse. Ausgehend von einer Sinkgeschwindigkeit von 5 m/s für die beladene Drohne mit einer Gesamtmasse von 13.2 kg ergibt sich demzufolge für die unbeladene Drohne der Masse 11.2 kg noch eine Sinkgeschwindigkeit von 4.6 m/s, was rund 50 % über dem vom Hersteller angegebenen unteren Wert (3 m/s) liegt. Die damit einhergehende Aufprallenergie liegt somit für die Drohne ohne Nutzlast bei rund 118 J.

Der Wert der Aufprallenergie der Drohne liegt also ungeachtet ihrer Beladung und mit funktionierendem Fallschirm deutlich über der sogenannten 80-Joule-Grenze,

die auf die Wundballistik der Militärforschung aus der Zeit des Ersten Weltkriegs¹⁸ zurückgeht und als Grenzwert für tödliche Verletzungen noch heute in Regularien vieler staatlichen und überstaatlichen Institutionen Anwendung findet.

Einen ersten Ansatz zum Schutz vor Verletzungen für Drittpersonen am Boden lieferte die im Januar 2021 veröffentlichte Regel¹⁹ der Amerikanischen Flugaufsichtsbehörde (*Federal Aviation Authority – FAA*) über den Betrieb kleiner unbemannter Flugsysteme über Menschen. Darin wurden beim uneingeschränkten Einsatz von Drohnen über Menschen (*category 2*) erstmals ein Grenzwert der Aufschlagenergie von 11 ft lb (rund 15 J) genannt; beim eingeschränkten Einsatz über Menschen (*category 3*) liegt die Grenze bei 25 ft lb (rund 34 J). Dabei soll die Drohne nicht in der Lage sein, eine Verletzung zu verursachen, die schwerer ist als die kinetische Energieübertragung (*impact kinetic energy transfer*) durch ein starres Objekt in der Höhe der vorgenannten Grenzwerte.

Gemessen an diesen tieferen Grenzwerten zum Schutz vor Verletzungen stellte die Drohne M2 V9 somit ungeachtet der Zuladung trotz Fallschirm eine wesentliche Gefahr für Drittpersonen am Boden dar. Auch wenn im vorliegenden Fall niemand verletzt wurde, stuft die SUST diesen Umstand als risikohöhenden Faktor (*factor to risk*) ein, der künftig verbessert werden sollte (vgl. Kapitel 4.1.1.4).

2.3 Redundanz des Antriebskonzepts und erweiterter Sensorik

Alle Komponenten einer Drohne und mechanische Bauteile im Speziellen sind einer gewissen Ausfallwahrscheinlichkeit unterworfen, die oftmals mit *Mean Time Between Failure* (MTBF) oder *Mean Time To Failure* (MTTF) angegeben werden.

Im Fall eines herkömmlichen Quadrocopter-Konzepts mit vier Antrieben, wie beispielsweise die Drohne M2 V9, führt ein Ausfall eines Antriebs zwangsläufig zum Absturz oder zumindest zur erzwungenen Auslösung eines automatischen Flugabbruchsystems.

Demgegenüber kann ein Hexacopter bei ausreichender Dimensionierung auch mit zwei ausgefallenen Antrieben, sofern diese nicht direkt benachbart sind, noch sicher landen oder zum Startpunkt zurückkehren.

Mit einer grösseren Anzahl von Antriebseinheiten lässt sich ein höheres Redundanz-Konzept mit geringerer Wahrscheinlichkeit eines Totalausfalls erzielen. Beträgt die Ausfallwahrscheinlichkeit eines einzelnen Antriebes $1/x$, so liegt diese bei einem Quadrocopter also bei $4/x$. Vergleicht man dies in einer vereinfachten Betrachtungsweise mit der Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Hexacopter zwei Antriebe während eines Fluges ausfallen, beträgt diese $6/x * 5/x$ also $30/x^2$. Bei einer MTBF eines Antriebes von typischerweise 1600 h ergibt dies für einen Quadrocopter eine Wahrscheinlichkeit für einen Totalausfall von $1/400$ pro Betriebsstunde, für einen Hexacopter eine solche von $1/85333$ pro Betriebsstunde.

Laut Beschreibung verfügt das verunfallte Drohnenmodell Matternet M2 V9 über eine Temperatur- und Einzelzellen-Überwachung. In den Aufzeichnungsdateien fanden sich jedoch keine Hinweise, dass diese Daten an den Flugregler und die Telemetrie weitergereicht werden. Eine zusätzliche Überwachung der Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit würde die Erkennung von Kondensation oder Verei-

¹⁸ vgl. «*Schiesslehre für Infanterie unter besonderer Berücksichtigung des Gewehrs 98 mit S-Munition der Maschinengewehre und der Schiessvorschrift für die Infanterie 1906*».

¹⁹ «*Operations of Small Unmanned Aircraft Systems Over People*» (Rule [2021-04881](#)) mit Datum des Inkrafttretens vom 6. April 2021.

sung ermöglichen. Dadurch könnten betriebliche Rahmenbedingen festgelegt werden, unter denen ein Start möglich sein soll oder ein Flug bei sich anbahnenden Problemen rechtzeitig beendet werden kann.

In Bezug auf Antriebskonzepte mit höherer Redundanz sowie eine erweiterte Sensorik hinsichtlich der Umgebungsbedingungen spricht die SUST zwei weitere Sicherheitsempfehlungen aus (vgl. Kapitel 4.1.2 und 4.1.3).

3 Schlussfolgerungen

3.1 Befunde

3.1.1 Technische Aspekte

- Die Masse der Drohne befand sich zum Zeitpunkt des Unfalls innerhalb der zulässigen Grenzen.
- Die Untersuchung ergab keine konkreten Anhaltspunkte für vorbestehende, technische Mängel, die den Unfall hätten verursachen oder beeinflussen können.
- Der Hersteller Matternet verwendete für den Flugregler (*flightcontroller*) Pixhawk Cube Black 2.1 eine auf der Basis-Version der Firmware ArduCopter 3.5.0-rc5 (Stand Mai 2017) modifizierte Software-Version.
- Aufgrund dieser Basis-Version konnte die Software des Flugreglers nur die Daten von zwei der drei redundanten Trägheitsmesseinheiten (*Inertial Measurement Units – IMU*) zur Flugsteuerung der Drohne verwenden.
- Aus diesem Grund war die Isolierung einer IMU aufgrund ihrer abweichenden Daten nicht möglich.

3.1.2 Flugverlauf

- Die Drohne M2 V9 startete um 10:37:35 Uhr bei der Universität Zürich (UZH) Irchel.
- Nach rund einer Minute Flugzeit wurde die Flugsteuerung durch den Flugregler infolge ansteigender Vibrationen erheblich beeinträchtigt, und die Drohne begann zu oszillieren.
- Zeitgleich erreichten die vibrationsbedingten Abweichungen zwischen den IMU-Daten um 10:38:46 Uhr einen kritischen Wert, worauf die Programmeinheit zur Fehlerbehandlung gestartet wurde.
- Damit löste die Drohne automatisch das Flugabbruchsystem (*Flight Termination System – FTS*) aus und der Notfallschirm wurde ausgeworfen.
- Mit der FTS-Auslösung wurden alle Motoren der vier Antriebseinheiten gestoppt.
- Nach dem Ausstossen des Fallschirms riss dessen Verbindungsleine, da diese durch die scharfe Kante an der drohnenseitigen Befestigungsstelle vorbeschädigt war.
- In der Folge stürzte die Drohne aus rund 100 m über Grund in den Wald und wurde beim ungebremsten Aufprall auf dem Waldboden zerstört.
- Das akustische Warnsignal, das nach dem Auslösen des Flugabbruchsystems ertönte, wurde von Personen unweit der Absturzstelle nicht gehört.

3.1.3 Rahmenbedingungen

- Die Windverhältnisse hatten keinen Einfluss auf den Unfallhergang.
- Seit September 2018 liegt unter der Bezeichnung F3322 ein internationaler Standard zur Festlegung des Designs, der Herstellungs- und Testanforderungen für installierbare, auslösbare Fallschirm-Rettungssysteme für Drohnen vor.
- Zum Unfallzeitpunkt lagen hinsichtlich Grenzwerte der Aufprallenergie zum Schutz vor schweren Verletzungen von Drittpersonen am Boden keine Bestimmungen vor.

3.2 Ursachen

Eine Sicherheitsuntersuchungsstelle muss sich zum Erreichen ihres Präventionszwecks zu Risiken und Gefahren äussern, die sich im untersuchten Zwischenfall ausgewirkt haben und die künftig vermieden werden sollten. In diesem Sinne sind die nachstehend verwendeten Begriffe und Formulierungen ausschliesslich aus Sicht der Prävention zu verstehen. Die Bestimmung von Ursachen und beitragenden Faktoren bedeutet damit in keiner Weise eine Zuweisung von Schuld oder die Bestimmung von verwaltungsrechtlicher, zivilrechtlicher oder strafrechtlicher Haftung.

Der Unfall, bei dem die Drohne im Reiseflug das automatische Flugabbruchsystem auslöste und den Fallschirm ausstiess, ist auf ansteigende Vibrationen unbekanntem Ursprungs in Verbindung mit der mangelnden Resilienz der verwendeten Flugregler-Software zurückzuführen.

Nach dem Ausstossen des Fallschirms wurde die Verbindungsleine an der scharfkantigen, drohnenseitigen Befestigungsstelle angeschnitten und riss, sodass die Drohne ungebremst auf dem Boden aufschlug.

Die Untersuchung hat folgende Faktoren ermittelt, welche die Entstehung und den Verlauf des Unfalls zwar nicht beeinflusst haben, aber dennoch ein Sicherheitsrisiko (*factor to risk*) darstellen:

- Nach dem Auslösen des Flugabbruchsystems wurde das akustische Warnsignal von den Personen unweit der Absturzstelle nicht gehört.
- Auch wenn die Drohne am Fallschirm zu Boden geglitten wäre, hätte die Aufprallenergie den bis dato in der Praxis üblichen Grenzwert deutlich überstiegen.
- Auf der Drohne befanden sich keine Aufkleber, die eindeutig als Gefahren- und Warnhinweise interpretiert werden können.
- Redundanz des Antriebskonzeptes.

4 Sicherheitsempfehlungen, Sicherheitshinweise und seit dem Unfall getroffene Massnahmen

4.1 Sicherheitsempfehlungen

Nach Vorgabe des Anhangs 13 der internationalen Zivilluftfahrtorganisation (*International Civil Aviation Organization* – ICAO) sowie Artikel 17 der 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 richten sich alle Sicherheitsempfehlungen, die in diesem Bericht aufgeführt sind, an die Aufsichtsbehörde des zuständigen Staates, der darüber zu entscheiden hat, inwiefern diese Empfehlungen umzusetzen sind. Gleichwohl sind jede Stelle, jeder Betrieb und jede Einzelperson eingeladen, im Sinne der ausgesprochenen Sicherheitsempfehlungen eine Verbesserung der Flugsicherheit anzustreben.

Die schweizerische Gesetzgebung sieht in der Verordnung über die Sicherheitsuntersuchung von Zwischenfällen im Verkehrswesen (VSZV) bezüglich Sicherheitsempfehlungen folgende Regelung vor:

„Art. 48 Sicherheitsempfehlungen

¹ Die SUST richtet die Sicherheitsempfehlungen an das zuständige Bundesamt und setzt das zuständige Departement über die Empfehlungen in Kenntnis. Bei dringlichen Sicherheitsproblemen informiert sie umgehend das zuständige Departement. Sie kann zu den Umsetzungsberichten des Bundesamts zuhanden des zuständigen Departements Stellung nehmen.

² Die Bundesämter unterrichten die SUST und das zuständige Departement periodisch über die Umsetzung der Empfehlungen oder über die Gründe, weshalb sie auf Massnahmen verzichten.

³ Das zuständige Departement kann Aufträge zur Umsetzung von Empfehlungen an das zuständige Bundesamt richten.“

Die SUST veröffentlicht die Antworten des zuständigen Bundesamtes oder von ausländischen Aufsichtsbehörden unter www.sust.admin.ch und erlaubt so einen Überblick über den aktuellen Stand der Umsetzung der entsprechenden Sicherheitsempfehlung.

Die Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle erstellte über den vorliegenden untersuchten Unfall einen [Zwischenbericht](#), der am 28. Juni 2019 veröffentlicht wurde. In diesem Zwischenbericht sprach die SUST die Sicherheitsempfehlung [Nr. 553](#) und [Nr. 554](#) aus. Im Rahmen des vorliegenden Schlussberichts spricht die SUST die Sicherheitsempfehlungen Nr. 587 bis 591 aus.

4.1.1 Flugabbruchsystem und Aufprallenergie

4.1.1.1 Sicherheitsdefizit

Rund eine Minute nach dem Start bei der Universität Zürich (UZH) Irchel löste die Drohne M2 V9 automatisch das Flugabbruchsystem (*Flight Termination System* – FTS) aus und leitete einen Notabstieg mit Fallschirm ein. Nach dem Ausstossen des Fallschirms riss die Verbindungsleine, und die Drohne schlug ungebremst auf den Waldboden auf und wurde zerstört.

Nach dem Auslösen des Notfallschirms wurde das akustische Warnsignal von den Personen unweit der Absturzstelle nicht gehört, womit der Zweck, Drittpersonen am Boden zu warnen, nicht erfüllt war.

Wie die Untersuchung zeigte, lag der Wert der Aufprallenergie der Drohne ungeachtet ihrer Beladung deutlich über dem bis dato in der Praxis verwendeten Wert von 80 J.

4.1.1.2 Sicherheitsempfehlung Nr. 553

Das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) sollte durch geeignete Massnahmen sicherstellen, dass die Befestigung des Notfallschirms an der Drohne den möglichen Belastungen standhält.

4.1.1.3 Sicherheitsempfehlung Nr. 554

Das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) sollte durch geeignete Massnahmen sicherstellen, dass das akustische Warnsignal beim Einleiten einer Notlandung von Drittpersonen am Boden wahrgenommen werden kann.

4.1.1.4 Sicherheitsempfehlung Nr. 587

Das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) sollte durch geeignete Massnahmen sicherstellen, dass die Aufprallenergie einer am Fallschirm zu Boden gleitenden Drohne für Drittpersonen am Boden keine erhebliche Verletzungsgefahr darstellt.

4.1.2 Änderungsanweisungen, kontrollierte Flugbeendigung und Sensorik

4.1.2.1 Sicherheitsdefizit

Rund eine Minute nach dem Start bei der Universität Zürich (UZH) Irchel löste die Drohne M2 V9 automatisch das Flugabbruchsystem (*Flight Termination System – FTS*) aus und leitete einen Notabstieg mit Fallschirm ein. Nach dem Ausstossen des Fallschirms riss die Verbindungsleine, und die Drohne schlug ungebremst auf den Waldboden auf und wurde zerstört.

Wie die Untersuchung zeigte, war die angewandte Firmware des Flugreglers auf Basis des Softwarestandes ArduCopter 3.5.0-rc5 lediglich in der Lage, zwei der drei zur Verfügung stehenden Trägheitsmesseinheiten (*Inertial Measurement Units – IMU*) zur Flugsteuerung der Drohne zu verwenden. Dadurch fehlte der Software des Flugreglers die als Resilienz bezeichnete Fähigkeit, bei Störungen oder bei Ausfällen einzelner Komponenten nicht vollständig auszufallen, sondern die Steuerung der Drohne aufrechtzuerhalten.

Erst ab der Software-Version 3.6.12 konnte diese Resilienz mit der entsprechenden Konfiguration des sicherheitskritischen Parameters («*EK2_IMU_MASK = 7*»), wie dies in einem Diskussionsforum des Herstellers des Flugreglers als *Service Bulletin* SB 0000002 publiziert wurde, erlangt werden.

Auch beim Unfall der weitgehend baugleichen Drohne SUI-9909 vom 25. Januar 2019 (vgl. [summarischer Bericht](#)) wurde aufgrund eines Verlustes des GPS-Signals umgehend das FTS ausgelöst. Wie die Untersuchung zeigte, war zu diesem Zeitpunkt die Fluglage der Drohne noch stabil und eine Landung unter Motorkraft wäre somit, entweder manuell gesteuert auf Sicht oder autonom, nicht grundsätzlich ausgeschlossen gewesen.

Beim Einsatz unter extremen klimatischen Bedingungen werden in der Praxis entsprechende flugkritische Parameter wie z.B. der Umgebungstemperatur und der Luftfeuchtigkeit nicht einbezogen. Dies würde es erlauben, unter gewissen Bedingungen einen Flugeinsatz frühzeitig abubrechen oder erst gar nicht durchzuführen.

4.1.2.2 Sicherheitsempfehlung Nr. 588

Das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) sollte bei Betreibern von Drohnen, die in Szenarien mit höherem Risiko – insbesondere bei Flügen ausserhalb des Sichtbereichs (*Beyond Visual Line of Sight* – BVLOS) über besiedeltem Gebiet – im Einsatz stehen, sicherstellen, dass *Service Bulletins* zu flugkritischen Komponenten oder deren Software Folge geleistet wird.

4.1.2.3 Sicherheitsempfehlung Nr. 589

Das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) sollte sicherstellen, dass der Hersteller die Bedingungen für das Auslösen des automatischen Flugabbruchsystems (*Flight Termination System*) dahingehend überarbeitet, dass durch geeignete Massnahmen (*contingency procedures*) eine kontrollierte Flugbeendigung erwirkt wird, bevor es zum Auslösen des Fallschirms kommt und die Drohne unkontrolliert zu Boden sinkt.

4.1.2.4 Sicherheitsempfehlung Nr. 590

Das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) sollte zusammen mit dem Betreiber bzw. Hersteller durch geeignete organisatorische resp. technische Massnahmen sicherstellen, dass ein Start bei ungeeigneten Umgebungsbedingungen, die z. B. zu Kondensation oder Vereisung führen könnten, verhindert wird.

4.1.3 Redundanz des Antriebskonzepts

4.1.3.1 Sicherheitsdefizit

Rund eine Minute nach dem Start bei der Universität Zürich (UZH) Irchel löste die Drohne M2 V9 automatisch das Flugabbruchsystem (*Flight Termination System* – FTS) aus und leitete eine Notlandung ein. Nach dem Ausstossen des Fallschirms riss die Verbindungsleine, und die Drohne schlug ungebremst auf den Waldboden auf und wurde zerstört.

Im Fall eines herkömmlichen Quadrocopter-Konzepts mit vier Antrieben, wie es bei der vorliegend untersuchten Drohne M2 V9 der Fall war, führt ein Ausfall eines Antriebs zwangsläufig zum Absturz oder zumindest zur erzwungenen Auslösung eines automatischen Flugabbruchsystems. Antriebskonzepte von Drohnen mit 6 oder mehr Antriebseinheiten zeigen hier eine deutlich geringere Ausfallwahrscheinlichkeit.

4.1.3.2 Sicherheitsempfehlung Nr. 591

Das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) sollte sicherstellen, dass der Hersteller die Verwendung eines redundanten Antriebskonzeptes – insbesondere bei Flügen über besiedeltem Gebiet – anstrebt, damit die antriebsbedingte Ausfallwahrscheinlichkeit infolge Materialverschleiss oder aufgrund exogener Faktoren wie z.B. Vogelschlag reduziert wird.

4.2 Sicherheitshinweise

Als Reaktion auf während der Untersuchung festgestellte Sicherheitsdefizite kann die SUST Sicherheitshinweise veröffentlichen. Sicherheitshinweise werden formuliert, wenn eine Sicherheitsempfehlung nach der Verordnung (EU) Nr. 996/2010 nicht angezeigt erscheint, formell nicht möglich ist oder wenn durch die freiere Form eines Sicherheitshinweises eine grössere Wirkung absehbar ist. Sicherheitshinweise der SUST haben ihre Rechtsgrundlage in Artikel 56 der VSZV:

„Art. 56 Informationen zur Unfallverhütung

Die SUST kann allgemeine sachdienliche Informationen zur Unfallverhütung veröffentlichen.“

4.2.1 Änderungsanweisungen

4.2.1.1 Sicherheitsdefizit

Rund eine Minute nach dem Start bei der Universität Zürich (UZH) Irchel löste die Drohne M2 V9 automatisch das Flugabbruchsystem (*Flight Termination System – FTS*) aus und leitete eine Notlandung ein. Nach dem Ausstossen des Fallschirms riss die Verbindungsleine, und die Drohne schlug ungebremst auf den Waldboden auf und wurde zerstört.

Wie die Untersuchung zeigte, war die angewandte Firmware des Flugreglers auf Basis des Softwarestandes ArduCopter 3.5.0-rc5 lediglich in der Lage, zwei der drei zur Verfügung stehenden Trägheitsmesseinheiten (*Inertial Measurement Units – IMU*) zur Flugsteuerung der Drohne zu verwenden. Dadurch fehlte der Software des Flugreglers die als Resilienz bezeichnete Fähigkeit, bei Störungen oder bei Ausfällen einzelner Komponenten nicht vollständig auszufallen, sondern die Steuerung der Drohne aufrechtzuerhalten.

Erst ab der Software-Version 3.6.12 konnte diese Resilienz mit der entsprechenden Konfiguration des sicherheitskritischen Parameters («*EK2_I-MU_MASK = 7*»), wie dies in einem Diskussionsforum des Herstellers des Flugreglers als *Service Bulletin* SB 0000002 publiziert wurde, erlangt werden.

Zu einem späteren Zeitpunkt schrieb der Hersteller vor, dass "*All Copter users to be on at least ArduCopter 4.x and SB2 parameters, regardless of cube age.*", zu Deutsch: «*Alle Copter-Nutzer müssen mindestens ArduCopter 4.x und SB2-Parameter verwenden, unabhängig vom Alter des Cube [d.h. des Flugregels].*» (vgl. <https://discuss.cubepilot.org/c/MSB/16>), ohne Angabe eines Herausgabedatums.

4.2.1.2 Sicherheitshinweis Nr. 44

Zielgruppe: Hersteller von Drohnenkomponenten und zugehöriger Software

Hersteller von Drohnen und Drohnenkomponenten sollten sicherstellen, dass Änderungsanweisungen (*Service Bulletin – SB*) in Bezug auf Drohnenkomponenten oder deren zugehörigen Software übersichtlich aufgeführt, mit einer Kennung und einem Ausgabedatum versehen werden und der zeitliche Verlauf allfälliger Revisionen für den Betreiber erkennbar ist. Ebenso sollte eine zeitnahe Kommunikation an die betroffenen Betreiber sichergestellt werden.

4.3 Seit dem Unfall getroffene Massnahmen

Die der SUST bekannten Massnahmen werden im Folgenden kommentarlos aufgeführt.

4.3.1 Bundesamt für Zivilluftfahrt

Nachfolgend werden Massnahmen aufgelistet, welche das BAZL seit dem 9. Mai 2019 ergriffen hat.

«Unmittelbar nach dem Ereignis getroffene Massnahmen»

- *Modifizierung des Fallschirmsystems durch Übernahme des Matternet Safety Bulletin SB-M2-001.*

- Das Fallschirmrettungssystem muss den Spezifikationen der Norm ASTM F3322 entsprechen, wobei die Konstruktionsprüfung (design review) als Nachweis gilt.
- In der Wartungsdokumentation müssen regelmässige Inspektionen des Fallschirmsystems festgelegt werden.
- Die Geschwindigkeit gegenüber Boden ist um 20 % zu reduzieren (V_{max} von 20 m/s auf 16 m/s).

Bedingungen zur Wiederaufnahme des Betriebs

Die Wiederaufnahme des Betriebs mit SwissPost/Matternet M2-V9 Drohnen wurde basierend auf der Risikoanalyse gemäss JARUS Guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA) Version 2.0 genehmigt. Dabei mussten u. a. folgende Punkte gewährleistet werden:

- Die hohe Robustheitsstufe der Bodenrisikominderungsmassnahmen «M2» (d. h. die Anforderungen an den Fallschirm) wurden durch eine kompetente dritte Stelle validiert.
- Die für eine Risikominderungsmassnahme «M2» an hoher Robustheit erforderliche Sicherheits- und Integritätsstufe, wurde auf der Grundlage der ASTM F3322-18, den Daten aus Demonstrationsflugtests und der Prüfung durch die Federal Aviation Administration (FAA) validiert.
- Die Matternet M2-V9 Drohne ist mit einem 100 dB starken Buzzer ausgerüstet.
- Die Matternet M2-V9 Drohne ist für das Fliegen bei sichtbarer Luftfeuchtigkeit ausgelegt und wurde auf seine Belastbarkeit unter erheblichen Wetterbedingungen getestet. Weiter muss die Drohne strengeren Kriterien als dem DO-160 Category R waterproof test standhalten.

Aktuelle Kriterien für Anträge auf Erteilung einer Betriebsgenehmigung (gültig am 31. Mai 2023)

Seit dem 1. Januar 2023 gelten in der Schweiz die Delegierte Verordnung (EU) 2019/945 „über unbemannte Luftfahrzeugsysteme und Drittlandbetreiber unbemannter Luftfahrzeugsysteme“ sowie die Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 „über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge“. Diese Verordnungen regeln die Anforderungen an unbemannte Luftfahrtsysteme sowie die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge in den europäischen (EASA) Mitgliedstaaten.

Daher bewertet das BAZL aktuell den Betrieb von unbemannten Luftfahrzeugen der UAS-Betriebskategorie „speziell“, indem es die Acceptable Means of Compliance 1 zu Artikel 11 der (EU) 2019/947 anwendet, die wiederum auf dem JARUS Specific Operational Risk Assessment (SORA) V2.0 basiert. Die SORA-Methode ist die Grundlage der risikobasierten Regulierung, bei der die für den UAS-Betrieb geltenden Vorschriften und Verfahren im Verhältnis zur Art und zum Risiko des Betriebs stehen und an die Betriebsmerkmale des betreffenden unbemannten Luftfahrzeugs sowie an die Merkmale des Betriebsbereichs angepasst sein sollten.

Diese Methode war bereits die Grundlage für die Genehmigung des Matternet-Betriebs im Jahr 2019 und die Risikoanalyse SORA V2.0 geht u. a. auf die von der SUST im Rahmen der Untersuchung des Vorfalls von SUI-9903 festgestellten Sicherheitsdefizite ein. Bei der Anwendung dieses Verfahrens hängen die Anforderungen an den UAS Design und Risikominderung von der Höhe des jeweiligen Risikos ab, das mit dem Betrieb des UAS verbunden ist. Dabei werden betriebliche

Verfahren zur Bewältigung technischer Probleme mit Drohnen und Systemen, welche den Betrieb von Drohnen unterstützen, sowie betriebliche Verfahren zur Beherrschung von widrigen Betriebsbedingungen einbezogen.

4.3.2 Matternet

"Die folgende, nicht abschliessende Liste von Änderungen in der Konstruktion oder im Betrieb wurde nach dem UZH-Vorfall vom Mai 2019 vorgenommen:

Software / GNC-Aktualisierungen

- *EK2_IMU_MASK wurde auf 3 geändert. Dadurch wird die EKF-Lane 1 angewiesen, die erste IMU zu verwenden, und die EKF-Lane 2, die zweite IMU zu verwenden (anstatt wie zuvor konfiguriert die erste und dritte IMU zu verwenden). Sowohl IMU 1 als auch 2 sind gegen hochfrequente Vibrationen isoliert.*
- *Beibehaltung von INS_USE3 = 1 (d. h. die nicht isolierte dritte IMU dient als Backup, falls die ersten beiden IMU ausfallen).*
- *Bei Einschalten wird nun geprüft, ob beide EKF-Lane vorhanden und in Ordnung sind.*
- *Stellen Sie INS_FAST_SAMPLE = 5 ein. Dies ermöglicht eine schnelle Abtastung der Beschleunigungsmesserdaten. Dies vermindert ein Aliasing, wenn hochfrequente Vibrationen erfasst werden.*
- *Der Algorithmus für den Spurwechsel des Flugreglers wurde so geändert, dass vor dem Einschalten die EKF-Lane 1 bevorzugt wird.*

Hardware-Aktualisierungen

- *Die Befestigung der Befestigungsleinen am Chassis wurde verbessert, indem scharfe Kanten beseitigt und die Bereiche, die mit dem Chassis in Kontakt kommen, mit Edelstahl ummantelt wurden.*
- *Zwei Befestigungsleinen als Redundanz;*
- *Fallschirmsystem aktualisiert und getestet nach ASTM F3322-18, einschliesslich ASTM genormter Warnhinweise.*
- *Hinzufügen eines lautereren 100 dB Summers, der nach dem Auslösen des FTS ertönt, wenn die Drohne am Fallschirm absinkt.*
- *Änderung des akustischen Signals in eine Dauersirene anstelle eines Ein/Aus-Tons.*

Änderungen der Qualität und des Prüfverfahrens

- *Die Routen für die Flugqualifikationstests wurden aktualisiert und beinhalten nun auch Beschränkungen für die Höchstgeschwindigkeit und die maximale Steigrate.*
- *Ein Tool zur Analyse der Flugprotokolldaten untersucht jeden Flug, um automatisch Fehler/Ausnahmen zu identifizieren.*

Operative Massnahmen zur Risikominderung

- *Die maximale Geschwindigkeit über Grund wurde um 20 % reduziert, um das Auftreten von starken Vibrationen aufgrund eines möglichen höheren Leistungsbedarfs zu verringern (20 m/s wurden auf 16 m/s reduziert).*
- *Die maximale wahre Geschwindigkeit wurde um 20 % reduziert, um einen übermässigen Energiebedarf und damit verbundene mögliche Vibrationen zu vermeiden.*

Organisatorisches

- *Einstellung eines Leiters für Sicherheit*
- *Sicherheitsmanagementsystem und Sicherheitsorganisation im Unternehmen integriert.*
- *Einführung des Baldwin-Sicherheitstools".*

Dieser Schlussbericht wurde von der Kommission der Schweizerischen Sicherheitsuntersuchungsstelle SUST genehmigt (Art. 10 lit. h der Verordnung über die Sicherheitsuntersuchung von Zwischenfällen im Verkehrswesen vom 17. Dezember 2014).

Bern, 6. Juni 2023

Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle