



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. 2329 der Schweizerischen Sicherheitsuntersuchungsstelle SUST

über den schweren Vorfall des
Flugzeuges PA-28RT-201T, HB-PGF,

vom 22. Oktober 2016

über der Lenzerheide (GR)

Cause

L'incident grave a consisté en une perte de puissance du moteur consécutive à une erreur de montage de l'axe du culbuteur de la soupape d'échappement d'un cylindre. Par conséquent, la rupture des goujons de fixation de l'axe du culbuteur a empêché l'ouverture de la soupape d'échappement.

Allgemeine Hinweise zu diesem Bericht

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

Gemäss Art. 3.1 der 10. Ausgabe des Anhangs 13, gültig ab 18. November 2010, zum Abkommen über die internationale Zivilluftfahrt vom 7. Dezember 1944 sowie Art. 24 des Bundesgesetzes über die Luftfahrt 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 Flugunfalluntersuchung. 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 schweren Vorfalls.

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 Zeitpunkt des schweren Vorfalls der mitteleuropäischen Sommerzeit (MESZ) entsprach. Die Beziehung zwischen LT, MESZ und koordinierter Weltzeit (*Coordinated Universal Time* – UTC) lautet:

LT = MESZ = UTC + 2 h.

Schlussbericht

Luftfahrzeugmuster	PA-28RT-201T	HB-PGF		
Halter	Flugschule Basel AG, 4030 Basel			
Eigentümer	BS Business Aviation AG, Schlossbergstrasse 1, 4132 Muttenz			
Pilot	Schweizer Bürger, Jahrgang 1953			
Ausweis	Berufspilotenlizenz für Flugzeuge (<i>Commercial Pilot Licence Aero-plane – CPL(A)</i>) nach der Europäischen Agentur für Flugsicherheit (<i>European Aviation Safety Agency – EASA</i>), ausgestellt durch das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL)			
Flugstunden	insgesamt	1663:20 h	während der letzten 90 Tage	15:37 h
	auf dem Vorfallmuster	729:44 h	während der letzten 90 Tage	7:12 h
Ort	Über der Lenzerheide/GR			
Koordinaten	760 100/ 180 500 (Swiss Grid) N 46° 45' 23" E 009° 32' 04" (WGS)			
Datum und Zeit	22. Oktober 2016, 12:02 Uhr			
Betriebsart	Privat			
Flugregeln	Instrumenten- und Sichtflugregeln (<i>Instrument / Visual Flight Rules – IFR/VFR</i>)			
Startort	Flughafen Basel-Mulhouse (LFSB)			
Landeort	Flugplatz St. Gallen-Altenrhein (LSZR)			
Flugphase	Reiseflug			
Art des schweren Vorfalls	Leistungsabfall des Motors			
Personenschaden				
Verletzungen	Besatzungsmitglieder	Passagiere	Gesamtzahl der Insassen	Drittpersonen
Tödlich	0	0	0	0
Erheblich	0	0	0	0
Leicht	0	0	0	0
Keine	1	2	3	Nicht zutreffend
Gesamthaft	1	2	3	0
Schaden am Luftfahrzeug	Leicht beschädigt			
Drittsschaden	Keiner			

1 Sachverhalt

1.1 Vorgeschichte und Flugverlauf

1.1.1 Allgemeines

Für die folgende Beschreibung von Vorgeschichte und Flugverlauf wurden die Aussage des Piloten sowie Aufzeichnungen des Radars und des Sprechfunkverkehrs zwischen dem Piloten und der Flugverkehrsleitung verwendet.

1.1.2 Vorgeschichte

Der Pilot beabsichtigte, am Vormittag des 22. Oktober 2016 zusammen mit zwei Passagieren einen Flug vom Flughafen Basel-Mulhouse (LFSB) zum Flugplatz Samedan (LSZS) durchzuführen. Mit dem für diesen Flug vorgesehenen Flugzeug vom Typ Piper PA-28RT-201T Turbo Arrow, eingetragen als HB-PGF, flog der Pilot seit 2001 regelmässig. Das Flugzeug wurde für den vorgesehenen Flug ausreichend betankt. Im Anschluss führte der Pilot die üblichen Vorflugkontrollen aus.

1.1.3 Flugverlauf

Um 10:59 Uhr startete die HB-PGF in Basel-Mulhouse. Der Flug führte wie geplant nach IFR bis zum Funkfeuer Willisau (WIL), wo der Pilot die Flugregeln wechselte und sich danach bei der Fluginformationszentrale *Zurich Info* für den Weiterflug nach VFR anmeldete. In der Folge flog die HB-PGF über Luzern und südlich des Walensees entlang bis ins Rheintal (vgl. Abbildung 1).

Um 12:02 Uhr, rund 12 km südlich der Stadt Chur auf einem südlichen Steuerkurs und einer Flughöhe von 10 100 ft AMSL¹, verlor der Motor unvermittelt an Leistung und das Flugzeug begann zu vibrieren. Gleichzeitig vernahm der Pilot ein ratterndes Geräusch aus dem Motorenraum und stellte einen massiven Abfall des Ladedrucks (*manifold pressure*) von normal rund 30 in Hg² auf 15 bis 20 in Hg fest. Der Pilot leitete umgehend eine Umkehrkurve nach rechts ein, um nicht weiter in gebirgiges Gelände zu fliegen. Anschliessend führte er die bei einem Motorausfall vorgesehenen Manipulationen durch. Da der Motor weiterhin nur reduziert Leistung abgab, schaltete der Pilot in der Folge die elektrische Benzinpumpe wieder aus. Er erkannte zudem, dass das Vor- und Zurückbewegen des Gashebels im höheren Leistungsbereich zu keiner merklichen Veränderung der Motorleistung führte.

Um 12:03:07 Uhr informierte der Pilot *Zurich Info* über die Motorenprobleme und meldete seine Absicht, zum Flugplatz St. Gallen-Altenrhein (LSZR) auszuweichen. In dieser und den nachfolgenden Aufzeichnungen des Sprechfunkverkehrs des Piloten ist ein ratterndes Hintergrundgeräusch hörbar. St. Gallen-Altenrhein war dem Piloten von früheren Flügen her bekannt und die Flughafenwettervorhersage, die er am Morgen vor Flugbeginn eingesehen hatte, wies auf Sichtflugbedingungen hin. Eine Rückkehr zum Ausgangsflughafen Basel-Mulhouse schloss er aufgrund des unruhigen Motorenlaufs aus.

Zurich Info nannte als nächsten Flugplatz Bad Ragaz (LSZE), der sich zu diesem Zeitpunkt rund 30 km nordwestlich der HB-PGF befand, sowie Hohenems-Dornbirn (LOIH) auf dem Weg Richtung Norden entlang des Rheintals. Aufgrund der kurzen Pistenlänge und des ungewöhnlich steilen Endanfluges in Bad Ragaz und

¹ AMSL: *Above Mean Sea Level*, Höhe über dem mittleren Meeresspiegel

² in Hg: *inches of mercury*, Luftdruck in Zoll Quecksilbersäule; 1 in Hg entspricht 33.86 hPa

der Einschätzung, dass wegen der reduzierten Motorleistung kein Durchstart möglich wäre, schloss der Pilot eine dortige Ausweichlandung aus. Kurz später, um 12:06:09 Uhr, deklarierte er auf Nachfrage von *Zurich Info* eine Notlage.

Die Motorleistung der HB-PGF reichte in dieser Flugphase aus, um das Flugzeug mit einer angezeigten Fluggeschwindigkeit von rund 90 kt und einer Sinkrate von etwa 200 Fuss pro Minute zu halten. Der Pilot schloss daraus, dass er St. Gallen-Altenrhein mit ausreichender Flughöhe erreichen würde und er bei Auftreten eines zusätzlichen Leistungsabfalles oder kompletten Ausfalles des Motors im Rheintal landen könnte.

Nach einem Frequenzwechsel zur Flugverkehrsleitstelle *Zurich Delta* um 12:06:38 Uhr erfragte der Pilot die aktuellen Wetterbedingungen in St. Gallen-Altenrhein, das wie erwartet Sichtflugwetterbedingungen entsprach. Beim Überflug von Vaduz/FL in einer Höhe von 7500 ft AMSL meldete er, dass er den in nördlicher Richtung liegenden, 38 km entfernten Flugplatz bereits in Sicht habe. In der Gegend von Hohenems erkannte er, dass die Flughöhe von rund 4500 ft AMSL für den Weiterflug mehr als ausreichend war, und beschleunigte in der Folge seinen Sinkflug. Der Einflug in die Kontrollzone St. Gallen-Altenrhein erfolgte über den Meldepunkt Sierra gefolgt von einem Direktanflug und einer normalen Landung um 12:28:11 Uhr auf der Piste 28.

Die Feuerwehr, die am Pistenanfang bereitstand, folgte der HB-PGF bis zum nördlichen Vorfeld, wo sich der ortsansässige Unterhaltsbetrieb befindet und der Pilot die HB-PGF anhielt und den Motor abstellte. In der Folge informierte die Feuerwehr den Piloten über ungewöhnliche, ratternde Motorengeräusche, die bereits während des Endanfluges zu hören gewesen waren.

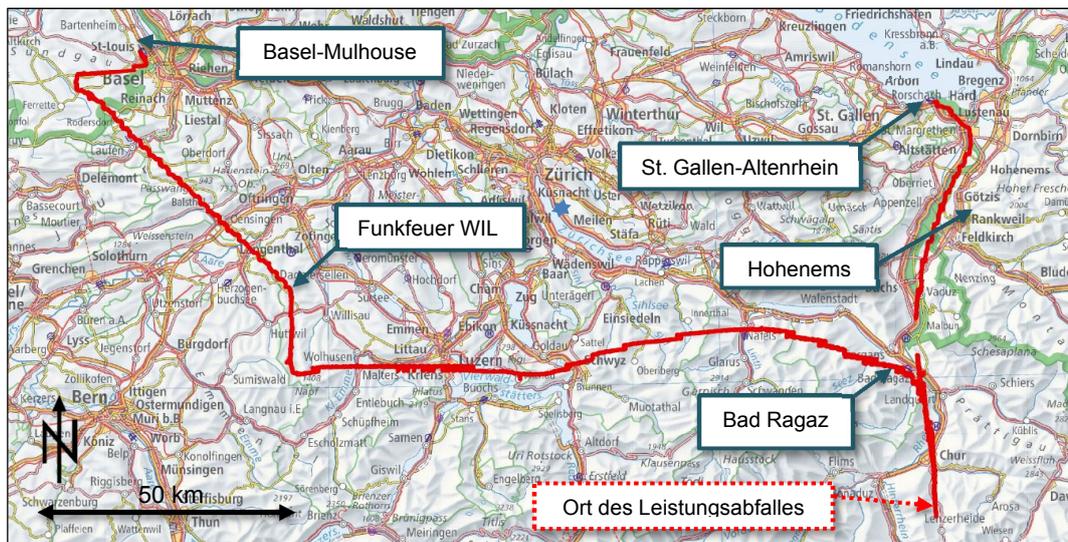


Abbildung 1: Flugweg (rot) von Basel (LFSB) nach St. Gallen-Altenrhein (LSZR) gemäss Aufzeichnungen des Sekundärradars (unterbrochene Stellen wurden vom Radar nicht erfasst); Quelle der Basiskarte: Bundesamt für Landestopografie.

1.2 Meteorologische Angaben

1.2.1 Allgemeine Wetterlage

Der Alpenraum befand sich am Rande eines Tiefs mit Kern über dem Osten von Deutschland.

1.2.2 Wetter zum Zeitpunkt und am Ort des schweren Vorfalls

Das Wetter war trocken, die Sicht gut. Durch die Gebirgseinschnitte der Bündner Alpenübergänge wehte schwacher Südwind. Oberhalb von rund 10 000 ft AMSL drehte der Wind auf Westsüdwest. Im nördlichen Teil des St. Galler Rheintals nahm der Dunst geringfügig zu. Entlang der Flanken des Rheintals hielten sich flache Quellwolken, die aus morgendlichen Hochnebefeldern entstanden waren.

Zwischen der Lenzerheide und St. Gallen-Altenrhein herrschte trockenes Wetter mit einer Sicht von mehr als 10 km. Um den Alpstein und im benachbarten Vorarlberg hielten sich 2/8 CU mit einer Basis um 3300 ft AMSL. Über die Bündner Herrschaft zogen Felder von transparenten Altocumuli.

Wetter	Leicht bewölkt und trocken
Wolken	3/8 AC (<i>alto-cumulus</i>) um 20 000 ft AMSL
Sicht	20 km
Wind 10 000 ft AMSL	250 Grad, 10-15 kt
Temperatur/Taupunkt auf 10 000 ft AMSL	-7 °C / -17 °C
Luftdruck (QNH)	1015 hPa (Druck reduziert auf Meereshöhe, berechnet mit den Werten der ICAO ³ -Standardatmosphäre)
Trend	Keine wesentliche Änderung

1.2.3 Astronomische Angaben

Beleuchtungsverhältnisse	Tag	
Sonnenstand	Azimet: 163 Grad	Elevation: 30 Grad

1.3 Angaben zum Luftfahrzeug

1.3.1 Allgemeine Angaben

Eintragungszeichen	HB-PGF	
Luftfahrzeugmuster	PA-28RT-201T (Turbo Arrow IV)	
Charakteristik	Einmotoriges viersitziges Flugzeug in Ganzmetallbauweise, ausgeführt als Tiefdecker mit T-Leitwerk und Einziehfahrwerk	
Hersteller	Piper Aircraft Corporation, Vero Beach Florida, USA	
Triebwerk	Hersteller:	Continental Motors Inc., Alabama, USA
	Baumuster:	TSIO-360-FB1B
	Seriennummer:	1010301
	Leistung:	200 PS bei 2575 RPM ⁴
Betriebsstunden	Zelle:	9347:10 h TSN ⁵
	Motor:	716:04 h TSN

³ ICAO: *International Civil Aviation Organization*, internationale Zivilluftfahrtorganisation

⁴ RPM: *Revolutions Per Minute*, Umdrehungen pro Minute

⁵ TSN: *Time Since New*, Betriebsstunden seit Herstellung

Masse und Schwerpunkt Sowohl Masse als auch Schwerpunkt befanden sich innerhalb der gemäss Luftfahrzeughandbuch (*Aircraft Flight Manual – AFM*) zulässigen Grenzen.

Technische Einschränkungen Keine eingetragen

1.3.2 Unterhaltsarbeiten am Motor

Am 22. Mai 2014 wurde der Motor einer Grundüberholung (*factory-rebuilt engine*) durch den Motorenhersteller unterzogen und die TSN auf 0:00 h zurückgesetzt. Der Motor wurde in der Folge am 16. Juni 2014 in die HB-PGF eingebaut.

Am 26. Februar 2015 wurden bei 194:21 h TSN des Motors alle Papierdichtungen der Ventildeckel durch Silikondichtungen ersetzt.

Am 15. Oktober 2015 wurde bei 386:01 h TSN des Motors der Zylinder Nummer 3 aufgrund eines zu geringen Kompressionsdruckes gewechselt.

Der Flugzeughalter gab an, dass von einem Piloten nach einem Flug am 10. Juni 2016 am rechten Seitenruderpedal spürbare Vibrationen gemeldet wurden. Die TSN des Motors betrug zu diesem Zeitpunkt 576:51 h. Eine Sichtkontrolle im Motorraum und an der Flugsteuerung, das versuchsweise Ein- und Ausfahren des Fahrwerks im Hangar sowie ein nachfolgender Testflug blieben ohne Befunde. Das Ereignis war entsprechend im Flugbuch und in der Arbeitsanweisung anlässlich einer 100 h Kontrolle vom 16. Juni 2016 eingetragen worden.

Gemäss den technischen Akten der HB-PGF wurde die letzte 100 h Kontrolle an der Zelle und am Motor am 7. September 2016, bei 9312:59 h TSN der Zelle resp. 681:53 h TSN des Motors, ausgeführt und die Arbeiten im Instandhaltungsnachweis bescheinigt.

1.3.3 Angaben zum Motor

Das Muster IO-360 ist ein 6-Zylinder-Flugmotor des US-amerikanischen Herstellers Continental Motors Inc., der für den Einsatz in Leichtflugzeugen entwickelt wurde. Die Motorenvariante TSIO-360 ist unter anderem in Flugzeugen des Typs Cessna T-337 Skymaster, Piper PA34 Seneca und Mooney M20K eingebaut und verfügt über eine Turboaufladung zur Verbesserung der Höhenleistung.

Bei diesem Motortyp ist in jedem Zylinderkopf ein Einlass- und ein Auslassventil montiert, die vom Verbrennungsraum her in den Zylinderkopf eingebaut werden (OHV⁶-Motor). Jedes Ventil wird von einem Nocken der im Kurbelwellengehäuse gelagerten Nockenwelle gesteuert. Dabei wird der Nockenhub über eine Stossstange auf den Kipphebel übertragen. Dieser Kipphebel ist aussen am Zylinderkopf auf der Kipphebelachse gelagert und betätigt, d.h. öffnet und schliesst das Ventil. Die Kipphebelachse ist an beiden Enden mit je einem Klemmstück, einer Unterlegescheibe und einer Sechskantmutter mittels Stehbolzen am Zylinderkopf montiert (vgl. Abbildung 2). Jeder Kipphebel ist durch den sogenannten Ventil- resp. Kipphebeldeckel aus tiefgezogenem Blech hermetisch abgedeckt. Dies verhindert, dass Motorenöl austreten oder Verunreinigungen ins Motorinnere gelangen können.

⁶ OHV: *Overhead Valve*, Überkopfventile

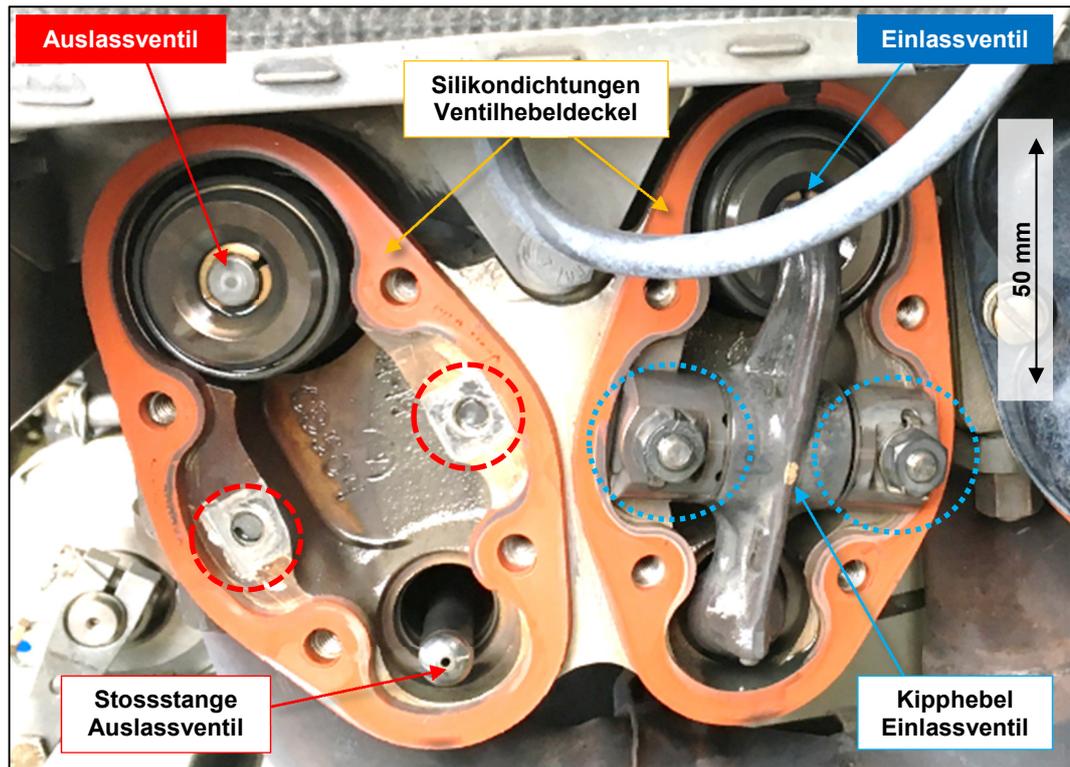


Abbildung 2: Zylinder Nr. 6 nach der Demontage der Ventilhebeldeckel; Einlassventil (rechts) mit montiertem Kipphebel, dessen Achse an beiden Enden mit Klemmstück, Unterlegescheibe und Sechskantmutter an den Stehbolzen befestigt ist (blau-gepunktete Kreise); Auslassventil (links) mit abgebrochenen Stehbolzen (rot-gestrichelte Kreise)

Die Montage der Stehbolzen, wie auch die nachfolgende Montage des Kipphebels bzw. der Kipphebelachse und der beiden Klemmstücke, der Unterlegescheiben und der Sechskantmutter erfolgt bei der Herstellung des Motors im Werk. Bei diesen Montagen sind Anzugsmomente zu beachten. Bei den periodischen Unterhaltsarbeiten werden diese Anzugsmomente nicht überprüft.

1.4 Befunde am Motor

Der Zylinder Nr. 6 wurde nach der Landung aus der HB-PGF ausgebaut und zerlegt. Dabei wurde folgendes festgestellt:

- Die beiden Stehbolzen für die Montage der Kipphebelachse für das Auslassventil waren gebrochen (vgl. Abbildung 3).
- Der Bruch erfolgte am Ende des voll eingeschraubten Gewindeteils, an einer Stelle, wo die Stehbolzen den geringsten Querschnitt und die grösste Kerbempfindlichkeit aufweisen.
- An den abgebrochenen Reststücken dieser Stehbolzen, die sich noch in den Gewinden im Zylinderkopf aus Aluminium befanden, war keine Lockerung erkennbar.
- An der Innenseite des Ventildeckels (Kipphebeldeckel) und an diversen Teilen der Mechanik des Auslassventils wurden diverse Kontaktschäden festgestellt (vgl. Abbildung 4).
- Die Stosstange des Einlassventils war gekrümmt.
- Die Stosstange des Auslassventils war unbeschädigt.

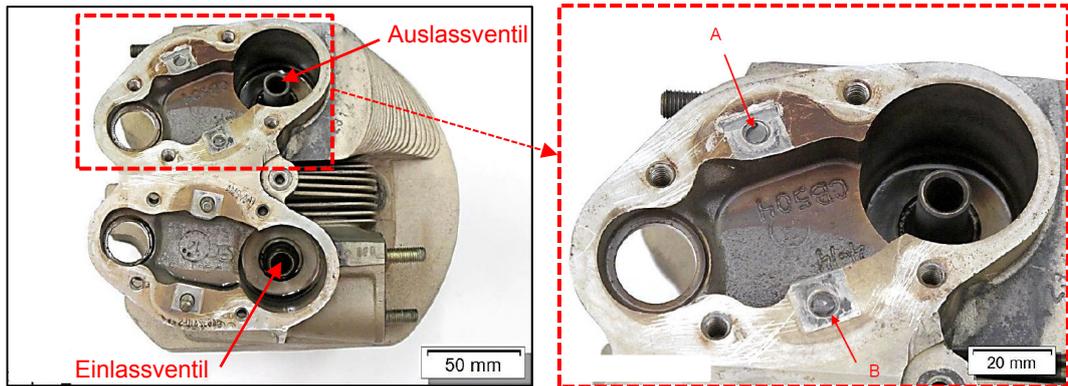


Abbildung 3: Ansicht des Zylinders Nr. 6 ventilseitig; der rot umrandete Bereich mit den beiden gebrochenen Stehbolzen A (aussen) und B (innen) des Auslassventils ist rechts vergrössert dargestellt.

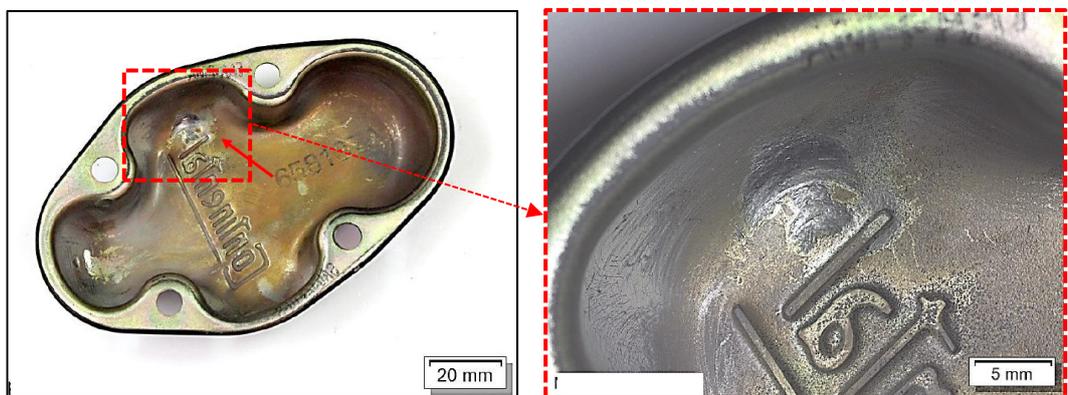


Abbildung 4: Innenseite des Auslassventildeckels mit Kontaktschäden (roter Pfeil); der rot umrandete Bereich ist rechts vergrössert dargestellt.

Der Auslassventildeckel des Zylinders Nr. 6 sowie der Kipphebel mit allen Einzelteilen ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Bezeichnungen der einzelnen Teile sind in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich:

Teil	Englische Bezeichnung	Beschreibung
A	<i>Stud.25-20-28X1.41#401850 outside</i>	Abgebrochener Teil des Stehbolzens aussen
B	<i>Stuc.25-20-28X1.41#401850 inside</i>	Abgebrochener Teil des Stehbolzens innen
C	<i>Rocker assy-valve</i>	Kipphebel
E	<i>Shaft-valve rocker</i>	Kipphebelachse mit Laufspuren
H	<i>Retainer-R/arm thrust outside</i>	Klemmstück für Kipphebelachse aussen
J	<i>Retainer-R/arm thrust inside</i>	Klemmstück für Kipphebelachse innen
K	<i>Washer-tab .26 diameter outside</i>	Unterlegescheibe aussen
L	<i>Washer-tab .26 diameter inside</i>	Unterlegescheibe innen
M	<i>Nut-plain outside</i>	Sechskantmutter aussen
N	<i>Nut-plain inside</i>	Sechskantmutter innen
O	<i>Cover-valve rocker</i>	Innen beschädigter Ventil- resp. Kipphebeldeckel

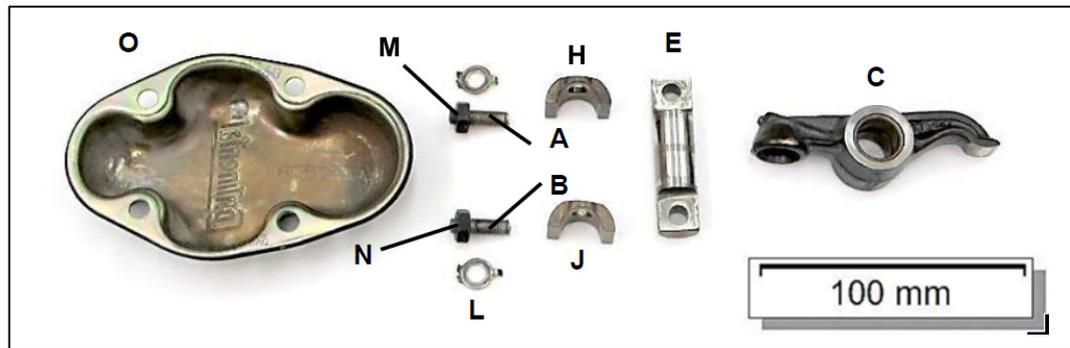


Abbildung 5: Auslassventildeckel mit Kipphebel und Einzelteilen des Zylinders Nr. 6

1.5 Versuche und Forschungsergebnisse

1.5.1 Metallkundliche Untersuchungen

Die beiden Bruchflächen wurden im Labor mit dem Raster Elektronen Mikroskop (REM) untersucht. Mit dieser Untersuchung lässt sich eindeutig feststellen, ob es sich um einen Schwingbruch, umgangssprachlich unter dem Begriff Ermüdungsbruch bekannt, oder um einen Gewaltbruch handelt.

Gemäss den Untersuchungsergebnissen handelte es sich beim Bruch des inneren Stehbolzens um einen Schwingbruch, wogegen der äussere Stehbolzen durch einen Gewaltbruch versagte.

Zusätzlich wurden weitere Bauteile der beiden gebrochenen Schraubverbindungen untersucht. Zum Vergleich dieser Testresultate wurden Bauteile der Schraubverbindung des benachbarten, nach dem schweren Vorfall intakten Einlassventils desselben Zylinders untersucht. Die Festigkeit und die chemische Zusammensetzung des Materials des gegossenen Zylinderkopfes wie auch des Klemmstückes wurden ebenfalls im Labor bestimmt.

Mit dem Vickers Härteprüfverfahren⁷ wurden die beiden abgebrochenen Stehbolzenteile, wie auch der vom selben Zylinderkopf demontierte und intakte Stehbolzen des Einlassventils untersucht. Mit demselben Verfahren wurden die drei für die Montage verwendeten Unterlegescheiben und Muttern untersucht.

Gemäss den Messresultaten sind die Festigkeitswerte der drei Stehbolzen identisch. Dasselbe wurde auch bei den Unterlegescheiben und den Muttern festgestellt. Keines der geprüften Bauteile wies eine ungenügende Festigkeit auf.

Gemäss der chemischen Analyse des Materials des Zylinderkopfes wie auch der Klemmstücke entsprechen die gemessenen Festigkeitswerte diesen Materialien; eine ungenügende Qualität respektive Festigkeit kann ausgeschlossen werden.

1.5.2 Spurenkundlicher Abgleich

Im Bereich der abgebrochenen Stehbolzen wurden folgende Beschädigungen festgestellt:

- Der Ventil- resp. Kipphebeldeckel wies einen plastisch deformierten Eindruck verursacht durch die Stirnfläche des inneren Stehbolzens auf (vgl. Abbildung 4). Der Eindruck war gut sichtbar und passte deckungsgleich zu dieser Stirnfläche.

⁷ Härteprüfung, Eindringen eines Prüfkörpers nach dem Vickers-Verfahren

- Der Nocken der Unterlegescheibe für die Montage der Kipphebelachse mit dem inneren Stehbolzen war abgebogen. Durch diesen Nocken wird verhindert, dass sich die Unterlegescheibe bei der Montage verdrehen kann.
- Markierungen auf der Innenseite des Ventil- resp. Kipphebeldeckels deckten sich mit Markierungen am Kipphebelende.
- Im unmittelbaren Klemmbereich des äusseren Stehbolzens war die Kontaktfläche des Zylinderkopfes schräg eingedrückt (vgl. Abbildung 6). Dieser schräge Eindruck stammte von einer entsprechend positionierten Kipphebelachse.
- Bei der inneren Befestigung der Kipphebelachse wiesen die Klemm- resp. Kontaktflächen Schlagverschleiss, Kavitationsverschleiss, Tribooxidation⁸ und zum Teil adhäsive Belegungen auf.
- Das innere abgebrochene Stehbolzenstück wies massive Oberflächenschäden auf (vgl. Abbildung 7). Solche Schäden werden durch ein schwingendes Gegenstück verursacht.

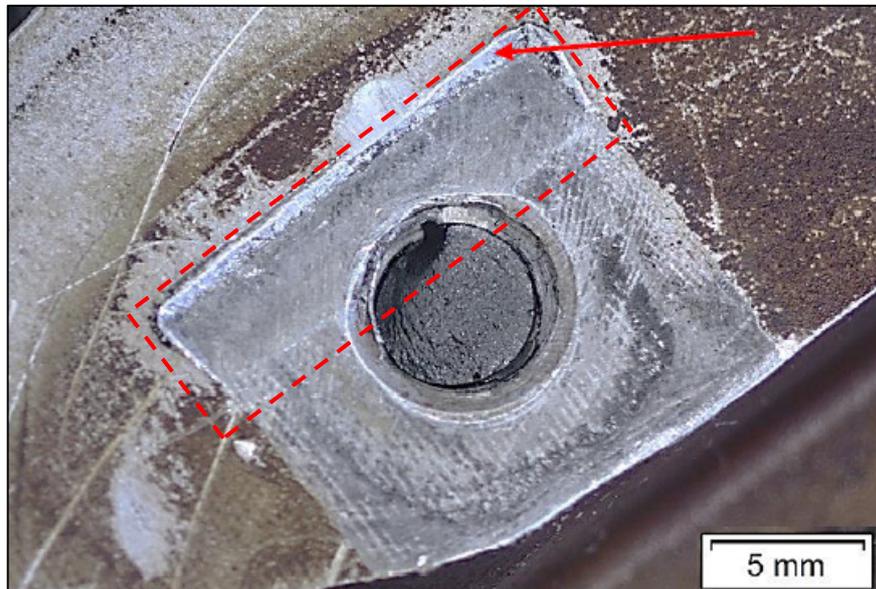


Abbildung 6: Kontaktfläche des Zylinderkopfes im Klemmbereich des äusseren Stehbolzens mit dem schräg verlaufenden Eindruck (roter Pfeil und Umrandung)

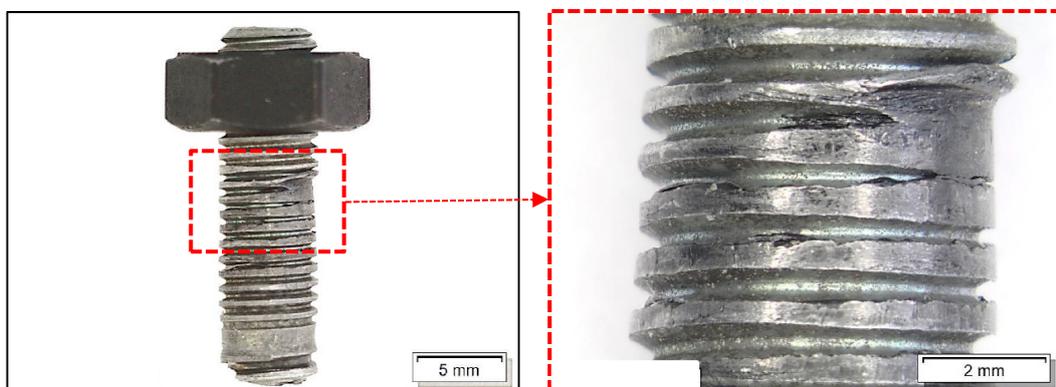


Abbildung 7: Inneres abgebrochenes Stehbolzenstück mit starken Oberflächenschäden

⁸ Tribooxidation (Reaktionsschichtverschleiss) bezeichnet die Bildung von Zwischenschichten, z.B. Oxidschichten, infolge chemischer Reaktion und ihre Zerstörung durch Bewegung der Bauteile.

1.5.3 Untersuchung der Stossstange des Einlassventils

Die gekrümmte Stossstange des Einlassventils des Zylinders Nr. 6 wurde untersucht. Die kritische Knicklast, bei der diese Stossstange gekrümmt wird, beträgt 7.2 kN. Bei einem nicht öffnenden Auslassventil wird die Stossstange mit einer Druckkraft von zirka 10.0 kN beansprucht. Dieser Wert basiert auf einem Zylinder-Innendruck von 60 bar.

1.6 Montage des Motors beim Motorenhersteller

1.6.1 Einbau der Stehbolzen

Die Stehbolzen wurden vom Motorenhersteller mit einem Montagegerät mit festgelegtem Drehmoment in den Zylinderkopf eingeschraubt. Die aufgezeichneten Drehmomentenverläufe, die auf dem Dokument *Torque Signature and Bolt Stretch Report* ersichtlich sind, zeigten keine Auffälligkeiten.

1.6.2 Einbau der Kipphebel

Die Kipphebel wurden beim Motorenhersteller von Hand eingebaut und die Muttern auf den Stehbolzen mit einem definierten Drehmoment festgezogen. Die Montage der Kipphebel wurde auf dem Dokument *Build Record Excerpt* ausgewiesen (siehe Abbildung 8). Darauf ist ersichtlich, dass das Festziehen der Muttern (Arbeitsschritte 9 bis 11) und die Nachkontrolle des Anzugsdrehmomentes (Arbeitsschritt 14) unter Verwendung der gleichen Stempelnummer abgeschrieben wurden. Nach Aussage des Motorenherstellers sei jede Stempelnummer eindeutig einer einzelnen Person zugeordnet.

Ausserdem ist gemäss *Build Record Excerpt* vorgeschrieben, dass die Überprüfung des Anzugsdrehmomentes durch eine andere Person ausgeführt werden muss: „*Re-torque to be performed by a different assembler than in instruction #9*“.

Engine S/N: 1010301		Spec/Assy#: R-TSI0360FB1B		Graphics Ref#:			
Operation#: 160		Revision#: 101		Rev Date: 12/02/2013			
Item	Part Number	Qty	Nomenclature	TItem	Tool Part#	Tool Name	
152	631996	24	RETAINER-R/ARM THRUST				
153	501867	24	WASHER-TAB .26 DIA ID				
154	646605	24	NUT-PLAIN				
160-01 (Cont'd)				Torque/Measurement		Perf	Vrfy
9. INSTALL ROCKER SHAFT RETAINERS ◀P-152▶ ON EACH END OF ROCKER SHAFT.							
10. SECURE THE ROCKER ASSEMBLY TO THE CYLINDER BY USING TAB WASHERS ◀P-153▶ AND NUTS ◀P-154▶. LUBRICATE NUTS WITH GRADE 50 MHS 27 OIL.							
11. TORQUE NUTS.				110-120 INCH POUNDS		40210	
12. VERIFY VALVE DRY LASH WITH PISTON ON TOP DEAD CENTER.				0.060-0.200 INCHES			40210
13. REPLACE PUSH ROD WITH P030 PUSH ROD IF DRY LASH EXCEEDS .200 INCH.							
14. RE-TORQUE NUTS TORQUED IN INSTRUCTION #9. RE-TORQUE TO BE PERFORMED BY A DIFFERENT ASSEMBLER THAN IN INSTRUCTION #9.						40210	
15. CAUTION: DO NOT OVER OR UNDER TORQUE NUTS TO ALIGN TAB WASHERS. REPLACE NUTS AND RE-TORQUE NUTS TO OBTAIN PROPER ALIGNMENT.							MAY 04 2014
16. SAFETY LOCK TABS IN ACCORDANCE WITH AS567.							

Abbildung 8: Auszug aus dem *Build Record Excerpt* des in der HB-PGF eingebauten Motors

2 Analyse

2.1 Technische Aspekte

2.1.1 Bruch der Stehbolzen

Nach der Landung wurde der nicht blockierte Motor in der HB-PGF untersucht. Bei der Demontage der Ventildeckel bei Zylinder Nr. 6 wurde beim Auslassventil festgestellt, dass die beiden Stehbolzen gebrochen waren. Mit diesen Stehbolzen wird die Kipphebelachse an den Zylinderkopf montiert. Dieses Versagen hatte zur Folge, dass das Auslassventil nicht mehr geöffnet wurde, wodurch der Motor deutlich an Leistung einbüsste, vibrierte und unrund lief.

Nach dem Bruch der beiden Stehbolzen wurde die Kipphebelachse samt Kipphebel über die Stossstange durch den Steuernocken der Nockenwelle hin und her bewegt. Dabei entstanden auf der Ventildeckel-Innenseite und am Kipphebel die vorgefundenen Markierungen. Dieser Prozess wurde vom Piloten als ratterndes Motorengeräusch wahrgenommen.

Die Festigkeit der gebrochenen wie auch diejenige der demontierten, intakten Stehbolzen wurde mit dem Vickers-Härteprüfverfahren im Labor ermittelt. Die Festigkeit der dazugehörigen Unterlegescheiben und Muttern wurde mit demselben Verfahren bestimmt. Keines der geprüften Bauteile wies eine ungenügende Festigkeit auf. Der Zylinderkopf aus einer Aluminium-Gusslegierung sowie auch die bei der Montage verwendeten Klemmstücke entsprachen hinsichtlich Festigkeit und chemischer Zusammensetzung üblichen Werten. Aus den vorgenannten Untersuchungen kann ein Materialfehler ausgeschlossen werden.

Die Dauerhaltbarkeit einer dynamisch beanspruchten Schraubverbindung ist abhängig von der Vorspannung, d.h. von der Elastizität der Schraube resp. des Stehbolzens, der geklemmten Teile, dem Anziehmoment sowie der Art und Grösse der Beanspruchung. Schrauben und Stehbolzen, welche nicht ausreichend vorgespannt montiert werden, weisen bei dynamischer Beanspruchung eine ungenügende Dauerhaltbarkeit auf; es kommt zu einem Bruch des Bolzens infolge Ermüdung.

Beim Bruch des inneren Stehbolzens handelte es sich eindeutig um einen Schwingbruch. Die Klemm- resp. Kontaktflächen dieser Schraubverbindung wiesen Schlagverschleiss, Kavitationsverschleiss, Tribooxidation und zum Teil adhäsive Belegungen auf (vgl. Kapitel 1.5.2), was alles auf Mikrobewegungen in diesen Flächen schliessen lässt. Solche Mikrobewegungen ergeben sich bei einer ungenügenden Klemmkraft einer Verschraubung und dynamischer Beanspruchung. Die Oberflächenschäden am Gewinde des abgebrochenen inneren Stehbolzenstücks wurden durch das schwingende Gegenstück, d.h. das eine Ende der Kipphebelachse verursacht. Dies und der abgebogene Nocken der Unterlegescheibe für die Montage weist ebenfalls darauf hin, dass die Schraubverbindung vor dem Bruch des Stehbolzens locker war.

Ursächlich für das Versagen des inneren Stehbolzens war ein ungenügendes Anziehen der Mutter bei der Montage der Kipphebelachse. Dieser Montagefehler hatte eine ungenügende Klemmkraft dieser Verschraubung zur Folge. Es kam im Betrieb zu einer Lockerung und zum anschliessenden Bruch der Schraubverbindung.

Beim Bruch des äusseren Stehbolzens handelte es sich um einen Gewaltbruch. Hinweise für eine allfällige Ermüdung fehlten. Nach dem Versagen des inneren Stehbolzens war die Kipphebelachse nur noch am äusseren Ende mit dem Zylinderkopf verschraubt. Dies hatte zur Folge, dass diese Verschraubung durch die dabei entstandene Hebelwirkung extrem beansprucht wurde. Es kam zum Bruch

des äusseren Stehbolzens. Dabei wurde der äusserste Teil der Auflagefläche der Kipphebelachse plastisch schräg in den Zylinderkopf eingedrückt. Der Bruch des äusseren Stehbolzens ist auf das Versagen des inneren Stehbolzens zurückzuführen.

Die Untersuchungen ergaben im Weiteren, dass sich die in den Zylinderkopf eingeschraubten Gewindeenden der Stehbolzen nicht gelockert hatten. Daraus lässt sich ableiten, dass ein unsachgemässes Einschrauben der Stehbolzen in den Zylinderkopf ausgeschlossen werden kann.

2.1.2 Beurteilung der gekrümmten Stossstange des Einlassventils

Im Betrieb wird das Einlassventil vom entsprechenden Nocken der Nockenwelle über die Stossstange und den Kipphebel geöffnet. Die Kraft, mit der dabei die Stossstange auf Druck beansprucht wird, ergibt sich aus der Kraft der Ventiltfeder und dem Gegendruck im Zylinder. Im Normalbetrieb ist dieser Gegendruck gering. Öffnet das Auslassventil nicht, wird der Gegendruck im Zylinder extrem hoch, was dazu führt, dass die Stossstange beim Öffnen des Einlassventils übermässig auf Druck beansprucht und demzufolge gekrümmt werden kann.

Aus den Berechnungen geht hervor, dass die Druckbeanspruchung der Stossstange des Einlassventils bei einem nicht öffnenden Auslassventil zu gross war. Die Verkrümmung der Stossstange des Einlassventils ist folglich auf das Nichtöffnen des Auslassventils zurückzuführen, was durch den Bruch der beiden Stehbolzen bedingt war.

2.2 Menschliche und betriebliche Aspekte

2.2.1 Flugführung

Für den Piloten war das sich anbahnende Versagen des Ventilkipphelms, das zu einem Leistungsabfall des Motors führte, nicht erkennbar.

Der Entscheid, nicht das näher gelegene Bad Ragaz mit seiner kurzen Piste und Hindernissituation anzufliiegen, sondern dem Rheintal mit seinen verschiedenen Notlandemöglichkeiten bis nach St. Gallen-Altenrhein zu folgen, ist nachvollziehbar und war umsichtig.

2.2.2 Montage des Motors beim Hersteller

Das ungenügende Anziehmoment der Mutter, das ursächlich für das Versagen des inneren Stehbolzens des Kipphebels war, war bei der Montage des Motors beim Hersteller nicht erkannt worden. Das Vieraugenprinzip, das gemäss Nachweisdokumentation für die Montage dieser Muttern vorgeschrieben ist, war im vorliegenden Fall offensichtlich nicht angewandt worden.

3 Schlussfolgerungen

3.1 Befunde

3.1.1 Technische Aspekte

- Das Flugzeug war zum Verkehr nach VFR und IFR zugelassen.
- Masse und Schwerpunkt des Flugzeuges befanden sich zum Zeitpunkt des schweren Vorfalls innerhalb der gemäss AFM zulässigen Grenzen.
- Am 22. Mai 2014 wurde der Motor einer Grundüberholung durch den Motorenhersteller unterzogen.
- Die letzten Unterhaltsarbeiten wurde im Rahmen einer 100 h Kontrolle am 7. September 2016 bei 681:53 h TSN des Motors ausgeführt.
- Beim Zylinder Nr. 6 des Motors erlitt ein Stehbolzen zur Befestigung eines Ventilkipphebels einen Schwingbruch mit geringem Restbruchanteil.
- Das Auslassventil des Zylinders öffnete nicht mehr, was einen hohen Gegen- druck im Zylinder zur Folge hatte. Dies führte zu einem überproportionalen Abfall der Motorleistung.

3.1.2 Besatzung

- Der Pilot besass die für den Flug notwendigen Ausweise.
- Es liegen keine Anhaltspunkte für gesundheitliche Beeinträchtigungen des Piloten während des Vorfalles vor.

3.1.3 Flugverlauf

- Um 10:59 Uhr startete der Pilot mit zwei Passagieren an Bord mit dem Leichtflugzeug des Musters Piper PA-28RT-201T, eingetragen als HB-PGF, auf dem Flughafen Basel-Mulhouse zu einem Privatflug zum Flugplatz Samedan.
- Um 12:02 Uhr auf einer Flughöhe von 10 100 ft AMSL über der Lenzerheide verlor der Motor an Leistung und das Flugzeug fing an zu vibrieren.
- Der Pilot vernahm ein ratterndes Geräusch aus dem Motorenraum und stellte einen Abfall der Motorleistung fest.
- Er entschied sich, zum Flugplatz St. Gallen-Altenrhein auszuweichen.
- Mit der reduzierten Motorleistung konnte der Pilot das Flugzeug im Sinkflug mit einer durchschnittlichen Sinkrate von 200 Fuss pro Minute steuern.
- Um 12:28 Uhr landete die HB-PGF nach einem Direktanflug auf der Piste 28 in St. Gallen-Altenrhein.

3.1.4 Rahmenbedingungen

- Das Wetter hatte keinen Einfluss auf die Entstehung des schweren Vorfalls.
- Das vorgesehene Vieraugenprinzip für die Montage der auf den Stehbolzen aufzuschraubenden Muttern wurde gemäss Nachweisdokumentation nicht angewandt.

3.2 Ursachen

Der schwere Vorfall bestand aus einem Leistungsabfall des Motors und ist darauf zurückzuführen, dass in Folge eines Montagefehlers die Befestigung des Kiphebels des Auslassventils in einem Zylinder versagte, wodurch das Auslassventil nicht mehr öffnete.

- 4 Sicherheitsempfehlungen, Sicherheitshinweise und seit dem schweren Vorfall getroffene Massnahmen**
- 4.1 Sicherheitsempfehlungen**
Keine
- 4.2 Sicherheitshinweise**
Keine
- 4.3 Seit dem schweren Vorfall getroffene Massnahmen**
Keine

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, 26. April 2018

Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle