A380-Unfall über Singapore

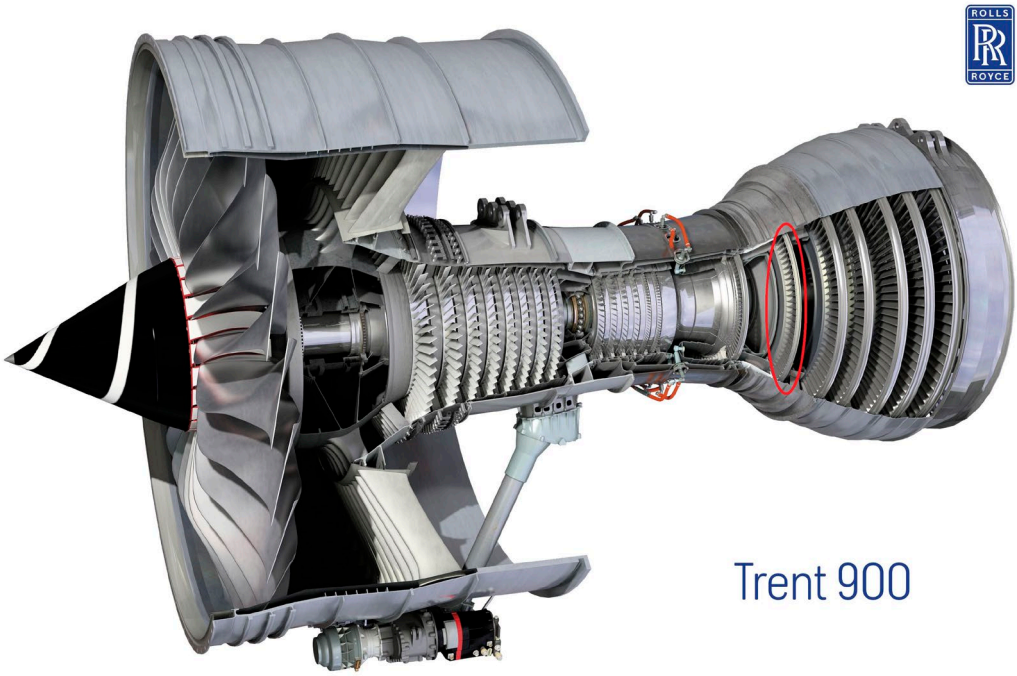
Teil 2

Die Ergebnisse der Untersuchungskommission und die Folgen des Unfalls

Am 4. November 2010 explodierte kurz nach dem Start in Singapore das Triebwerk #2 eines Qantas A380. Lesen Sie hier, was die australische Untersuchungskommission herausgefunden hat. Der Unfall hatte gravierende Auswirkungen für Qantas, die A380-Flugzeuge, für Rolls-Royce und für Airbus. In Singapore stand das durchsiebte Wrack der Maschine. Qantas entschied, dieses Flugzeug wiederaufzubauen. Dabei wurden Risse in den Flügeln gefunden, die weltweit Inspektionen und extrem teure Modifikationen an allen A380 erforderten …

Full Stop nach dem großen Knall

Im ersten Teil dieses Artikels konnten Sie lesen, wie sich der Motorausfall am 4. November 2010 über Singapore im Cockpit anfühlte und wie es der Qantas Crew gelang, das schwer beschädigte Flugzeug wieder auf die Erde zu bringen, ohne dass jemand dabei zu Schaden kam.



Die Explosion dieses Triebwerks hätte den Qantas A380 beinahe vom Himmel geholt. Vom Autor rot markiert: Die Intermediate Pressure (IP) Turbine, die sich bei dem Unfall so ganz anders und viel giftiger verhalten hat, als in den Design-Analysen vorhergesagt worden war. 2019 Rolls-Royce Cutaway Poster Trent 900

Dabei hatte der Engine Failure durchaus das Potenzial gehabt, das Flugzeug mit Mann und Maus zum Absturz zu bringen. Die erfreuliche Tatsache, dass niemand an Bord verletzt oder getötet wurde, hing von den Flugbahnen der zerstörten Turbinenscheibe ab, die nur zufällig den Rumpf des Flugzeugs verfehlten.

Irgendetwas war hier gründlich schiefgegangen. So hatte sich Airbus einen „Engine Failure“ auf dem A380 ganz bestimmt nicht vorgestellt. Bei jedem Flugunfall gehen Hersteller und Betreiber umgehend in sich und fragen: „Was genau ist passiert? Sind unsere Flugzeuge noch sicher?“

Diese Frage stellte sich auch das Qantas Top Management in Sydney, Australien. In der Qantas Verkehrszentrale (Integrated Operation Center – IOC) liefen die ersten ECAM-Fehlermeldungen in der Sekunde der Explosion über Satellit direkt aus den Bordcomputern ein. Die Wartungsabteilung erhielt in Real-Time noch viel mehr Triebwerksdaten, als sie den Piloten im Cockpit angezeigt wurden. Mit der Nase so dicht an der Quelle ist es nicht verwunderlich, dass Qantas noch vor Airbus und Rolls-Royce reagierte – und noch bevor die Unfallermittler aus den Betten geholt wurden.

Kurz nachdem Qantas vom uncontained engine failure des A380 erfuhr, stellte die Airline den weiteren Betrieb aller verbliebenen A380 sofort ein. Jeder A380 blieb dort stehen, wo er gerade war. Man wollte erst mehr über die genauen Umstände des Unglücks, vor allem aber über die Ursache herausfinden. Der Kapitän des Unfallflugzeugs, Richard de Crespigny, erfuhr davon – wie im ersten Teil berichtet – aus dem Fernsehen im Warteraum in Singapore, wo er seinen verstörten Passagieren nach dem Flug erklärte, was passiert war.

Auch Rolls-Royce war schnell mit einer Reaktion. Noch am Unfalltag, dem 4. November 2010, gab es das „non-modification service bulletin“ (NMSB) 72-G589. Danach mussten weltweit alle Trent 900 Triebwerke „on wing“, also an den A380 Flügeln, vor dem nächsten Flug umfassend kontrolliert werden. Neben anderen Checks sollten die Turbinenschaufeln überprüft werden und vor allem der Bereich um die Lager der high pressure/intermediate pressure (HP/IP) Turbine. Auch sollte auf Ölspuren im Hohlraum zwischen den beiden Lagern geachtet werden. Rolls-Royce sollte über das Ergebnis der Checks umgehend informiert werden.

Die Zulassungsbehörden waren an dem Tag wohl noch nicht richtig wach gewesen. Sonst wäre Rolls-Royce vielleicht nicht mit einem Bulletin durchgekommen, das lediglich eine Überprüfung vorsah, aber den weiteren Betrieb völlig unabhängig von den Befunden erlaubte. Flugverbote bei Ölfunden im Motor kamen erst später.

Persönliche Auswirkungen auf den Autor

Bei der Arbeit an diesem Artikel war ich überrascht, wie schnell ich damals selbst auf den Unfall reagiert hatte. Themen der Flugsicherheit haben mich Zeit meiner langen Laufbahn als Verkehrsflugzeugführer immer besonders beschäftigt. Der Qantas-Unfall in Singapore jedoch hatte für mich zusätzlich noch eine andere Dimension: Er gefährdete unmittelbar meine fliegerische Laufbahn bei der Lufthansa. 2010 war ich im zehnten Jahr Kapitän auf Airbus A340 und A330. Im

Herbst 2011 wollte ich zum Kapitän auf den damals brandneuen Airbus A380 umschulen.
Der erste A380 wurde der Lufthansa am 19. Mai 2010 übergeben, danach folgten 2010 noch vier mehr. Im Jahr 2011 sollten vier weitere dazukommen, die restlichen sollten 2012 und 2013 folgen. Für die Einführungsphase des Flugzeugs sollten bis Ende 2011 nur die erfahrensten Kapitäne und Copiloten vom A340 umgeschult werden. Ab 2012 sollten dann nur noch Piloten von der Kurzstrecke auf den A380 kommen.
Ich hätte vom ersten Tag an auf dem A380 dabei sein können. Aber ich hatte schon eine Flugzeugeinführung hinter mir: 1989 flog ich als Copilot auf dem damals ebenso brandneuen Jumbo, der Boeing 747-400. Bis genügend Mechaniker und Piloten auf dem Teil geschult worden waren, gingen die ersten 747-400 Flüge zwischen den Werftstandorten Frankfurt und Hamburg hin und her. Mein erster Flug auf der 747-400 ging von Frankfurt zur Hannover Messe. Auf so einen Zirkus hatte ich auf dem A380 keine Lust.[1] Ich wollte die anderen Kollegen das Flugzeug warmfliegen lassen und dann im November 2011 auf den A380 umschulen.
Dann kam der 4. November 2010. Unglaublich schnell sickerten die Infos zu dem Qantas Unfall bis nach Europa durch. Die Lufthansa hatte dieselben Motoren am A380 hängen wie die Qantas, das Rolls-Royce Triebwerk Trent 900. Und da krabbelten schon am nächsten Tag die Lufthansa-Mechaniker dran herum. Das hat mir zu denken gegeben. Der Unfall in Singapore war ein besonders schwerwiegendes Ereignis gewesen. Was immer da als Ursache rauskommen würde, es wäre keine Kleinigkeit. Ich war mir sehr sicher, dass die Explosion bei der Qantas die Auslieferung neuer A380-Flugzeuge verzögern würde. Und damit würde die Umschulung im November 2011 wohl ausfallen. 2012 würde ich nicht mehr auf den A380 umschulen dürfen.
Also nahm ich die Sperre in meiner Bewerbung raus, um in die Umschulung im Februar 2011 zu kommen. Ich habe mir mal den alten Lufthansa-Ordner rausgeholt, um zu sehen, wie schnell ich auf den Qantas Unfall reagiert habe. Es ist erstaunlich: Am 4. November 2010 hatte die Qantas ihren spektakulären Engine Failure, und weniger als 72 Stunden später, am 7. November 2010, hatte ich die Zeichen an der Wand erkannt und meine Bewerbung auf den A380 vorgezogen.
Außerdem: Ein Flugzeug mit so einer Redundanz, das mit so vielen Schäden nicht vom Himmel fällt, das ist meins! Das will ich fliegen.
Im Februar 2011 kam ich auf den A380. Die Auslieferungen von Airbus verzögerten sich und die A380-Umschulungen im November 2011 wurden gestrichen …

UERF – der Super-GAU in der zivilen Luftfahrt

UERF steht für „Uncontained Engine Rotor Failure“, also ein Versagen eines Rotors im Triebwerk, egal ob Verdichterstufe oder Turbine, bei dem die Trümmer nicht im Triebwerk selbst aufgehalten werden, sondern das Triebwerk durchschlagen. Diese „uncontained“ herumfliegenden Teile können dann schwere Schäden am Flugzeug erzeugen

1) Ein solcher „Zirkus“ wurde mit dem A380 nicht gemacht. Die Maschine ging gleich nach Auslieferung auf Langstrecke.

und manchmal auch eine Maschine zum Absturz bringen.
Ein Uncontained Engine Rotor Failure im Rolls-Royce Trent 900 Triebwerk des Fluges QF32 hat alle weiteren Schäden am Qantas A380 verursacht.

Nun ist es so, dass bei einem Flugzeug so einiges kaputtgehen kann. Das haben Sie sicher selbst an Ihrem Flugzeug schon einmal erlebt. Einige Bauteile jedoch dürfen „nie“ versagen. So muss das Design eines Flugzeugs den Bruch einer Tragfläche ausschließen.
Auch moderne Strahltriebwerke müssen so entworfen sein, dass ein katastrophales Versagen – wie es ein „Uncontained Engine Rotor Failure“ sein kann – nach menschlichem Ermessen ausgeschlossen ist. Die Wahrscheinlichkeit dafür darf nicht höher sein als 10^{-8} je Betriebsstunde, oder ein Ereignis in 100.000.000 Stunden Triebwerkslaufzeit.

Dennoch passieren ab und zu Unfälle, bei denen genau solche lebenswichtigen Bauteile ausfallen. So brach 2002 bei einem C130 Wasserbomber bei einem Feuerlöscheinsatz die Tragfläche. 2018 verlor eine PA28 Arrow bei einem Trainingsflug einen Flügel.[2] In beiden Fällen spielten Ermüdungsbrüche eine Rolle.
Auch UERF Events hat es leider schon gegeben. Hauptsächlich bei Strahltriebwerken der ersten und der zweiten Generation. Der bekannteste Unfall nach einem UERF Event dürfte die Notlandung einer DC-10 auf dem

2) Links zu beiden Unfällen am Ende des Artikels

Eine erste äußerliche Begutachtung des Trent 900 Motors zeigte: Der komplette Rotor der IP-Turbine fehlte. So etwas hätte niemals passieren dürfen. **ATSB Australia**

Sioux Gateway Airport, Iowa, am 19. Juli 1889 gewesen sein. Im Reiseflug hatte ein Rotor im Mitteltriebwerk versagt und alle Hydrauliksysteme zerstört. Die Crew schaffte es, das Flugzeug nur mit den verbliebenen Triebwerken so zu steuern, dass sie den Flughafen erreichen konnten. Bei dem Crash der DC-10 auf der Runway kamen 111 Personen ums Leben, viele andere wurden verletzt.[3]

Der Uncontained Engine Rotor Failure beim Flug QF32 war das erste UERF Event bei einem modernen Triebwerk der dritten Generation.

Die Entwicklung eines modernen Strahltriebwerks ist unermesslich teuer. Viele Millionen Euro werden alleine für Tests ausgegeben, die nachweisen, dass es zu keinem UERF Event kommen kann. Vielleicht haben Sie schon einmal das Video des sog. Blade-off Tests gesehen. Dabei wurde ein komplettes Trent 900 Triebwerk (15 Millionen Dollar) auf einem Teststand geopfert, um zu zeigen, dass das Versagen einer der großen Fan-Schaufeln nicht zu einem katastrophalen UERF Event führt, sondern die Trümmer im Triebwerk gefangen (contained) bleiben. Dazu wird bei voller Triebwerksleistung ein Fan-Blade abgesprengt. Den Link zu diesem teuersten Rolls-Royce-Test finden Sie am Ende des Artikels.
Bei den anderen Rotoren im Motor werden solche Full-Scale-Tests nicht gemacht. Denn einen Rotor Burst einer Turbinenscheibe kann nichts aufhalten. Die Trümmer gehen – wie bei beim Qantas A380 – durch das Flugzeug wie durch Butter. Für diese Rotoren muss konstruktiv ausgeschlossen werden, dass sie bei Triebwerksversagen zerstört werden. Dazu muss erst mal herausgefunden werden, bei welcher Drehzahl sie zerbrechen. Das erfordert viele einzelne Test. Erst einmal wird durch Leistungsbegrenzungen erreicht, dass die einzelnen Rotoren niemals auch nur in die Nähe ihrer maximalen Drehzahl kommen. Engine-Failure-Szenarien werden in Einzeltest und – wo das nicht möglich ist – durch Computersimulationen und -analysen erforscht.
Bei der Intermediate Pressure (IP) Turbine des Trent 900 Motor war man sich durch Versuche am Vorgängermodell und durch die erwähnten Analysen sicher, dass der Rotor beim Bruch der Welle niemals seine Bruch-Drehzahl erreichen würde. Die Gründe für diese Überzeugung waren:

- Bei Abkopplung der IP-Turbine von der Welle würde der Kompressor vorne im Motor einen Stall erleiden. Dadurch würde sofort die Strömung zur Turbine zusammenbrechen.
  Beim Bruch des Rotors von der Welle würde der Rotor nach hinten in den Motor rutschen und dort durch die starke Reibung an den dahinterliegenden Bauteilen sofort an Drehzahl verlieren.

So kann man sich irren …

Nicht nur der Triebwerkshersteller muss sich beim Design des Motors mit dem Thema UERF beschäftigen. Auch der Flugzeugbauer, in diesem Fall Airbus, muss das tun. Da die Erfahrung zeigt, dass es früher immer mal wieder einen Uncontained Engine Rotor Failure gegeben hat, muss diese sehr seltene Fehlermöglichkeit beim Bau eines Flug-

3) Links zu diesem Unfall ebenfalls am Ende des Artikels

zeugs berücksichtigt werden. Dazu gibt es von der FAA und auch den europäischen Zulassungsbehörden Guidelines, die beachtet werden müssen. Die Dokumente, die Airbus beim A380 berücksichtigt hatte, erschienen unter dem Titel „Design Considerations for Minimizing Hazards Caused by Uncontained Turbine Engine and Auxiliary Power Unit Rotor Failure“.

Hier einige Highlights aus dem Dokument, wie sie auch im Unfallbericht zitiert wurden:

„The practical design considerations included the placement of critical components, where practicable, outside of the areas subject to UERF debris. Where this is not practical, the designers were to reduce the risks by practices such as system multiplication, redundant multipath wiring and the use of shielding from the airframe or supplemental shielding. Specific accepted design precautions included:

- *Fire warning and extinguishing systems. Following a UERF event, the fire warning systems of all engines should continue to be operational and the extinguishing systems of the remaining engines should also remain operational.*
- *Flammable fluid shut-off valve. The guidance identified that the only effective means of extinguishing an uncontrolled engine fire following a UERF event may be to shut off the supply of all flammable fluid to that engine. Therefore, the operation of the isolation valves for fuel and hydraulic fluids should be assured. This required the designer to locate these isolation valves outside of the UERF impact areas for an engine, and ensure that any valve actuation controls that were routed through the impact areas were redundant and appropriately separated.“ (ATSB, Australia, Final Report)*

Vielleicht haben Sie während Ihrer Pilotenausbildung schon einmal von den sog. dry bays gelesen. Das sind Bereiche nahe dem Triebwerk im Flügel, in denen bewusst keine Tanks liegen, eben wegen der Risiken eines Rotor Bursts. Beim A380 gehören zu den Maßnahmen in diesem Zusammenhang die Trennung der wichtigsten Kabelstränge durch das Flugzeug in unterschiedliche Bereiche (z.B. im Flügel vor der Wing-Box und dahinter sowie im Rumpf in getrennten Bereichen. Sogar in der Passagierkabine sind wegen des UERF-Risikos die Versorgungsleitungen für den Passagier-Sauerstoff redundant auf der linken und auf der rechten Kabinenseite. Wenn eine Leitung durchtrennt ist, versorgt die andere immer noch alle Passagiere mit Sauerstoff.

Die Untersuchungskommission sucht die „smoking gun“

Der Löschschaum unter dem A380 in Singapore war noch nicht trocken, da war man schon bei der Arbeit, den Unfall des Qantas Airbus A380 zu untersuchen. Normalerweise ist nach den Regeln der ICAO der Staat für die Untersuchung zuständig, in dem der Unfall stattgefunden hat. In diesem Fall wäre das also Singapore gewesen. Der Staat, in dem das Flugzeug zugelassen wurde, darf mitmachen, ebenso der Staat, in dem das Flugzeug gebaut wurde.
Sehr schnell jedoch hat das kleine Land Singapore die Untersuchung des Unfalls an das Land abgegeben, in dem die Maschine

registriert war: an Australien. Das war sicher ein guter Zug, denn das Australian Transport Safety Bureau (ATSB) hat einen hervorragenden Ruf und ist eine gründliche Behörde. Ich habe schon etliche sehr gute Unfallberichte des ATSB gelesen. Der über den A380-Unfall gehört sicher dazu.
Der Qantas-Unfall wurde wegen seiner weltweiten Bedeutung sehr hoch gehängt. Deshalb arbeiteten bei der Unfalluntersuchung viele Organisationen mit: Die Civil Aviation Authority of Singapore (CAAS), Qantas, Airbus, Rolls-Royce, die EASA, die französische BEA, die UK CAA, die UK Air Accidents Investigation Branch und das Indonesian National Transportation Safety Committee.

Die erste Frage, die sich stellte, war: Was hat die Turbinenscheibe dazu veranlasst, das Triebwerk so eilig zu verlassen? Die wichtigsten Daten dazu waren zum Teil schon im Flug zum Zeitpunkt der Explosion über Satellit an die Maintenance der Qantas in Sydney übertragen worden. Andere Informationen fanden sich auf dem Flight Data Recorder. Erstmals 60 Sekunden vor der Explosion zeigte sich ein Problem in den Daten:

Actual time (UTC) hh:mm:ss	Time sequence	Comment
01:45:30	-15 min 37 sec	All four engines started and stabilised at idle and with an N1 of 17%.
01:55:00	-6 min 07 sec	Aircraft commences takeoff.
01:56:47	-4 min 20 sec	Aircraft airborne, No. 2 engine N1 at 79%.
01:59:07	-2 min 0 sec	Crew select CLIMB thrust setting. No. 2 engine N1 increases to about 86% within 13 seconds.
02:00:07	-60 sec	No. 2 engine turbine cooling air rear (TCAR) begins to rise in relation to the other engines (TCAR not displayed to crew)
02:00:15	-52 sec	No. 2 engine oil temperature and pressure values begin to diverge from the recorded values for the other engines.
02:00:58	-9 sec	No. 2 engine N3 starts to fluctuate and the N1 in that engine shows 87%.

Anatomie eines Triebwerksausfall anhand der FDR4 Daten: 60 Sekunden vor der Explosion zeigen sich die ersten ungewöhnliches Symptome ... ATSB Australia

Actual time (UTC) hh:mm:ss	Time sequence	Comment
02:01:01	-6 sec	No. 2 engine HP turbine vibrations peak in amplitude[76] and the N1 and N2 drop by about 1%. N3 in the No. 2 engine increases by about 3% and there is a large spike in turbine cooling air forward (TCAF) and TCAR.
02:01:03	-4 sec	No. 2 engine HP turbine vibrations rapidly decrease.
02:01:06	-1 sec	No. 2 engine N1 at 87%.
02:01:07	0 sec	Rapid and large reduction in the No. 2 engine N1 and N2 and a sudden and rapid drop in P30 in engine No. 2. Turbine disc separates from drive arm.
02:01:08	+1 sec	No. 2 engine oil pressure drops, TCAF peaks in temperature, No. 2 turbine overheat ECAM warning activates and N3 stabilises at 96%.
02:01:09	+2 sec	Master Warning and Caution activate in the cockpit.
02:01:11	+4 sec	No. 2 engine TCAR loss of signal, second drop in P30 (less than at t=0), N3. Disc burst.
02:01:17	+10 sec	No. 2 engine oil pressure decreases.
02:01:18	+11 sec	No. 2 engine oil quantity begins to decrease.
02:01:38	+31 sec	No. 2 engine thrust lever reduced to idle.
02:01:53	+46 sec	No. 2 engine thrust lever progressively advanced to half range.
02:02:08	+1 min 01 sec	No. 2 engine P30 increases.
02:02:20	+1 min 13 sec	No. 2 engine N3 and P30 peak then rapidly drops.
02:02:25	+1 min 18 sec	No. 2 engine fire ECAM warning.
02:02:39	+1 min 32 sec	No. 2 engine thrust lever reduced to idle.
02:03:21	+2 min 14 sec	No. 2 engine high pressure shut-off valve closed and engine shutdown.

Die Daten um 02:01:38 und um 02:01:53 zeigen die manuellen Thrust-Lever-Bewegungen des Kapitäns nach dem Autothrust-Ausfall, kurz vor dem Kommando „Start Procedure“. ATSB Australia

Eine rasche Temperaturerhöhung im Bereich vor der IP-Turbine sowie Fluktuationen in den Öl-Daten ließen schnell auf ein internes Feuer in Verbindung mit einem wie auch immer gearteten Ölproblem schließen. Offenbar waren es diese Daten, die Rolls-Royce zu dem ersten Service Bulletin bewegt haben. Operator sollten melden, wenn in diesem Bereich Ölspuren gefunden wurden.

Doch was hat die Temperaturerhöhung und die ungewöhnlichen Öldaten ausgelöst? Das ATSB Australia ließ dazu das, was von dem

Triebwerk übrig war, von einem zertifizierten Überholungsunternehmen vollständig zerlegen. Des Weiteren wurden die Trümmerteile, die auf der Insel Batam gefunden worden waren, eingesammelt und den Unfallexperten übergeben.

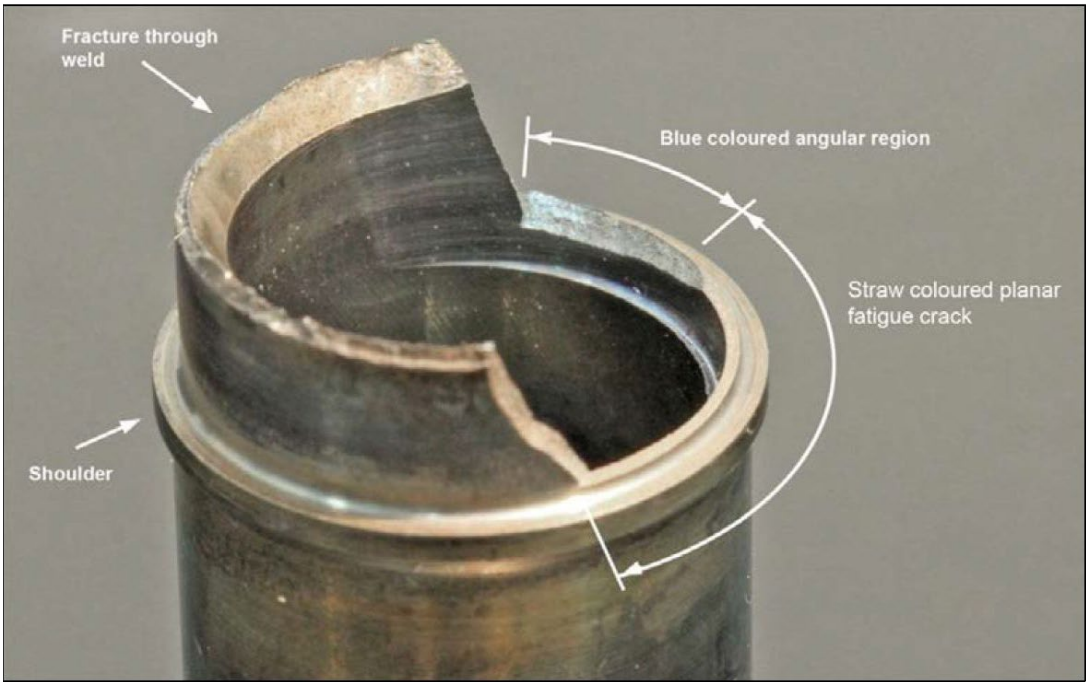
Die Ermittler hatten Glück. Ein wichtiges Beweisstück hatte sich nicht mit den anderen Trümmern vom Triebwerk verabschiedet. In dem schwer beschädigten Bereich vor der IP-Turbine fand man ein gebrochenes Öl-Rohr und darin eine ungewollt exzentrische Bohrung, die auf einen Fertigungsfehler hindeutete.

Damit und mit anderen Teilen, wie den zerstörten Labyrinth-Dichtungen und dem gefundenen IP-Turbine-Fragment, konnte eine Engine-Failure-Sequenz gefunden werden, die zu den FDR-Daten und den Beweisstücken passte.

In fünf Schritten zum Rotor Burst

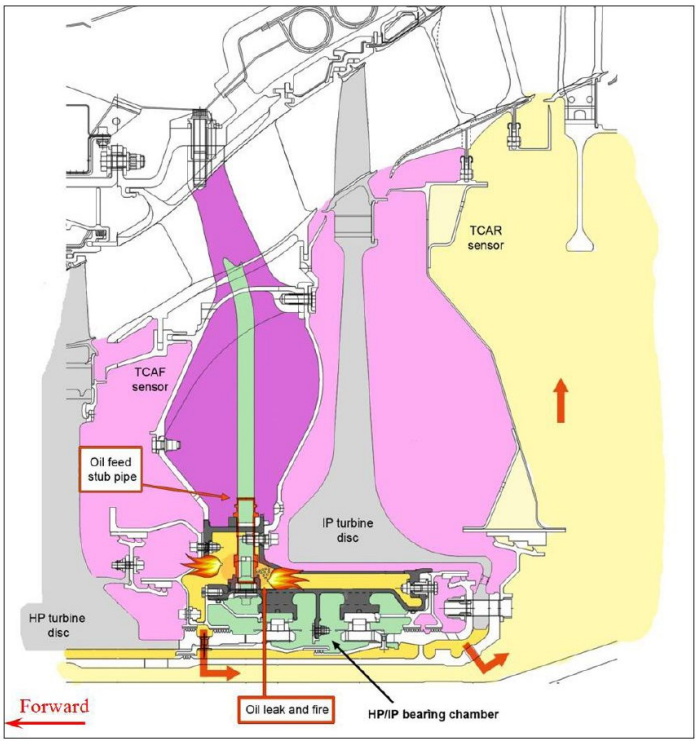
Die 60 Sekunden von der ersten Temperaturerhöhung im Inneren des Motors bis zum Rotor Burst hat das ATSB in fünf Phasen unterteilt, um die Abläufe verständlich zu machen.

1. Es tritt ein Ermüdungsbruch nahe der Rotorwelle in der sog. oil feed stub pipe ein, einem Verlängerungsstück der Ölleitung zu einem der Wellenlager. Dieses Rohrstück hat eine idealerweise konzentrische Gegenbohrung („counter bore“), die einen Ölfilter aufnahm. Bei diesem Rohrstück jedoch war die



Diese Ölleitung versorgte das Lager vor der IP-Turbine. Eine zu dünne Wandung an einer Stelle führte zu einem Ermüdungsbruch und dadurch zu einer Öl-Leckage. ATSB Australia

Gegenbohrung unbemerkt exzentrisch geraten, was zu einer reduzierten Wandstärke führte. An dieser Stelle führte der Ermüdungsbruch zu einem Spray von Öl in den heißen Zwischenraum („Buffer Space“). In diesem Bereich herrscht nach Angaben von Rolls-Royce normalerweise eine Temperatur von 365 bis 375 °C. Das synthetische Öl hat eine Auto-Ignition-Temperatur von etwa 280 °C. Es entzündete sich sofort.



Ein Öl-Feuer im „Buffer Space“ löst die Zerstörung des Trent 900 Triebwerks aus. ATSB Australia, Final Report

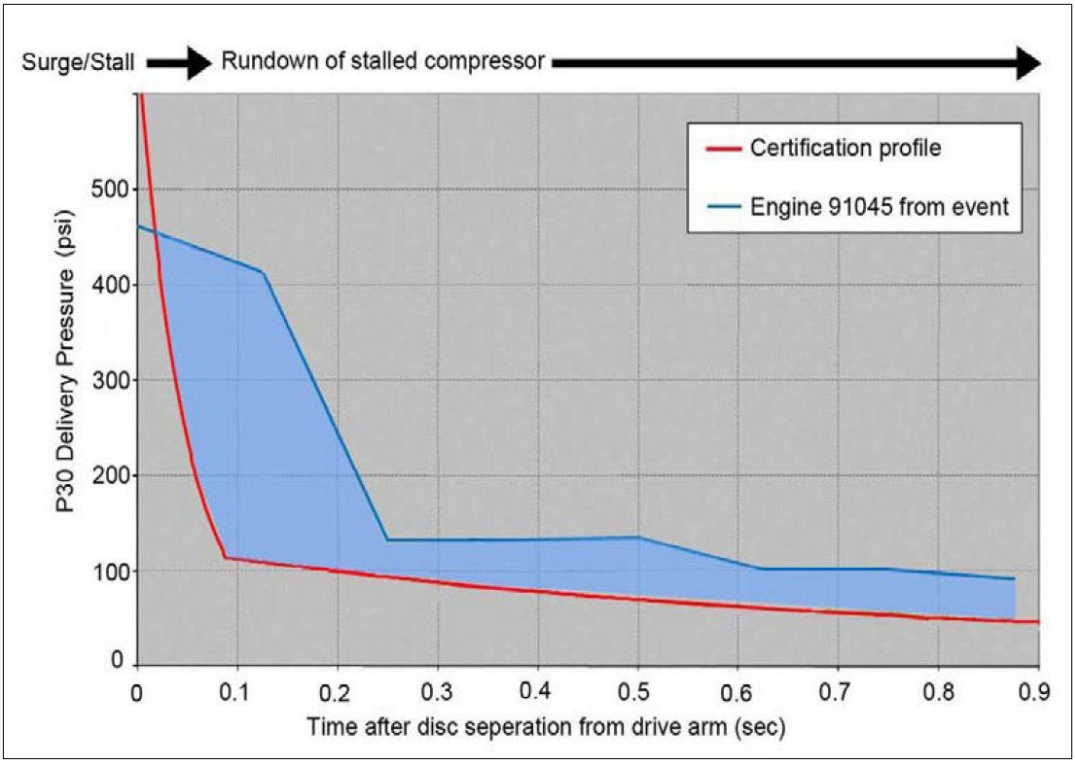
2. Das Ölfeuer durchbrach etwa zehn Sekunden vor dem Engine Failure den Buffer Space, und die Flammen umspülten die beiden berührungsfreien Labyrinthdichtungen („triple seals“) der HP- und der IP-Turbine. Die Dichtungsteile verformten sich unter der enormen Hitze und kamen in Kontakt miteinander. Das erklärt die plötzlichen Vibrationen der HP-Turbine. Vier Sekunden später hörten die Vibrationen auf: Die HP-Turbinendichtung war zerstört und bewegte sich frei im Kontakt mit der HP-Turbinenscheibe. Die Schleifspuren auf der HP-Turbinenscheibe waren dafür das Indiz.
Der Bruch der HP-Turbinendichtung führte zum Einströmen heißer Turbinengase in den Buffer Space, was zu Schwankungen in den Triebwerksdaten führte. Die FADEC reduzierte den Fuel Flow, um die Drehzahl der HP-Turbine zu begrenzen.

3. Die einströmenden Turbinengase zerstörten zusammen mit den Flammen des Ölfeuers die hintere Labyrinthdichtung zur IP-Turbine. Die heißen Gase trafen nun auf die Kühlungsöffnungen auf dem sog. drive arm, dem mittleren Teil der IP-Turbinenscheibe, mit dem diese mit der Welle verbunden war. Die Kühllöcher erodierten in Sekundenbruchteilen und der Bereich der Turbinenscheibe wurde so stark erhitzt, dass er brach: Das IP-Turbinenrad war frei von der Last des IP-Kompressors und bewegte sich nach hinten im

Motor, wo es – wie in den Design-Analysen vorhergesagt – in Kontakt mit dem Gehäuse kommt.

4. Ohne Antrieb von der IP-Turbine brach sofort die Strömung im IP-Kompressor zusammen, es kam zum Triebwerks-Stall, dem ersten lauten Knall, der im Cockpit zu hören war. Allerdings erholte sich unerwartet die dritte Welle mit der High Pressure Turbine, die sich bei 96 % stabilisierte. Obwohl der Druck im Motor schnell zusammenbrach, reichte der Luftdurchsatz daher immer noch aus, die von der Welle gelöste IP-Turbine rasant zu beschleunigen. Der Kontakt mit dem Gehäuse reichte nicht, um die Drehzahl zu stoppen. Vier Sekunden nach dem Rotor Disconnect von der Welle zerriss es die IP-Turbine-Rotorscheibe. Der ultimative Knall.

5. Auch ohne die IP-Turbine reagierte der sterbende Motor noch ein wenig auf die beschriebenen Thrust-Lever-Bewegungen des Kapitäns kurz vor dem Beginn der ECAM Actions (Idle, dann vorschieben). Um 02:02:20 UTC stallte der Motor erneut, bis er um 02:03:21 UTC von der Crew abgestellt wurde.

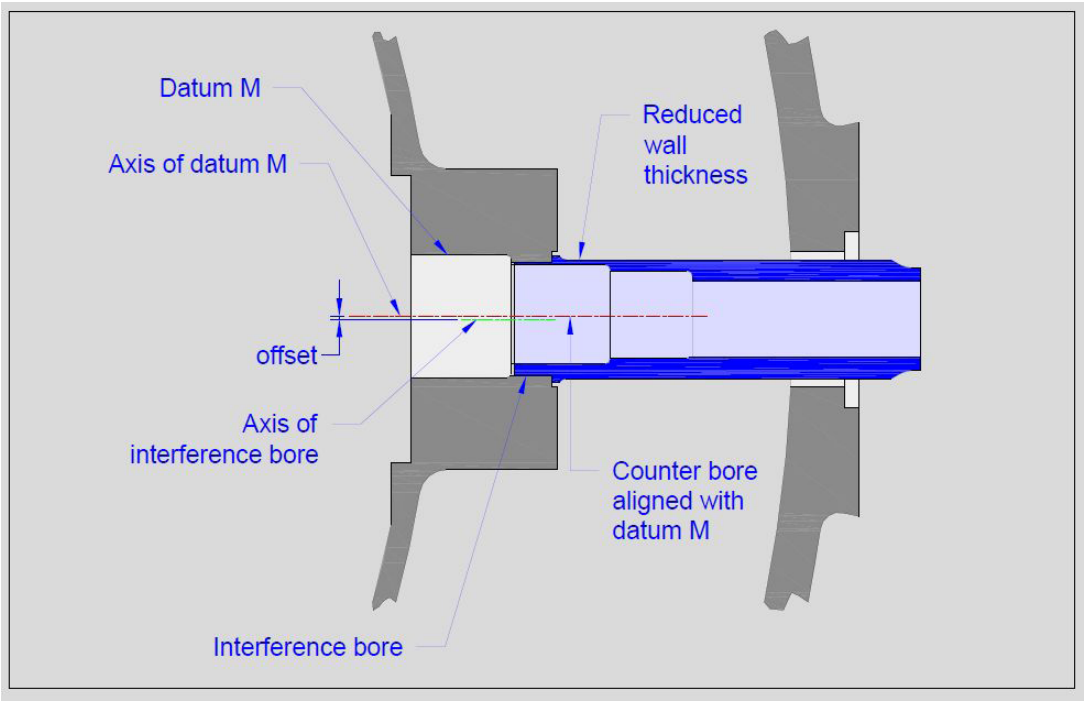


Der Druckverlauf des HP-Kompressors in den 0,9 Sekunden nach der Trennung der IP-Turbine von der Welle. Rot: Die Annahmen der Zertifizierung. Blau: Der tatsächliche Druckverlauf beim Flug QF32. Der Unterschied hat zusammen mit der zu geringen Reibung ausgereicht, die IP-Turbinenscheibe auf ihre Bruch-Drehzahl zu beschleunigen … Rolls Royce, ATSB Australia

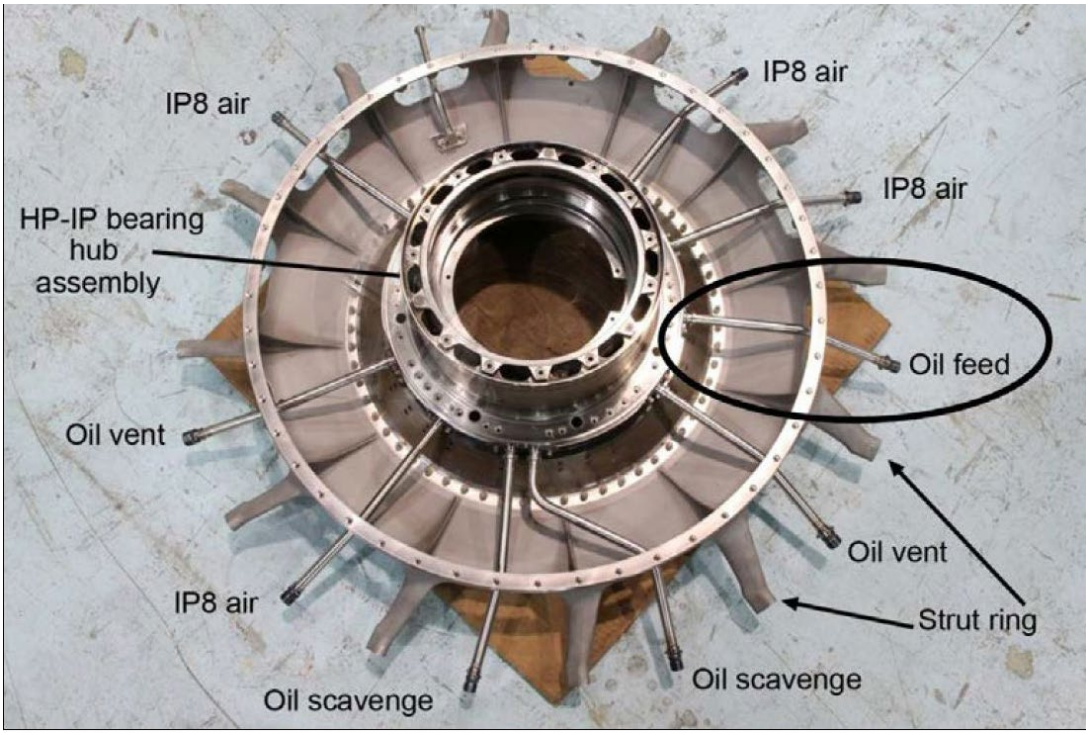
Fehlersuche in der Fertigung bei Rolls-Royce

Der ATSB-Bericht zum Qantas-Unfall liest sich wie ein Industrie-Krimi. Nachdem klar war, dass ein Fertigungsfehler vorlag, wurden alle Prozesse im Herstellerwerk des Triebwerks auf den Kopf gestellt. Hunderte Dokumente wurden gesichtet, Interviews mit Ingenieuren, Technikern und Managern geführt, längst vergessen geglaubte Audit-Berichte und Prüf-Protokolle ausgegraben. Ein sehr großer Teil des Abschlussberichts des ATSB beschäftigt sich nur mit dieser einen Frage: Wie konnte dieses fehlerhafte Bauteil unbemerkt in das Triebwerk gelangen?
Die wichtigste Erkenntnis war die, dass in der Fertigung für die Gegenbohrung („counter bore“) des kurzen Ölrohrs ein anderer Bezugspunkt („reference point“) gewählt wurde, als von den Designern vorgesehen war. Der Bezugspunkt in den Design-Zeichnungen war der Mittelpunkt der Öffnung der anderen Seite des Rohrstücks gewesen. Dieser Bezugspunkt stand aber in der Fertigungssequenz nach einem Schweißvorgang nicht mehr zur Verfügung. Daher wurde in den Fertigungs-Zeichnungen ein anderer Bezugspunkt gewählt, ohne mit den Designern Rücksprache zu halten.

Die Wahl des Bezugspunktes war enorm wichtig. Denn niemals im Fertigungsprozess wurde die Wanddicke des Rohrstücks selbst gemessen. Denn die ergab sich automatisch aus der Bohrung am richtigen Punkt. Die Toleranz bei Positionierung der Gegenboh-



Ein falsch gewählter Bezugspunkt für eine Bohrung führte bei Rolls-Royce jahrelang zur Auslieferung von Ölleitungen mit zu geringer Wandstärke. **ATSB Australia**



Die Position des fehlerhaft hergestellten Öl-Rohrstücks war in der mit „Oil Feed" gekennzeichneten Ölleitung. Die Bauteile waren zusammengeschweißt. Daher musste, wenn eine fehlerhafte „oil feed stub pipe" identifiziert wurde, das ganze Triebwerk gewechselt werden. ATSB Australia

rung war in der Design-Zeichnung mit nur 0,1 mm angegeben. Bei der tatsächlichen Bohrung konnte man messen, so oft man wollte: Da der Bezugspunkt nun in einem anderen Bauteil war, in das das Ölrohr hineinragte, konnte eine Abweichung von der Rohrmitte nicht mehr festgestellt werden.
Bei einer Kontrolle eines Werkstücks („first article inspection") im Jahr 2005 wurden wegen Unklarheiten in den Zeichnungen die Fertigungs-Zeichnungen statt der Design-Zeichnungen verwendet. Daher war damals nicht aufgefallen, dass hier etwas nicht stimmte.
Es hatte viele Gelegenheiten bei Rolls-Royce gegeben, fehlerhafte Baustücke festzustellen. Einige wurden sogar gefunden, aber dann wurde nicht erkannt – u.a. durch nicht sachgemäße Anwendung einer statistischen Analyse und durch shortcuts in der Genehmigung der Abweichungen –, dass es sich um ein grundsätzliches Fertigungsproblem handelte.

Im Laufe der Unfall-Untersuchung stellte sich so heraus, dass das fehlerhafte Bauteil im Unglücksflugzeug kein Einzelstück war. Eine unbekannte Anzahl davon hingen irgendwo auf der Welt unter den Flügeln der neuen A380 …

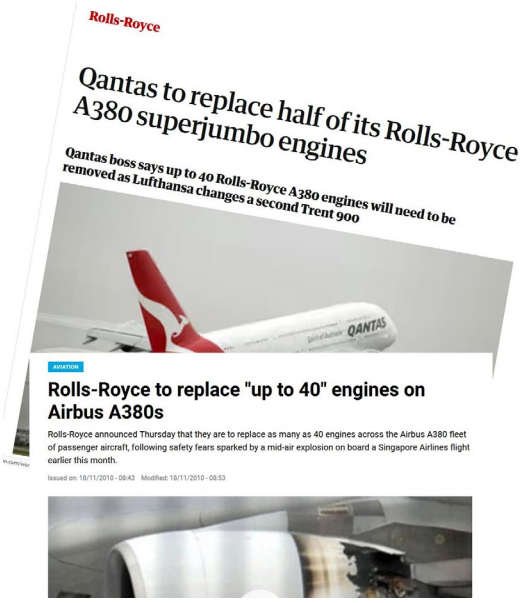
Ein Disk Burst wird im Design als „hazardous effect" angesehen. Bei den Design-Analysen wurde auch ein Versagen der „oil feed stub pipe" untersucht. Und das QF32-Triebwerk hat sich tatsächlich ähnlich verhalten,

wie in dieser Risiko-Analyse. Bei der Analyse, die die Wahrscheinlichkeit eines solchen Unfalls berechnet hatte, wurden allerdings gewisse Annahmen getroffen. Eine davon war, dass sehr viele Bauteile im Triebwerk als kritisch angesehen wurden, die einer besonderen Qualitätskontrolle unterlagen. Auch die oil feed stub pipe gehörte zu diesen besonders überwachten Bauteilen. Daher wurde ein fehlerhaftes Bauteil als Ursache ausgeschlossen. Unter anderem deshalb kam man damals zu folgendem Schluss:

> *„It was classified as a hazardous effect and was determined to have the acceptable probability of extremely remote.“*

Die Ergebnisse der Unfalluntersuchung führten zu umfangreichen Änderungen in der Produktion bei Rolls-Royce, zu einem verbesserten Qualitätsmanagement, aber auch zu schweren wirtschaftlichen Schäden für das Unternehmen. Je mehr über den Unfall herausgefunden wurde, umso gravierender wurden die Service Bulletins von Rolls-Royce sowie die Auflagen der verschiedenen Zulassungsbehörden. Nach dem ersten Service Bulletin vom 4. November 2010 mussten lediglich Kontrollen durchgeführt und die Ergebnisse an Rolls-Royce gemeldet werden. Später war es dann nicht mehr zulässig, ein Triebwerk weiter zu betreiben, wenn Ölspuren gefunden wurden. Und zum Schluss hatte man eine Möglichkeit gefunden, die „oil feed stub pipe“ selbst mittels einer Boroskop-Kontrolle darauf hin zu überprüfen, ob die Gegenbohrung konzentrisch war oder eben nicht. Wollte Rolls-Royce noch diese Kontrolle innerhalb der nächsten 20 Flüge gestatten, so drangen die Zulassungsbehörden darauf, die Kontrolle nach spätestens zwei Fügen durchzuführen. Bei Befund musste das jeweilige Triebwerk gewechselt werden. Auch bei zwei Lufthansa A380, so meine ich mich zu erinnern, musste jeweils mindestens ein Motor gewechselt werden.

Insgesamt wurden nach dem Qantas-Unfall weltweit 40 Rolls-Royce Trent 900 Triebwerke gewechselt, darunter fünf Triebwerke von Qantas A380. Das ist eine sehr große Zahl, wenn man bedenkt, dass bis dahin erst 20 Airbus A380 mit diesen Triebwerken ausgeliefert worden waren.


Rolls-Royce

Qantas to replace half of its Rolls-Royce A380 superjumbo engines

Qantas boss says up to 40 Rolls-Royce A380 engines will need to be removed as Lufthansa changes a second Trent 900

AVIATION

Rolls-Royce to replace "up to 40" engines on Airbus A380s

Rolls-Royce announced Thursday that they are to replace as many as 40 engines across the Airbus A380 fleet of passenger aircraft, following safety fears sparked by a mid-air explosion on board a Singapore Airlines flight earlier this month.

Issued on: 18/11/2010 - 08:43 Modified: 18/11/2010 - 08:53

Pressemeldungen vom 18. November 2010
The Guardian, France24

Qantas nahm in Absprache mit Rolls-Royce und der australischen Civil Aviation Safety Authority (CASA) am 27. November 2010 – nach mehr als drei Wochen am Boden – den Betrieb seiner A380-Flotte wieder auf. Zunächst durften nur Starts mit reduziertem Schub durchgeführt werden. Diese Beschränkung fiel erst später weg.

Natürlich waren wegen dieser Kontrollen und Triebwerkswechsel Trent 900 Triebwerke knapp, und nicht immer stand ein Ersatztriebwerk zur Verfügung. Auch fabrikneue Motoren waren auf einmal verdächtig und mussten geprüft werden. In Folge kam es zu Stilllegungen von A380-Flugzeugen wegen fehlender Triebwerke und zu Lieferverzögerungen bei den Triebwerken. Dadurch verzögerten sich auch, wie oben befürchtet, die A380-Auslieferungen von Airbus an die Airlines. Nicht nur, weil Rolls-Royce eine Zeit lang keine Trent 900 mehr an Airbus liefern konnte, sondern auch, weil die Kunden Airbus baten, von den Flugzeugen in der Produktion die Motoren rauszurücken, um ihre bestehende Flotte in der Luft zu halten.

Der Fertigungsfehler war ein finanzielles Desaster für Rolls-Royce. Innerhalb von 48 Stunden war der Wert des Unternehmens an den Börsen um mehr als eine Milliarde Britische Pfund gefallen.
Außerdem kamen erhebliche Mehrkosten auf Rolls-Royce zu. Natürlich verlangten die Airlines Kompensationen. Das ging weit über die Kosten der Triebwerke hinaus. Nicht alle Deals wurden öffentlich. Einer jedoch schon: Allein für die finanziellen Ausfälle durch die Stilllegung der Qantas A380-Flotte erhielt Qantas nach einer außergerichtlichen Einigung mindestens 150 Millionen Dollar von Rolls-Royce. Zwar bezahlten die Versicherungskonzerne die Reparatur der Schäden am Qantas A380. Allerdings bekam das Flugzeug bei dem Wiederaufbau vier neue Trent 900 Motoren (Stückpreis damals ca. 15 Millionen Dollar). Ob diese von Rolls-Royce bezahlt wurden oder von den Versicherungen, blieb ein Betriebsgeheimnis.

Es ist durchaus denkbar, dass der Knall über Singapore Rolls-Royce mindestens 500 Millionen, wenn nicht über eine Milliarde Dollar gekostet hat.

Turbine Overspeed Protection

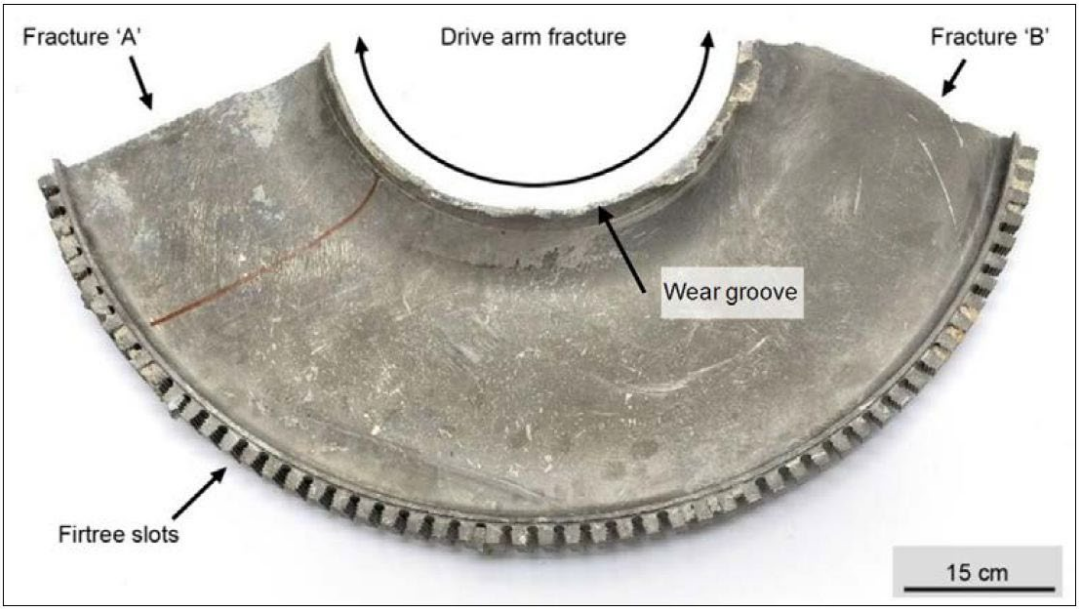
Rolls-Royce war super-schnell, die Wiederholung eines „Uncontained Engine Rotor Failure“ der IP-Pressure-Turbine zu verhindern. Bereits am 3. Dezember 2010 wurde den Kunden eine neue Engine Management Software vorgestellt, mit dem IP Turbine Overspeed Protection System (IPTOS). Bei dem Unfall hatte sich gezeigt, dass die Zeit, die die Turbine braucht, sich zu zerlegen, weit unterhalb der Reaktionszeit eines Piloten war. Das IPTOS nutzt die beiden Temperatur-Sensoren vor und hinter der IP-Turbine, die die Turbinen-Kühllufttemperatur im Triebwerk messen. Zeigt sich an einem der beiden Sensoren eine ungewöhnliche Temperaturerhöhung, wird das System armiert. Kommt es danach zu einer raschen Abnahme der IP-Kompressor-Drehzahl (ein Zeichen, dass sich die Turbine von der Welle gelöst hat), stellt das IPTOS sofort die Treibstoffzufuhr ab, öffnet alle Bleed-Valves und schließt die Variable Stator Vanes. Damit kommt es zum Kompressor-Stall und der Druck hinter dem Verdichter bricht zusammen, der IP-Turbine fehlt sofort der Antrieb. Den Piloten wird der Triebwerksausfall mit dieser Meldung angezeigt:
ENG FAIL - SHAFT FAILURE
Am 13. Dezember 2011 gab es dazu eine airworthiness directive der EASA. Die Software musste innerhalb der nächsten zehn Flüge in alle Trent 900 Triebwerke installiert werden.

Eine Turbinenscheibe macht sich auf den Weg

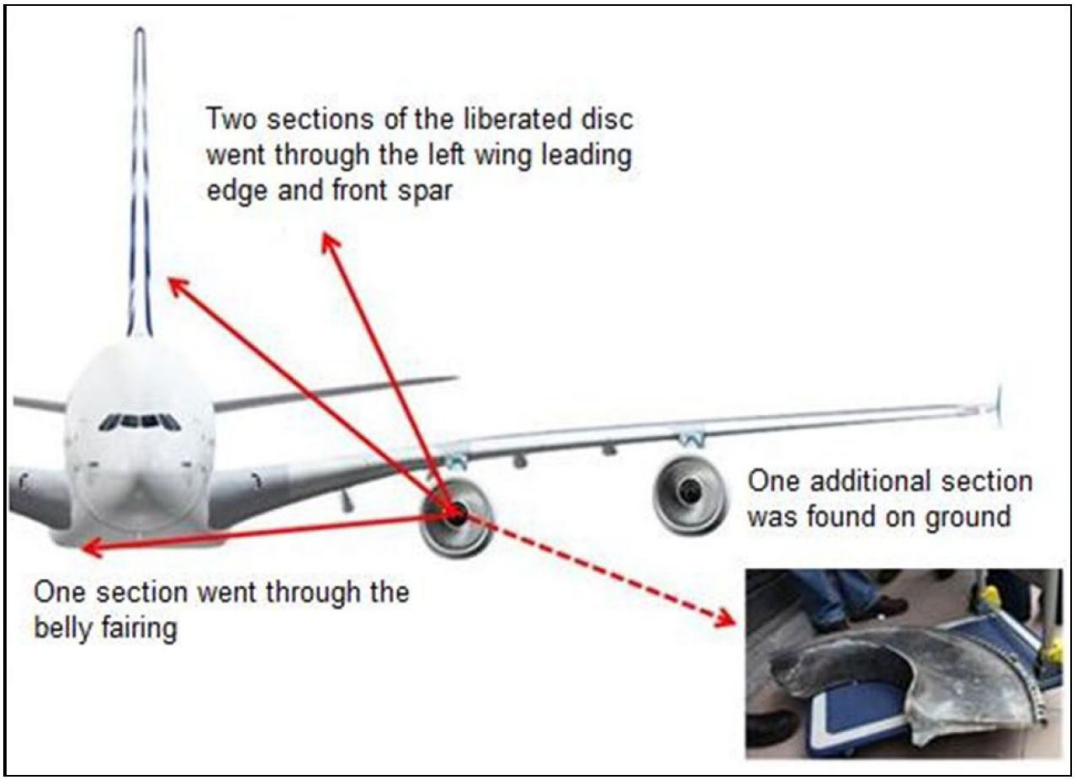
Nachdem sich die durch das Ölfeuer und die HP Turbinenabgase aufgeheizte IP-Turbinenscheibe im Triebwerk #2 von der Welle losgerissen hatte, beschleunigte sie ihre Drehzahl ins nie Dagewesene. Durch die g-Kräfte „wuchs“ die Scheibe, bis das Material die Spannung nicht mehr halten konnte. Dann zerriss sie. Sie brach exakt wie in den Bruchtests bei Rolls-Royce beobachtet mit radialen Rissen in mehrere Teile auseinander. Mit anderthalbfacher Schallgeschwindigkeit machten sich die Bruchstücke auf den Weg. Drei kleinere verursachten alle Schäden am Flugzeug. Zwei Bruchstücke durchschlugen die Tragfläche. Nichts konnte sie stoppen. Weder der massive vordere Hauptholm des Tragflügels noch die 1,5 cm dicke Aluminiumbeplankung der Flügeloberseite. Die Teile flogen anschließend über den Rumpf hinweg und wurden nie gefunden.

Ein weiteres Bruchstück machte sich auf den Weg durch den unteren Teil des Rumpfes. Dabei wurden auch Backupsysteme zerrissen, deren Primärsysteme schon durch die ersten Bruchstücke im Flügel zerstört worden waren.
Das größte Bruchstück verließ das Triebwerk, glücklicherweise ohne das Flugzeug selbst zu treffen. Dafür zerstörte es am Boden eine Hauswand, 2 Kilometer querab des Flugweges.

Die Crew war im Cockpit mit den über 130 ECAM.Checklisten beschäftigt. Gut, dass sie die genauen Schäden am A380 im Flug nicht sehen konnten …



Das größte der mindestens vier Bruchstücke der IP-Turbine. Es wurde auf der Insel Batam gefunden. Glücklicherweise verließ dieses Teil den Motor zur Seite und traf weder die Tragfläche noch den Rumpf. Alle Schäden am Flugzeug wurden durch die anderen kleineren Bruchstücke verursacht, die nie gefunden wurden. ATSB Australia



Der Flugweg der wichtigsten Trümmerteile der zerborstenen Turbinenscheibe **Airbus / ATSB Australia**

Schäden am A380, von denen die Crew nichts wusste

Das ATSB fand bei der Unfalluntersuchung auch Einiges, das weder die Crew noch Airbus gewusst haben. Nicht nur Rolls-Royce musste nach dem Unfall Änderungen vornehmen. Auch bei Airbus waren danach Anpassungen an Software und Hardware des A380 erforderlich.

Elektrik

Wie im ersten Teil berichtet, scheiterte die Reconfiguration des AC Bus 2 wegen eines Fehlerstroms am Gen 2. Damit fiel der AC Bus 2 komplett aus. Ein einzelner AC Bus Fault tut dem A380 normalerweise nicht weh. Beim Flug QF32 aber hatte der AC Bus 2 Fault erhebliche Konsequenzen für die spätere Stromversorgung am Boden, denn mit dem AC Bus 2 war auch das ADIRS 3[4] ausgefallen. Der A380 braucht für die Versorgung aller Busses zwei Generatoren.[5] Die APU hat zwei Generatoren, die aber nur am Boden beide ans Netz gehen. Damit in der Luft nur ein APU-Generator online geht, erhält das elektrische System ein Speed Signal vom ADIRS 3. Mit dem Ausfall des

4) ADIRS - Air Data and Inertial Reference System

5) Daher müssen z.B. bei Ausfall der APU zwei Triebwerke mit External Air angelassen werden, bevor die Bodenstromversorgung abgezogen werden kann.

Blick nach vorne auf den durchschlagenen vorderen Hauptholm im Left Inner Tank. An der Oberseite fand das ATSB Brandspuren. Die Art der Verfärbungen ließ den Schluss zu, dass es nur ein kurzes Flash-Fire gewesen war. ATSB Australia

ADIRS 3 war dieses Speed Signal auf „größer 50 kts“ eingefroren. Nach der Landung blieb dadurch das elektrische System im „Air Mode“ und verhinderte das Zuschalten des APU Gen B auf das Netz. „Kleinigkeiten“, die nicht im Handbuch stehen. Als nun nach dem Stillstand der Maschine die beiden rechten Triebwerke abgestellt wurden, brach die Stromversorgung zusammen. Nur noch der AC Bus 1 und der Essential Bus waren mit Strom versorgt … und es wurde dunkel. Nicht nur in der Kabine, sondern auch im Cockpit, wo bis auf eines alle Displays ausfielen und alle Funkgeräte, außer dem VHF 1. Kein gutes Environment mit 469 Menschen an Bord, nur noch mit rudimentärer Stromversorgung und ohne Klimaanlage …

Nach dem Unfall hat Airbus die Logik im elektrischen System geändert. „Kleine“ Fehlerströme oder -spannungen verhindern nun nicht mehr das Umschalten auf eine andere Stromquelle.

Treibstoffsystem

Kapitän de Crespigny hat die Treibstoffsituation in seinem Buch „QF32“ wie im ersten Teil berichtet beschrieben. Alle seine Ausführungen dazu finden sich auch im Abschlussbericht des australischen ATSB bestätigt – bis auf eine Ausnahme. Bei der Untersuchung des Flugzeugs stellte sich später heraus, dass es größere Leckagen zwar im Feed Tank 2 und im Left Inner Tank

gegeben hatte, nicht aber im Feed Tank 1. De Crespigny konnte das bei Herausgabe seines Buches QF32 im Jahr 2012 noch nicht wissen, der Abschlussbericht des ATSB erschien erst ein Jahr später. Die deutlich geringere Treibstoffmenge im Feed Tank 1 war wahrscheinlich eine Folge des links fehlgeschlagenen Emergency Outer Tank Transfers, nur die rechten Feed Tanks wurden vom rechten Outer Tank nachgefüllt. Das zu erkennen war sicherlich im Eifer des Gefechts und in der Kürze der Zeit nicht möglich gewesen. Aber die Erkenntnis, dass die geringe Menge Treibstoff im Feed Tank 1 die sichere Flugzeit deutlich limitierte, war korrekt gewesen.

Feuer im Tank

Durch die Explosion des Triebwerks #2 kam es – unbemerkt von der Crew – zu einem Feuer im Left Inner Tank. Ein Passagier hatte der Untersuchungskommission berichtet, er habe für etwa fünf bis sechs Minuten durch ein Loch in der Oberseite der Tragfläche Feuer gesehen. Ein Trümmerteil der IP-Turbine hatte den vorderen Hauptholm und den Left Inner Tank durchschlagen. Die Untersuchung des Inneren des Left Inner Tanks hat ergeben, dass es in dem betroffenen Tank sofort zu einem Flash-Fire gekommen war. Das gesamte Tank-Design wurde unter die Lupe genommen, um der Ursache des Feuers auf die Spur zu kommen. Das ATSB kam zu dem Schluss, dass das glühend heiße Turbinenstück selbst die Zündquelle des Feuers war. Der Brand war glücklicherweise nur von geringer Intensität und die Menge des zündfähigen Gemisches im Tank war nur begrenzt. Das Feuer erlosch nach kurzer Zeit, ohne dass das über Bord ausströmende Kerosin in Brand geriet.

Das ATSB kam zu dem Schluss, dass der Passagier durch das Loch direkt auf den hinteren Teil des Triebwerks blicken konnte. Was er sah, war nicht das kurze Flash-Fire in der Tragfläche, sondern der brennende Motor #2.

Engine Fire

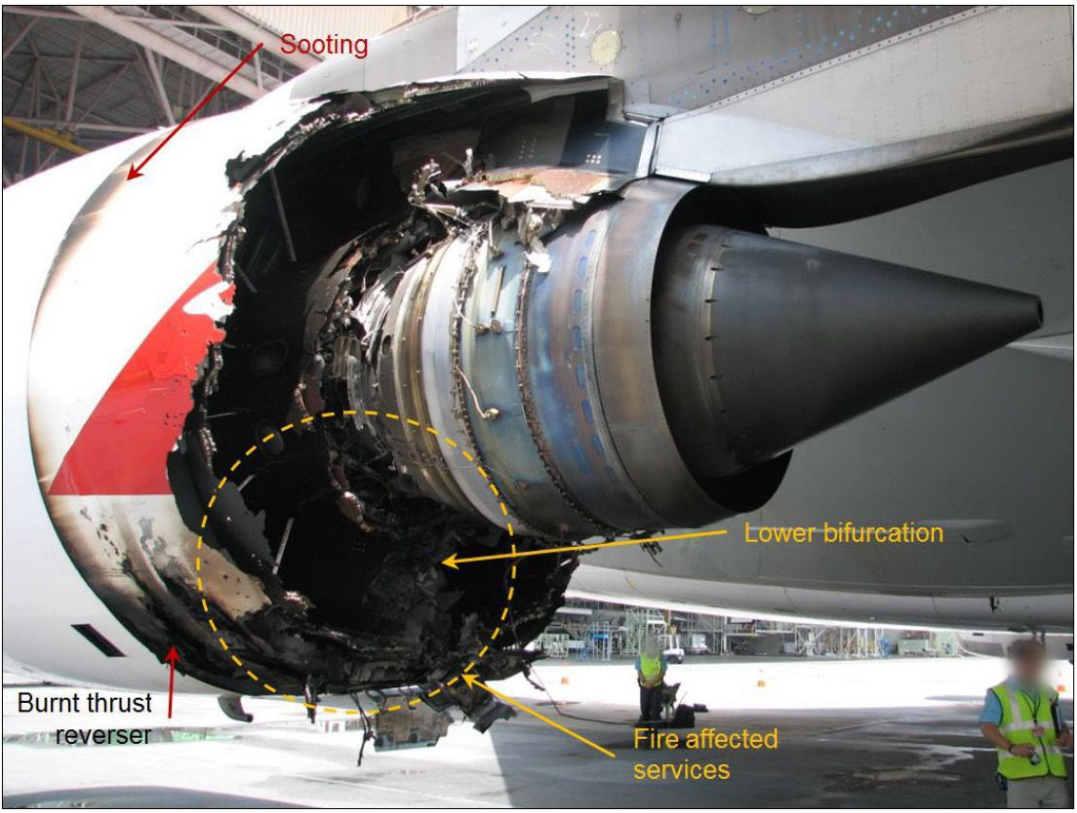
Der Copilot hatte gleich nach der Explosion die ECAM-Warnung ENG 2 FIRE gesehen. Wie berichtet, wurde die Meldung nur für etwa 2 Sekunden angezeigt. Die Untersuchungskommission hat später festgestellt, dass es im hinteren unteren Bereich des Motors zu einem intensiven Feuer gekommen war. Die Trümmerteile hatten auch eine Ölleitung zerrissen, die ein Feuer im Bereich des Thrust Reversers mit Brennstoff versorgte. Der Öl-Vorrat von 13,5 Litern war innerhalb von 45 Sekunden nicht mehr messbar gewesen. Am Motor konnten später nur noch 0,5 Liter Öl abgelassen werden. Obwohl das Feuer einige Minuten brannte und Teile des Reversers zerstörte, gab es keine Warnung mehr im Cockpit. Grund dafür waren Schäden im Fire Detection System des Motors. Von den insgesamt sechs Feuermeldeschleifen des redundant ausgelegten Systems mit Loop A und Loop B waren fünf Schleifen zerstört. Lediglich die Schleife 1 des Systems B im Fan-Gehäuse funktionierte noch. Diese hatte die zwei Sekunden lange „ENG 2 FIRE“-Warnung ausgelöst, bevor die Temperatur in diesem Bereich wieder unter den Schwellenwert gesunken war.

Bei einem Feuer im Triebwerk ist es nicht lustig, wenn neben der Fire Detection auch das Löschsystem beschädigt ist. Und das war in der ganzen linken Tragfläche nur noch eingeschränkt verfügbar. Jeder Motor hat zwei Löschflaschen, jede Löschflasche zwei Sprengkapseln („Squibs“) und eine Anzeige, dass das System ausgelöst hat. Beim Motor #2 hat nur eine Löschflasche ausgelöst, die andere war ausgefallen. Beide Anzeigen für die Auslösung waren ebenfalls kaputt. Wie beim Triebwerk #2 waren auch beim Triebwerk #1 drei der vier Sprengkapseln ausgefallen.

Hier noch mal die bereits erwähnte Empfehlung zum Flugzeug-Design:

„Fire warning and extinguishing systems. Following a UERF event, the fire warning systems of all engines should continue to be operational and the extinguishing systems of the remaining engines should also remain operational.“

Es ist müßig, „was wäre wenn“ Überlegungen anzustellen. Dennoch scheint es in diesem Fall ganz gut gewesen zu sein, dass die Crew nichts vom brennenden Triebwerk mitbekommen hat. Ansonsten wären die Piloten wahrscheinlich sofort gelandet, um dann mit einem brennenden Motor in einem See von Kerosin zum Stillstand zu kommen.



In dem markierten Bereich brannte das Triebwerk #2 nach der Explosion noch etliche Minuten, ohne dass das der Crew angezeigt worden war **ATSB Australia**

Landing Distance Perfomance Application und die Bremsbetätigung

Deutliche Kritik musste sich Airbus für die „Landing Distance Performance Application“ vom ATSB anhören. Wie berichtet, war es der Crew zuerst nicht möglich, überhaupt ein gültiges Ergebnis zu bekommen. Und später warf das Programm mit neun eingegebenen „Failures Affecting Landing Performance“ eine erforderliche Landestrecke von 3.900 Metern aus. Die Crew stoppte den A380 etwa 150 Meter vor dem Ende der 4.000 Meter Bahn.

Bei einer Analyse der Software wurde herausgefunden, dass das Programm bei Gewichten bei und unter dem Maximum Landing Weight (MLW) für jeden Fehler einen Zuschlagsfaktor zur normalen Landestrecke berechnet. Zusätzlich wird ein „Sicherheitszuschlag“ bei jedem einzelnen Fehler angewendet, also bei QF32 neunmal. Bei Landungen mit mehr als dem MLW wird dieser (recht hohe) Sicherheitszuschlag nur einmal angewendet. Daher kam bei niedrigerem Landegewicht (MLW) eine längere erforderliche Landestrecke heraus als bei höherem Gewicht. In Folge wurde bei der ersten Berechnung mit MLW „no result“ ausgeworfen.

Das ATSB sah darin eine „Safety Issue“: Eine fehlerhaft zu hoch ausgewiesene Landestrecke bei Mehrfachfehlern könnte eine Crew zu einer riskanten, unnötigen Diversion verleiten, obwohl die Landestrecke locker ausgereicht hätte. Airbus hat daraufhin 2011 und später noch mal 2013 seine Software angepasst, um diese Fehler zu beheben.

Airbus hat nach dem Unfall im April 2011 einen Fixed-Base-Simulator[6] mit allen bekannten Fehlern des QF32 A380 programmiert und damit Landeversuche gemacht.[7] Mit Full Braking und Full Reverse auf dem Triebwerk #3 bis 75 Knoten wurden Landungen gemacht, die 1.500 bis 1.700 Meter vor dem Bahnende zum Stillstand kamen.

Der Unterschied zur aktuellen Landedistanz wurde mit unbeabsichtigtem „differential braking“ beim Flug QF32 erklärt. Und der Unterschied zur Performance-Berechnung mit zu hohen Sicherheitszuschlägen in der Airbus-Software.

Unbeabsichtigtes asymmetrisches Bremsen, wenn eigentlich eine Vollbremsung erforderlich ist, erscheint manchmal in Unfallberichten zu Runway Overruns als beitragender Faktor. Es ist schwierig, mit den Fußspitzen auf beiden Pedalen den vollen Bremsdruck zu erzeugen, wenn man gleichzeitig zum Steuern des Flugzeugs die Pedale unterschiedlich auslenken muss. Zum einen gibt es keinerlei Anzeige im Cockpit über den Bremsdruck rechts und links. Zum anderen hat der zweite Pilot kaum eine Chance, festzustellen, ob der Pilot Flying wirklich eine Vollbremsung macht. Beim Flug QF32 hatte der Copilot einmal kurz beide Bremsen voll betätigt,[8] um sich zu überzeugen, dass der Kapitän wirklich voll in den Bremsen stand. Danach hat er die Füße wieder zurückgenommen. Da sich das differential braking jedoch nicht auf den Unfallhergang ausge-

6) Fixed base – ohne Bewegung. Fixed-Base-Simulatoren werden zum Verfahrenstraining oder für Forschungsprojekte eingesetzt.

7) Einer der QF32-Piloten war an diesen Versuchen beteiligt.

8) Kein gelehrtes Verfahren, aber u.U. sinnvoll

Durch die Triebwerksexplosion wurden an Bord über 650 Kabel zerrissen. **ATSB Australia**

wirkt hatte, hat das ATSB dieses Thema nicht weiter vertieft.

Wiederaufbau des Qantas A380

In Sydney konnte man kaum glauben, was der aus Australien eingeflogene Qantas Maintenance Manager Tim Gent bei einem ersten Rundgang um das Wrack am Handy über die Verwüstungen am Flugzeug berichtete. Sicher war der erste Eindruck der eines Totalschadens. Tragende Teile wie der vordere Hauptholm, Rippen und Stringer, Flügelober- und -unterseite waren von den Trümmern durchschlagen worden ebenso der untere Rumpfbereich, in dem viele Kabelbündel zerstört waren. Zwei Triebwerke waren hin, hunderte Kabel durchtrennt. Der Rumpf gesprenkelt mit Dellen und Einschlägen, Höhen- und Seitenleitwerk beschädigt. Außerdem waren Träger an der Triebwerksaufhängung #2 gebrochen. Nur mit Glück war der Motor drangeblieben … Es würde niemals möglich sein, den A380 mit ein bisschen High-Speed-Tape zusammenzuflicken, um ihn für eine Reparatur irgendwo anders hinzufliegen. Entweder würde die Maschine an Ort und Stelle abgewrackt oder aber der Wiederaufbau musste in Singapore erfolgen. Zuerst einmal war der A380 mit der MSN 14[9] nach dem Unfall in Singapore eine Gefahrenquelle, die man nicht einfach in eine Halle

9) MSN - Manufacturer Serial Number. Der Qantas Flieger war der 14. A380, den Airbus gebaut hatte.

schleppen konnte. Er musste erstmal draußen bleiben und „ausbluten“. Überall lief noch Sprit aus der durchlöcherten linken Tragfläche. Durch die FDR-Aufzeichnungen hatte man eine ungefähre Vorstellung von der Leckage-Rate. Allein der Feed Tank #2 verlor fünf Tonnen Kerosin im Flug und 2.600 kg Sprit am Boden. Auf dem Vorfeld war es erstmal nicht möglich, den restlichen Treibstoff abzulassen. Das Flugzeug war elektrisch tot und für Monate würde niemand Strom an das zerschossene Flugzeug anschließen. Hätte auch nichts genutzt, denn die Pumpen in den Tanks waren ebenso wie die Treibstoffleitungen und Ventile defekt.

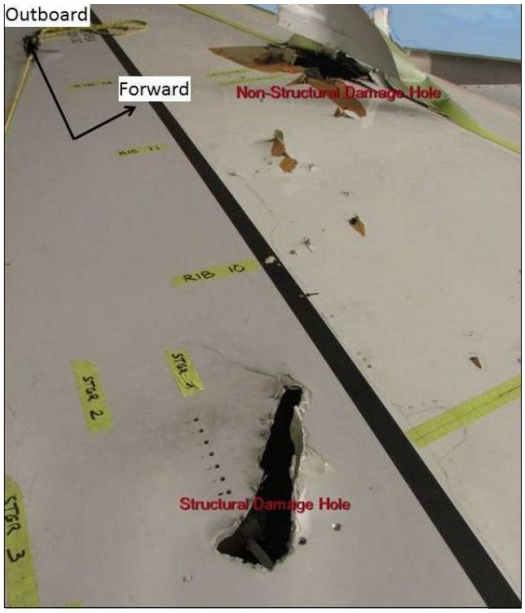
Wäre das Flugzeug Ihre Piper oder Ihre King Air gewesen, Sie hätten sich sicher mit Ihrer Versicherung geeinigt und das Ding als Totalschaden abgeschrieben. Auch wenn der A380 so kaputt aussah wie noch nie ein beschädigtes Verkehrsflugzeug zuvor, so war die Vorstellung eines Abwrackens für das Qantas Top-Management wahrscheinlich von Anfang an undenkbar. Ein „Hull-Loss“, also ein Totalverlust eines Strahlverkehrsflugzeugs, wäre der erst in der langen Geschichte der Qantas gewesen. Das wäre ein PR-Desaster großen Ausmaßes geworden. Außerdem: Dieses tapfere Flugzeug hätte so ein Ende wirklich nicht verdient.

Die Entscheidung, das Flugzeug wiederaufzubauen, wurde jedenfalls nach den umfangreichen Begehungen gemacht. Und am Ende bin ich mir sicher, dass wir nicht vollständig erfahren werden, was die Reparatur tatsächlich gekostet hat. Die Zahl, die später genannt wurde, wird jedenfalls nicht die Endabrechnung gewesen sein.

Auf jeden Fall war der Wiederaufbau des Airbus A380 ein besonderes Highlight in der Luftfahrtgeschichte. Der Qantas CEO Alan Joyce meinte später zu der Aktion:

> *„Repairing this aircraft was probably the biggest repair job in aviation history.“*[10]

Um das Flugzeug wieder flottzumachen, konnte es nirgendwo hingebracht werden. Die Reparatur musste in Singapore erfolgen – oder gar nicht. Singapore war zum Glück auch die Wartungsbasis für die Singapore Airlines A380. Und Singapore Airlines stellte freundlicherweise seine A380-Wartungshalle für die Reparatur zur Verfügung.



Die Reparatur der durchlöcherten 1,5 cm dicken Flügeloberseite stellte Airbus vor besondere Herausforderungen. Beim Neuflugzeug war die komplette Oberseite aus einem durchgehenden Teil gefertigt. ATSB Australia

Der Wiederaufbau des A380 war ein großes Gemeinschaftswerk. Airbus war verantwortlich für das gesamte Engineering. Nachdem

10) Zitat aus „Home Again“, Australian Aviation, 2012.

die Schäden jedes einzelnen Bauteils aufgenommen waren, begannen die verschiedenen Fachbereiche bei Airbus mit der Arbeit und machten Vorschläge für die Reparatur. Dann wurden Teile bestellt und „Job Cards“ für das Repair-Team in Singapore erstellt. In Singapore stand während der Arbeiten ein kompletter Engineering Support zur Verfügung, denn nicht immer konnten die Arbeiten exakt so abgearbeitet werden, wie es von den Ingenieuren in Europa geplant worden war.
Das Flugzeug verblieb im Eigentum und im AOC der Qantas. Die Qantas Maintenance war daher auch für alle Arbeiten und Entscheidungen verantwortlich. Und deren Arbeit wurde von der australischen Civil Aviation Safety Authority (CASA) überwacht. Inspektoren der CASA flogen immer wieder nach Singapore, um den Wiederaufbau von der Zulassungsseite her zu begleiten.

Die Arbeiten für einen möglichen Wiederaufbau begannen in der Weihnachtszeit 2010, nachdem das Flugzeug von der Unfalluntersuchungskommission freigegeben worden war. Erster Schritt war eine gründliche Befundaufnahme aller Schäden und nötiger Reparaturen. Damit waren die Ingenieure erstmal sechs Wochen lang beschäftigt.
Airbus stellte seinen Reparaturplan im Februar 2011 vor. Im April wurde dann die endgültige Vorgehensweise mit Qantas vereinbart.
Es gab gleich zu Anfang eine grundsätzliche Entscheidung: So gut wie nichts wurde „geflickt“. Der Auftrag an Airbus und alle Beteiligten war, dass das Flugzeug „wie neu“ die Halle verlassen sollte. Daher wurde jedes einzelne Bauteil, jeder einzelne zerstörte Kabelbaum, jede beschädigte Treibstoffleitung nicht einfach „repariert“, sondern wenn möglich gegen ein neues Teil ausgetauscht. Das stellte Airbus vor ein großes Problem. Noch nie war eine so große Tragfläche am lebenden Objekt wiederhergerichtet worden. Um die Fläche zu reparieren, musste sie komplett in die Zero-g-Position gebracht werden, in der sie auch gebaut worden war. Das war ebenfalls noch nie außerhalb des Herstellerwerks gemacht worden. Die Vorarbeiten für das Aufbocken waren der Beginn einer großen „Teilewanderung“ von Europa nach Asien. Mit zwei Schiffsladungen wurden 40 Tonnen an Hebevorrichtungen und Spezialwerkzeugen nach Singapore gebracht. Im Laufe der Monate folgten noch über 1.000 Luftfrachtsendungen mit Ersatzteilen. Einmal aufgebockt in der Zero-g-Position verblieb der A380 insgesamt 116 Tage auf den Hubgerüsten.

Die Reparatur des Flügels war eine große Herausforderung. Alles vor der Wingbox (dem Bereich zwischen dem vorderen und dem hinteren Flügelholm) konnte einfach ausgebaut werden: Kabelbündel, Klappenantriebe, Bleed-Ducts, die Vorflügel und die Drooped Nose Flaps. Aber was tun mit der tragenden Struktur der Wing Box? Ober- und Unterseite der Tragfläche waren jeweils aus einem durchgehenden komplizierten Aluminiumteil gefertigt – und nun durchlöchert. Die beschädigten Bereiche mussten herausgeschnitten werden. Ein hochpräziser 3D-Laserscanner wurde eingeflogen, um die Bereiche exakt zu vermessen. Mit den Daten wurden dann bei Airbus integrale Passstücke gefertigt, mit Verstärkungen auf der Innenseite, die später mit modifizierten Rippen verbunden wurden. Die Teile waren so kompliziert und wahrscheinlich auch so

Der Qantas A380 beim Wiederaufbau in Singapore. Die Vorflügel und der vordere Hauptholm mit allen beschädigten Anbauten wurden bereits ausgebaut. Einige beschädigte Rippen wurden ebenfalls ausgeschnitten. Die durchschlagenen Flügelober- und Unterseiten sind noch nicht bearbeitet. Foto: Qantas / Australian Aviation

teuer, dass es ein Presse-Foto mit der Qantas-Führungsriege gibt, vor denen das große Ersatzteil für die Flügelunterseite steht. Wie eine Fußballmannschaft vor dem WM Pokal. Mit dem vorderen Flügelholm war es etwas einfacher. Der war so massiv, dass er im Werk nicht am Stück gefertigt worden war, sondern in Sektionen. Die dicken Aluminium-Holmsektionen, mit einer Wabenstruktur aus dem Vollen gefräst (siehe das Foto aus dem Left Inner Tank auf Seite 40), waren mit Bolzen miteinander verbunden. Die beschädigten Sektionen konnten ausgewechselt werden.

Auch die Triebwerksaufhängung des Motors #2 war schwer beschädigt und musste gewechselt werden, wie auch jede Menge Treibstoffleitungen, Ventile und Pumpen. Wie es gelang, in den dichtgepackten Kabelbündeln die 650 zerstörten Kabelstränge auszuwechseln, ist mir ein Rätsel. Insgesamt wurden fünf Kilometer Kabel neu verlegt. Hunderte Dellen auf der linken Rumpfseite mussten repariert wurden. Ebenso mussten alle defekten Teile im unteren Rumpfbereich ausgewechselt werden. Auch das Höhenleitwerk und das Seitenleitwerk waren beschädigt.

Der Qantas A380 blieb für die Struktur-Reparaturen 116 Tage lang aufgebockt in der A380-Halle, vom 6. Juli bis zum 22. Oktober 2011. Danach wurde er rausgeschleppt, um die Halle wieder für Singapore Airlines freizumachen. Die weiteren Arbeiten wurden entweder im Freien oder in einer anderen Halle durchgeführt. Dazu gehörte auch der Anbau neuer Klappen und Verkleidungen. Und lackiert werden musste die Maschine natürlich auch. Für die Arbeiten draußen wurde die APU, die in der A380-Halle ausgebaut worden war, wieder eingebaut. Von

Wieder wie neu: der Qantas A380 VH-OQA „Nancy-Bird Walton“ bei den Taxi-Tests am 14. April 2012 in Singapore
Foto: Kok Chwee Sim / AviAsian Images

da an lief sie im Freien während der weiteren Arbeiten in der tropischen Hitze acht Stunden am Tag. Tapfer, tapfer …
Weil die Reparaturen ja auch bezahlt werden mussten, wurden die Arbeitsstunden gezählt: Planung der Arbeiten: 50.000 design hours. Ausführung der Arbeiten: 70.000 production hours.
Das Erstaunliche: Der A380, der nun wie neu in Singapore stand, wog gerade einmal 95 kg mehr als vorher.[11] Die Versicherungen haben etwa 145 Millionen Dollar für die Reparaturen gezahlt. Wie gesagt, es ist nicht bekannt, ob das die Endabrechnung war, auch nicht, ob das die Kosten der vier neuen Triebwerke beinhaltete.

Bevor der A380 wieder freigegeben werden konnte, erfolgten lange Tests, wie sie auch im Airbuswerk vor der Auslieferung gemacht wurden: Die elektrischen Systeme wurden in allen ihren Modes getestet, ein Cabin Pressurization Test gefahren, das pneumatische System und die Klimaanlage geprüft. In den statischen Tests wurden 120 Testpunkte abgearbeitet, bevor dann erstmals die neuen Triebwerke angelassen wurden.

Erst am 14. April 2011 bewegte sich der A380 aus eigener Kraft für die Taxi-Tests. Dabei wurden die Bug- und Hauptfahrwerkssteuerungen und die Bremssysteme in allen Modes überprüft. Die Tests endeten mit einen high-speed Startabbruch-Test. Dann war der A380 fertig für den großen Moment: Mit einer Crew bestehend aus dem Technischen Piloten von Qantas (PIC), einem Airbus-Testpiloten und zwei Testingenieuren rollte die Maschine zur Startbahn für den ersten Testflug. Gleich mit einen Full-Thrust Takeoff ging es los. Das Online Magazin „Australian Aviation“ beschrieb diesen Flug so:

„The extensive four-hour flight testing was largely done in a block of airspace 60nm east of Singapore, where the A380’s operational envelope could be

11) MTOW (Maximum Takeoff Weight) 560.000 kg

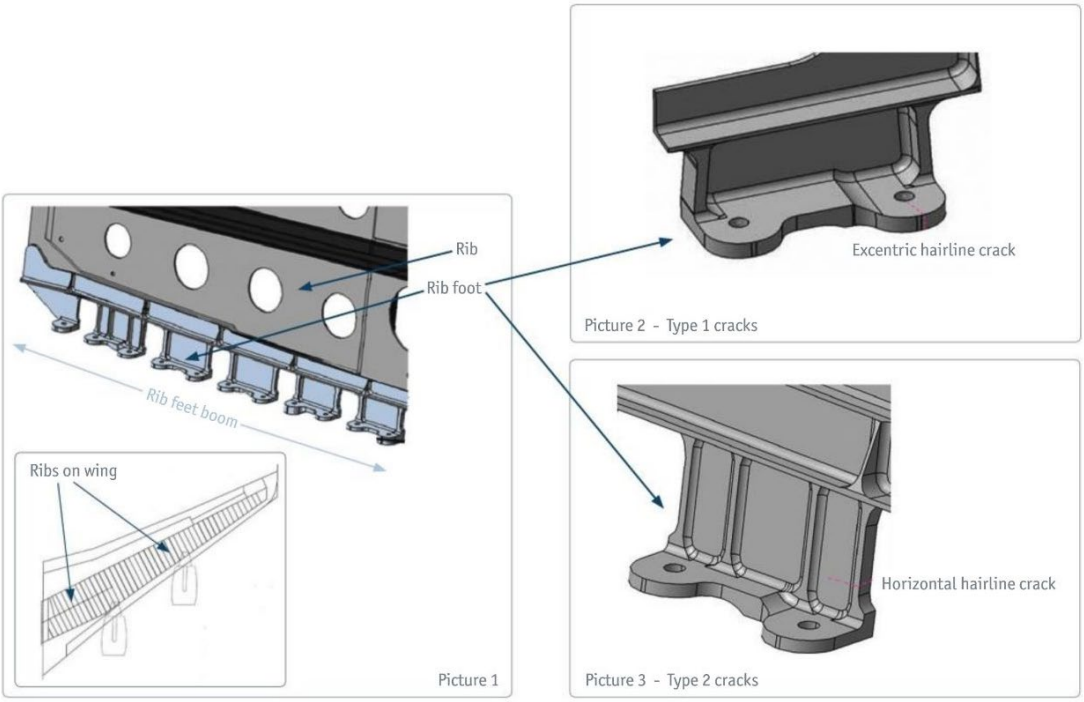
validated. Checks included flying at up to 70 degrees angle of bank to check bank angle protection, pitching up and down to create bending moments in the wing and flying to the aircraft's 43,000ft certified maximum operating altitude, high-speed cruise, an overspeed on descent to test emergency activation systems, a series of engine shutdowns and restarts, both using APU assistance or only the natural airflow to restart the engines, checking for suffcient fuel flows when the fuel pumps are switched off, hand-flying the aircraft and hand-controlling the thrust to check the aircraft's low-speed handling when flight envelope protection systems are deactivated, flap overspeed warnings are checked, alternate gear extensions performed and an emergency electrical generator test.
On return to Singapore a low-level go-around was performed to check the triggering of flight envelope protection systems."

Der Flug endete mit einer automatischen Landung. In einem weiteren Testflug wurden die Kabinen-Systeme gründlich überprüft.
Jetzt endlich, nach anderthalb Jahren, konnte im technischen Bordbuch des A380 die klitzekleine Beanstandung vom 4. November 2010 abgeschrieben werden: „Engine 2 failed during climbout" …

Am Abend des 15. April 2012 konnte Qantas-Kapitän Richard de Crespigny endlich den Flug durchführen, den er am 4. November 2010 mit dieser Maschine vergeblich versucht hatte. Er flog den Flug QF32 von Singapore nach Sydney, Australien. Ohne besondere Vorkommnisse …

Ende gut – alles gut? Der A380 hat rissige Füße

Es hätte ein schönes Happy End wie im Märchen sein können, als der wiederauferstandene A380 als QF32 nach Sydney abflog. Aber Happy Ends gibt es nicht jedes Mal im Leben. Für Airbus ging das Desaster in die nächste Runde: In der erstmals seit Indienststellung des A380 geöffneten Tragfläche fanden sich unerwartet feine Haarrisse. Und zwar an Stellen, die nichts mit dem Unfall zu tun hatten. Die Flügelrippen sind mit langen, komplizierten Alu-Winkeln mit der Flügelober- und Unterseite vernietet. Und in den „Füßen" (rib-feet) dieser Winkel fanden sich Risse. In Bauteilen, die eigentlich „für die Ewigkeit" montiert worden waren. Sie hätten die gesamte Lebensdauer der A380 halten müssen. Haben sie aber nicht.
Es begann wieder eine Zeit der Service Letters und Airworthiness Directives. Nach bestimmten Flugstunden der Flugzeuge mussten die Rib-Feet auf Risse überprüft werden. Bei Befund mussten die Bauteile gewechselt werden. Und diese aufwendigen Überprüfungen hätten immer wieder gemacht werden müssen. Mit langen Standzeiten.
Daher wurde nach einem endgültigen Fix gesucht. Airbus bot ein Modifikationsprogramm an, in dem alle Rib-Feet im Flügel beim Hersteller durch neu entworfene Bauteile aus einer anderen Legierung ersetzt wurden.
Keine Airline wollte mit gehandicapten Flugzeugen weiterfliegen. Am Ende wurden bei allen A380 die Rib-Feet ausgetauscht. Lufthansa-Technik hatte das für unsere Lufthansa A380 selbst gemacht, und meines



Blau: Die Flügelrippenhalterungen sämtlicher A380 wurden wegen Rissen in den Rib Feet ausgetauscht.
Doric Asset Finance, Offenbach

Wissens danach den Service auch anderen Airlines angeboten.
Der Wechsel der Teile war sehr aufwendig und teuer. Zuerst musste das Flugzeug vollständig enttankt werden. Die Tanks mussten gereinigt und gelüftet sein, damit man in ihnen arbeiten konnten. Man konnte ja nicht wie beim Qantas A380 über den Hauptholm ins Flügelinnere kommen. Also mussten an den Tragflächen die versiegelten Manndeckel zu den Tanks geöffnet werden.

Der A380 musste wie in Singapore in die Zero-g Position aufgebockt werden. Im Inneren der Flügel war dann konzentrierte Fleißarbeit angesagt. Die Fastener der Flügelrippenhalterungen (wing rib brackets) mit den rib-feet mussten vorsichtig ausgebohrt werden, ohne die Löcher in den Rippen oder den Flügelrippenhalterungen zu beschädigen. Die Flügelrippenhalterungen sind lange Winkel, die nicht durch die Manndeckel passen. Also mussten sie im Inneren des Flügels vorsichtig zersägt werden, wieder ohne die Befestigungs-Löcher zu beschädigen.
Außerhalb des Flugzeugs wurden dann die Befestigungs-Löcher der ausgebauten Teile auf die neuen Teile markiert und dort neue Löcher gebohrt. Die neuen kürzeren Teile wurden dann in den Flügeln eingebaut. Fertig, kaum 20.000 Arbeitsstunden und acht Wochen später!
Gut für die Gesundheit von Crews und Passagieren und für den Nachtschlaf der Techniker war natürlich, dass keine Späne, Nieten oder Werkzeuge in den Tanks zurückgelassen wurden.

Nun fliegen sie wieder, die größten Verkehrsflugzeuge der Welt. Der A380 hat den Qantas Unfall und seine Folgen gut überstanden. Auch Corona konnte ihn nicht endgültig vom Himmel holen.

Für mich persönlich war der A380 das beste Flugzeug, das ich jemals geflogen bin. Die Crews und die Passagiere, die heute damit herumfliegen, werden das sicher bestätigen können …

peter.klant@pilotundflugzeug.de

Quellen:

[1] In-flight uncontained engine failure Airbus A380-842, VH-OQA, overhead Batam Island, Indonesia, 4 November 2010; Webseite des Australian Transport Safety Bureau ATSB zum Unfall; https://www.atsb.gov.au/publications/investigation_reports/2010/aair/ao-2010-089

[2] Richard de Crespigny: QF32; The captains extraordinary account of how on of the world's worst air desaster was averted; Macmillan, Sydney, Austalia, 2012

[3] The sad story of Tanker 130, the C-130 whose wings fall off during the 2002 fire season; https://theaviationgeekeclub.com/the-sad-story-of-tanker-130-the-c-130-whose-wings-fall-off-during-the-2002-fire-season/

[4] 2018 Daytona Beach: Fatigue cracking caused Piper Arrow wing to separate in flight; https://www.flyingmag.com/ntsb-issues-report-daytona-beach-piper/

[5] United-Airlines-Flug 232Notlandung auf dem Sioux Gateway Airport; https://de.wikipedia.org/wiki/United-Airlines-Flug_232; NTSB Accident report: https://tinyurl.com/DC-10acci€dent

[6] Trent 900 Blade-off Test https://www.youtube.com/watch?v=xBReXzJ38Wc

[7] Home again – The repairs and the return of Qantas A380 VH-OQA Nancy-Bird Walton Artikel über den Wiederaufbau des Qantas A380 in Singapore von Gerard Frawley, erschienen 2012 in der Online-Zeitschrift „Australian Aviation“