

UNIVERSITÄT BIELEFELD

UNFALLURSACHENANALYSE
THE GALLOPING GHOST,
2011, RENO, NEVADA

BACHELORARBEIT

Rico Magnucki

20. September 2013

1. PRÜFER

Prof. Peter Ladkin

AG RVS Universität Bielefeld

2. PRÜFER

Dipl.-Inform. Jan Sanders

AG RVS Universität Bielefeld

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit untersucht den Absturz der P-51 D Mustang - *The Galloping Ghost* - am 16. September 2011 mittels Why-Because-Analysis. Dabei wird zunächst auf die Art des Rennens, den Piloten, das Flugzeug und seine Modifikationen und die Why-Because-Analysis eingegangen. Anschließend beschreibt die Arbeit den Unfallhergang und listet die identifizierten Faktoren auf. Darauf folgt eine Analyse und Diskussion des aus den Faktoren erstellten Why-Because-Graphen.

Die Maschine stürzte während der National Championship Air Races in der dritten von sechs Runden in den Tribünenbereich des Vorfelds des Reno Stead Airports. Dabei kamen 11 Menschen ums Leben, 64 wurden verletzt. Dem Absturz ging ein Upset voraus, welcher zusammen mit schlechter Wartung zu dem Unglück führte.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	THEORETISCHER HINTERGRUND	3
2.1	AIRRACES	3
2.2	DER PILOT	7
2.3	DAS FLUGZEUG	8
2.4	WAS IST WHY-BECAUSE-ANALYSIS	11
3	DER UNFALL	14
3.1	UNFALLHERGANG	14
3.2	IDENTIFIZIERTE FAKTOREN	16
3.3	POTENTIELLE UMWELTBEDINGTE FAKTOREN	21
3.3.1	WINDBÖEN	21
3.3.2	WIRBELSCHLEPPEN	21
3.4	ENTSTANDENER SCHADEN	22
4	ANALYSE	23
4.1	WHY-BECAUSE-GRAPH	23
4.2	VERIFIKATION DES HAUPTGRAPHEN	23
5	DISKUSSION	32
5.1	WARTUNGSBEDINGTE FAKTOREN	32
5.2	UPSET UND DESSEN FOLGEN	33
5.3	ZUSAMMENSPIEL VON UPSET UND SCHLECHTER WARTUNG	34
6	FAZIT	35

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ALLGEMEINE ABKÜRZUNGEN

AAF	Army Air Force	9
NTSB	National Transportation Safety Board	2, 10, 18, 21, 33, 35
PDT	Pacific Daylight Time (Pazifische Sommerzeit)	14, 21

WHY-BECAUSE SPEZIFISCHE ABKÜRZUNGEN

CFT	Counterfactual Test	11, 12, 23
CST	Causal Sufficiency Test	11, 12, 23
NCF	Necessary Causal Factor	11, 13
WBA	Why-Because-Analysis	1, 2, 11, 35
WBG	Why-Because-Graph	iii, 11, 12, 23, 24, 26, 28, 31, 32, 35, 37

LUFTFAHRTSPEZIFISCHE ABKÜRZUNGEN

ADI	Anti-Detonation Injection	8, 10
ANG	Air National Guard	3
CAA	Civil Aeronautics Administration	9
FAA	Federal Aviation Administration	8
NAA	North American Aviation	8, 9
NCAR	National Championship Air Race (kurz Reno Air Race)	1, 3, 4, 7, 14, 37
RARA	Reno Air Racing Association	33
RSA	Reno Stead Airport	14, 22

EINLEITUNG

Dem Vergnügen des Geschwindigkeitsrennens frönt der Mensch schon sehr lange. So haben zum Beispiel die Römer im Kolosseum Wagenrennen ausgetragen. Mit dem technischen Fortschritt wurde der Wettkampf um viele Disziplinen erweitert. So gibt es heute neben dem »um die Wette laufen« Rennen, die mit verschiedenen starken Automobilen, Motorrädern, Schiffen oder Flugzeugen ausgetragen werden. Mit zunehmender Technisierung steigt die Geschwindigkeit dieser Rennen und somit auch die Unfallgefahr.

Der in dieser Arbeit betrachtete Unfall ereignete sich während eines Luftrennens in den Vereinigten Staaten von Amerika. In Reno, Nevada, werden jedes Jahr die National Championship Air Races (NCARs) ausgetragen. Bei diesem Großereignis treten Piloten in sechs verschiedenen Flugzeugklassen gegeneinander an. Bei dem verunglückten Flugzeug handelte es sich um eine stark modifizierte P-51 Mustang mit dem Namen *The Galloping Ghost* (siehe Abschnitt 2.3), geflogen von *James Leeward* (siehe Abschnitt 2.2).

Während der dritten Runde des Rennens kam es zu technischen Problemen, woraufhin die Maschine vom Kurs abkam und auf das Vorfeld des Stead Airports stürzte. Elf Menschen verloren bei diesem Unfall ihr Leben, mehr als 60 wurden verletzt.

Die heutige Zeit ist eine schnelllebige und das in vielerlei Hinsicht. Nicht nur, dass jedwede neue Entwicklung die vorherige in Funktion und Komplexität weit übersteigt, auch der Entwicklungszyklus wird immer kürzer. Diese Masse an Informationen, Vorgängen, Abläufen und immer neuen Möglichkeiten erfordert Analysemethoden, die entstandene Probleme objektiv und reproduzierbar untersuchen können. Die Why-Because-Analysis (WBA) (siehe Abschnitt 2.4) eröffnet Möglichkeiten der Analyse, die nicht einzelnen Anwendungsbereichen

vorbehalten sind, da sie weder über die Art noch über die Struktur des zu untersuchenden Systems Annahmen macht [1]. Somit eignet sie sich sowohl zur Untersuchung eines Schiffsunglücks als auch für die detaillierte Analyse eines Flugzeugabsturzes.

Diese Arbeit verwendet die WBA um den Absturz der *Galloping Ghost* zu untersuchen. Als Grundlage dienen der Untersuchungsbericht der National Transportation Safety Board (NTSB) [2] und die dazugehörigen Berichte und Protokolle aus dem Public Docket.¹

Die Möglichkeit, eine Analysemethode zu verwenden, die auf nahezu jeden technischen Bereich anwendbar ist, hat mich sehr fasziniert. Die P-51D Mustang ist ein sehr schönes, nahezu ikonisches Flugzeug, dem mein Interesse schon früher galt. Dass ein solcher Zeitzeuge durch einen Unfall zerstört wird, ist schade, nicht jedoch so tragisch wie die Tatsache, dass bei dem Unglück 11 Menschen ihr Leben verloren und 64 verletzt wurden. Für den Autor ist diese Arbeit ein Ansporn, sich näher mit der Methode der Why-Because-Analysis und dem Flugzeug auseinanderzusetzen, um das erlangte Wissen um die Unfallanalyse auch im späteren Werdegang situationsübergreifend anzubringen und zu nutzen.

¹<http://dms.nts.gov/pubdms/search/hitlist.cfm?docketID=51746&CFID=66206&CFTOKEN=83348660>

KAPITEL 2

THEORETISCHER HINTERGRUND

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den theoretischen Hintergründen, die nötig sind, um der Analyse zu folgen. Dabei wird auf Luftrennen im Allgemeinen und die National Championship Air Races im speziellen eingegangen, der Werdegang des Piloten aufgegriffen, die Geschichte des Flugzeugs beschrieben und eine Zusammenfassung des Vorgehens der Why-Because-Analysis gegeben.

2.1 AIRRACES

DEFINITION 1 (Air Race) *Luftrennen sind Geschwindigkeitsrennen, bei denen ein festgelegter Kurs möglichst schnell mit einem Flugzeug abgeflogen wird. Gewinner ist, wer die Strecke in der kürzesten Zeit absolviert.*

NATIONAL CHAMPIONSHIP AIR RACE

Das erste National Championship Air Race (NCAR) fand im September 1964 auf der »Sky Ranch« in der Nähe von Reno, Nevada, statt. Organisiert wurde dieses Großereignis von William M. (Bill) Stead, einem Landwirt und Piloten aus der Gegend. Im darauffolgenden Jahr wurde das Ereignis auf den Reno-Stead-Flughafen verlegt. Dieser ist nach dem Bruder des Initiators, Croston Stead, benannt, welcher als Militärpilot der Air National Guard (ANG) im Einsatz tödlich verunglückte. Bill Stead selbst starb am 28. April 1966 bei einem Trainingsflug für ein Rennen Florida. [3, S. 6, 7]

Noch heute findet das Rennen im September jeden Jahres statt. Mit den vielfältigen Shows ist es eines der größten Luftfahrtevents weltweit.

Das Rennen wird in sechs verschiedenen Klassen ausgetragen. Neben Sportflugzeugen, Jets, Doppeldeckern und *Formel 1*-Flugzeugen, nehmen auch sog. Flugzeuge der *T-6*, und *Unlimited Class* teil. Da die verunglückte Maschine (siehe Abschnitt 2.3) in letzterer partizipierte, konzentriert sich diese Arbeit auf die *Unlimited Class*. Bei dieser Klasse handelt es sich um modifizierte und originalgetreue Jagdmaschinen aus dem zweiten Weltkrieg.

DIE REGELN

Wie in Abschnitt 2.1 »National Championship Air Race« beschrieben, konzentriert sich die Darstellung auf das Regelwerk der *Unlimited Class*.

RENNSTART

Die Flugzeuge dieser Klasse vollziehen einen fliegenden Start. Alle Maschinen befinden sich in der Luft, bilden die Startformation hinter dem sog. *Pace Plane* und fliegen geschlossen den Startkorridor (siehe Abbildung 2.2) an. Die jeweilige Position wird durch die Zeiten der Qualifikationsrennen bzw. die Platzierung des Vortagsrennens bestimmt (siehe Abschnitt 2.1 Ablauf). Das Rennen ist offiziell eröffnet, wenn der Pilot des *Pace Plane* über die Rennfrequenz »race start« verkündet. Befindet sich kein *Pace Plane* in der Formation, übernimmt der Pilot der führenden Maschine diese Aufgabe. Zu dem Zeitpunkt, an dem er die Startlinie überquert, müssen sich alle Flugzeuge im Startkorridor befinden.

Fliegt ein Flugzeug auf anderem Wege auf die Rennstrecke wird es disqualifiziert. Der Start wird nicht verschoben, wenn ein Pilot mechanische, physikalische oder Treibstoffprobleme meldet. Ist ein Teilnehmer nicht in der Lage die Startformation zu finden wird er disqualifiziert. [5, S. 10, 11]



Abbildung 2.1: Pylon mit Aufschrift »RENO« [4, S. 9]

MINIMALE & MAXIMALE FLUGHÖHE

Als Orientierungspunkt für die Flughöhe wird die Augenhöhe des Piloten verwendet, welche das Gesamte Rennen oberhalb der Pylonen sein muss. Eine Ausnahme dieser Regel bildet der »Home Pylon«. Während des Passierens dieser Begrenzung darf die Flughöhe das untere Ende des »R«s im Schriftzug »RENO« nicht unterschreiten (siehe Abbildung 2.1). Ein Verstoß wird mit Disqualifizierung geahndet. Wiederholtes Unterschreiten der Mindestflughöhe führt zu einer Flugsperre.

Die maximale Flughöhe beträgt 350 ft, was 106,68 m entspricht. Aufgrund der Beschaffenheit der Strecke und den Eigenschaften einiger Flugzeuge, hat diese Regel mehrere Ausnahmen und Einschränkungen. Um sich richtig in die Startformation einzuordnen, dürfen beispielsweise Überholmanöver in größeren Höhen geflogen werden. Befindet sich ein Maschine in einer Qualifikations- oder Endrunde, darf die Höhe von 250 ft nicht überschritten werden, da die Messung der Hochgeschwindigkeitskameras sonst nicht gewährleistet ist. Sollte die Messung fehlgeschlagen sein, erhält der Pilot den Eintrag »No Time«.

Während der Gold-Rennen (siehe Abschnitt 2.1 Ablauf) der *Jet-* und *Unlimited Class* existiert aus Sicherheitsgründen eine weitere Sonderregel. Da Flugzeuge dieser Klassen Geschwindigkeiten von mehr als 500 mph erreichen können, ist die maximale Flughöhe beim Passieren von Pylon 8 auf 250 ft limitiert. Dies gewährleistet die Sicherheit der Besucher auf den Tribünen und das Einhalten des vorgeschriebenen maximalen Kurvenradius. Das Nichteinhalten dieser Regel wird mit Disqualifikation geahndet.

Ist ein Pilot nicht in der Lage den Kurs einzuhalten, während er die südliche Grenze des Kurses erreicht, welche durch das Südende von Start- und Landebahn 08/26 (siehe Abbildung 2.2) dargestellt wird, muss er auf eine Höhe von 1500 ft steigen und eine »Escape Route« fliegen. Diese führt hinter den Zuschauertribünen zurück auf den Kurs, wobei auf der Rennstrecke befindliche Maschinen Vorrang haben. Dieses Manöver wird nicht sanktioniert [5, S. 11,12].

RENNENDE

Der Pilot, der nach ausreichend vielen Runden als erster die Ziellinie (siehe Abbildung 2.2) überfliegt, beendet das Rennen. Allen nachfolgenden Maschinen wird beim Passieren der Ziellinie durch die schwarz-weiß-karierte Flagge das Ende des Rennens mitgeteilt. Gewonnen hat der Pilot, der nach Abzug aller Strafzeiten den Kurs als Schnellster absolviert hat [5, S. 13].

DIE RENNSTRECKE

Bei der Rennstrecke handelt es sich um ein durch zwölf Pylonen abgegrenztes Oval von 8,4333 Meilen Umfang (siehe Abbildung 2.2). Der Kurs ist für Geschwindigkeiten von 500 mph und Belastungen von 3,5 G ausgelegt. Neun der beschriebenen Pylonen, auch Rennpylonen genannt, haben Nummern von 1 – 9. Sie stellen die eigentliche Abgrenzung der Rennstrecke dar. Zwei der Pylonen dienen der Orientierung, sie sind in Abbildung 2.2 mit »Guide Pylon« markiert. Der zwölfte Pylon, »Home Pylon« genannt, weist die Piloten darauf hin, dass sie die Sichtlinie der Besucher passieren, welche in Abbildung 3.1 durch eine grüne Linie symbolisiert ist. Die Startgerade ist eine gedachte Linie, ausgehend vom »Home Pylon«, parallel zur Start- und Landebahn 08/26. Die Zielgerade entsteht durch Projektion einer orthogonalen Linie auf Start- und Landebahn 08/26, die den »Home Pylon« schneidet (siehe Abbildung 2.2) [5, S. 9–11].

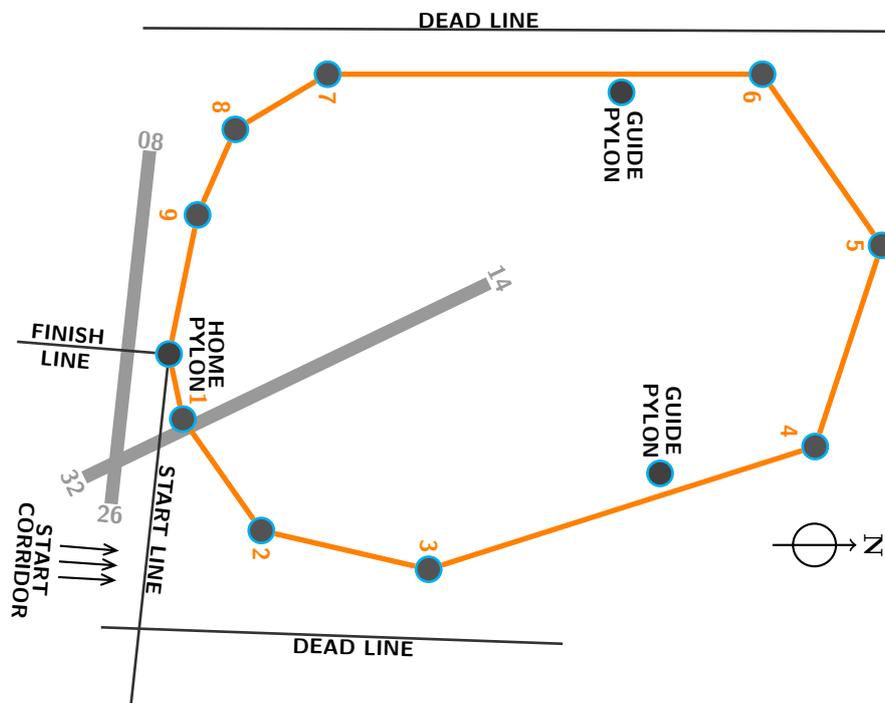


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des abzufliegenden Kurses. Pylonen werden durch Kreise symbolisiert und nummeriert. Der Übersicht halber wurde die Grafik² auf den Kurs der *Unlimited Class* reduziert. Zusätzlich wurden Anhang B der offiziellen Rennregeln [5, S. 50] die Hilfslinien entnommen.

²Original: http://www.airrace.org/images/attheraces_course_photo.gif

ABLAUF

Die Veranstaltung folgt in der Regel einem Vier- bis Fünf-Tages-Plan. Dabei werden die Klassen in verschiedene Ligen, abhängig von den Qualifikationsergebnissen, eingeteilt. Der typische Ablauf eines solchen Großereignisses ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

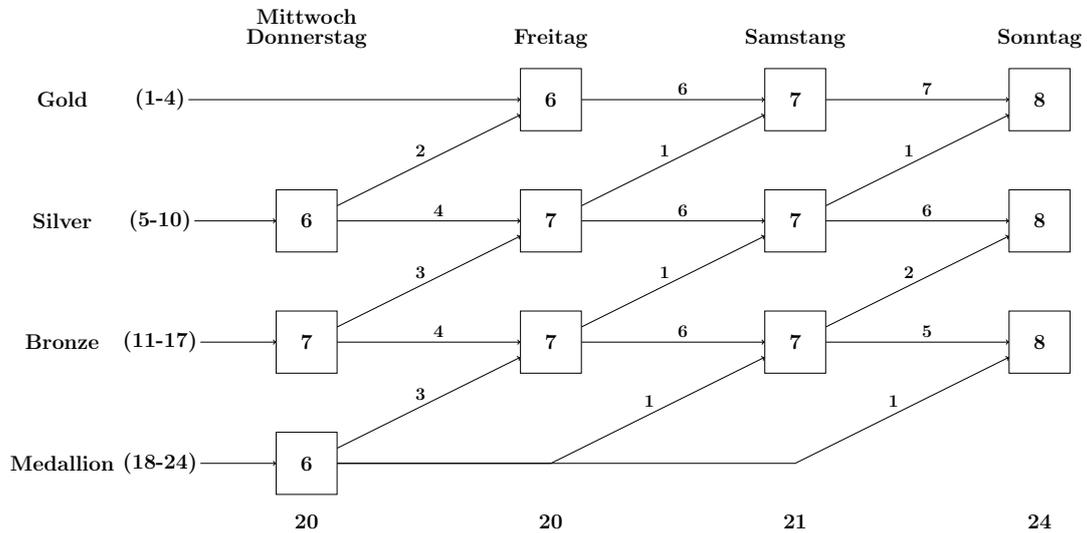


Abbildung 2.3: Schematischer Ablaufplan der National Championship Air Races

Abhängig von ihren Qualifikationszeiten werden die Flugzeuge in verschiedene Ligen (Gold-, Silber-, Bronze- und Medallionklasse) eingeteilt. Am ersten Tag werden noch keine Rennen der Goldklasse ausgetragen. Der zweite, dritte und letzte Tag, beinhaltet nur Rennen der Gold-, Silber- und Bronzекlasse. Die besten Piloten der jeweiligen Klassen steigen in die nächstbeste Klasse auf (siehe Abbildung 2.3). Das Ergebnis des Qualifikationsprozesses sind drei Rennen mit jeweils acht Teilnehmern.

2.2 DER PILOT

Der Pilot des Unglücksflugzeugs war *James »Jimmy« Kent Leeward*. Sein Vater handelte mit gebrauchten Flugzeugen und so verbrachte auch *»Jimmy« Leeward* schon früh viel Zeit auf dem Flugplatz. Seine Aufgaben reichten vom Waschen bis hin zum Reparieren von Flugzeugen. Schon früh lehrte sein Vater ihn das Fliegen und im Alter von 14 Jahren absolvierte er seinen ersten Soloflug in einer *AT-6*. Der offizielle Einzelflug folgte mit 16 Jahren in einem zweimotorigen *Cessna T-50 Bamboo Bomber*. Noch während er auf dem College war nahm er an einem *Formel 1 Air Race* teil [6].

Neben der Fliegerei war die Immobilienentwicklung (*englisch*: real estate development) sein zweites Standbein. Besonders lag ihm das Projekt der *Leeward Air Ranch*³ am Herzen. Dabei handelt es sich um eine Art Flugplatz mit integrierter Wohnanlage. Die Bewohner haben dementsprechend nicht nur eine Garage für ihr Auto, sondern auch einen Hangar für das eigene Flugzeug [6].

Zum Zeitpunkt des Unfalls war »Jimmy« *Leeward* 74 Jahre alt. Seinem letzten Gesundheitscheck (durchgeführt 2010 von der Federal Aviation Administration (FAA)) zufolge war er ohne Einschränkungen flugtauglich. Die einzigen bekannten Erkrankungen des Piloten beliefen sich auf erhöhte Homocysteine im Blut und erhöhte Cholesterinwerte. [2, S. 2, 3]

Den medizinischen und pathologischen Angaben des Unfallberichts [2, S. 9, Abschnitt 1.8] zufolge starb *James Leeward* an den Folgen multipler stumpfer Gewalteinwirkung infolge des Flugzeugabsturzes. Eine Muskelprobe wurde positiv auf Ethanol und Methanol getestet. Die Anti-Detonation Injection (ADI) Flüssigkeit des Flugzeugs enthielt beide Chemikalien, weshalb das Testergebnis als Verunreinigung eingestuft wurde. Die Analyse deutete auf keinerlei Spuren von Drogen hin [2, S. 10].

2.3 DAS FLUGZEUG

Bei dem verunglückten Flugzeug handelte es sich um eine der 900 von North American Aviation (NAA) gebauten P-51D-15-NA Mustangs. Die Mustang ist eine Ikone des amerikani-



Abbildung 2.4: P-51D *The Galloping Ghost* (Originalzustand) Illustrationen im Profil.⁴[7]

³<http://www.leewardairranch.com/>

⁴http://www.taichiunlimiteddrawings.com/Galloping_Ghost_1947_color_profile-WAP.jpg

schen Luftkampfes. Sie verfügt über eine hohe Reichweite und Agilität, wodurch sie oft als Begleitflieger für Bomber wie die P-38 Lightning eingesetzt wurde [8].

Das Flugzeug wurde am 23. Dezember 1944 an die Army Air Force (AAF) ausgeliefert und gehörte der »Third Air Force« an. Sie wurde am 25. Oktober 1945 als *überschüssig* ausgemustert und in Walnut Ridge (Arkansas) eingelagert [9]. Um eine Vorstellung davon zu bekommen, welchen Veränderungen das Flugzeug unterzogen wurde, wird in Abbildung 2.4 der Originalzustand gezeigt. Gut zu erkennen ist die sog. »Bubble-Top«-Kanzel. Diese Neuerung ermöglichte dem Piloten eine weit bessere Sicht als das sonst übliche »Turtle-Deck«, wie es z. B. die P-51-C hatte.

Das Flugzeug mit der AAF-Seriennummer 44-15651 [10] wurde am 22. Juli 1946 von den Piloten Bryce Raymond und Steve Beville für 3500 \$ [11] gekauft und bei der Civil Aeronautics Administration (CAA) als N79111 registriert. [9] Die NAA gab der Maschine die Startnummer 77. Den Namen *The Galloping Ghost* trägt das Flugzeug in Gedenken an Footballstar Harold »Red« Grange und zu Ehren der University of Illinois[9]. Raymond und Beville entfernten

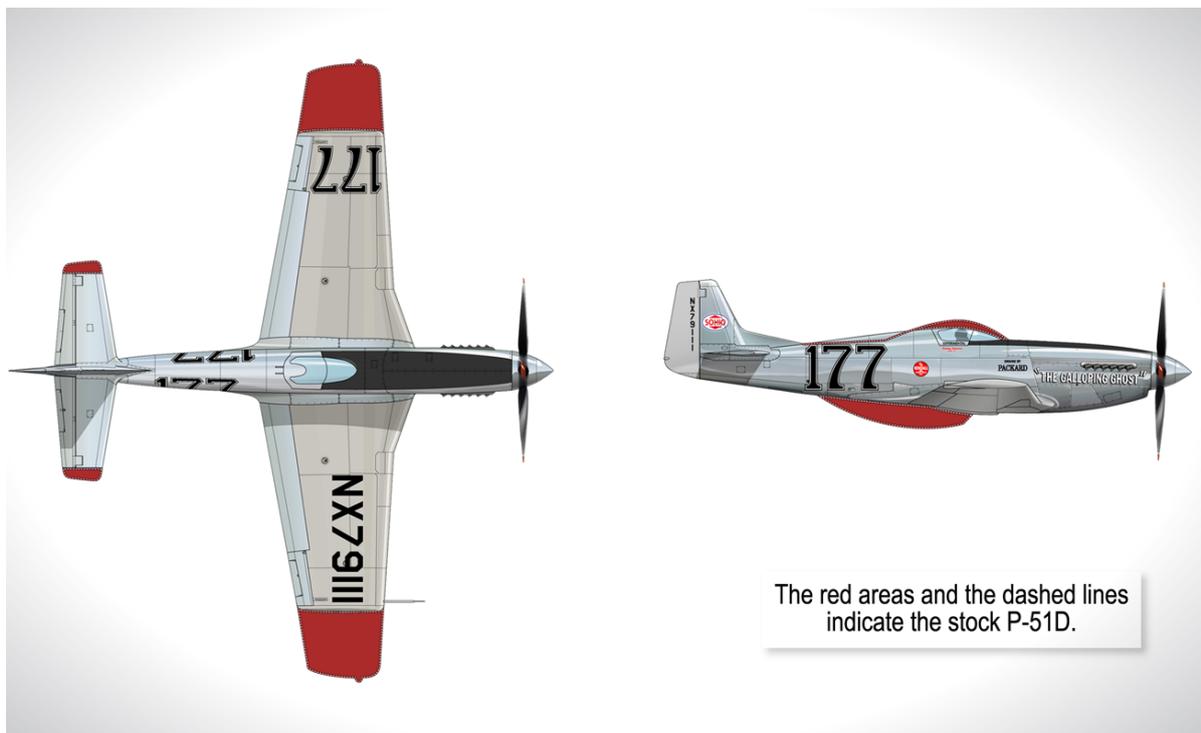


Abbildung 2.5: Übersicht der Modifikationen, die am Flugzeug vorgenommen wurden. Die rot eingefärbten Flächen entsprechen dabei den entfernten Teilen [2].

alle unnötigen Teile um Gewicht zu sparen. Nachdem dies erledigt wurde widmeten sie sich der Leistung. Die aus ihrer Sicht wichtigste Maßnahme zur Erhöhung der Pferdestärken

war der Einbau einer Wassereinspritzanlage für den Rolls-Royce-Merlin-Motor. Durch die Verwendung eines neuen Benzins mit sehr hoher Oktanzahl und eines sog. ADI-Fluids wurde eine weitere Leistungssteigerung erreicht. Nach einigen Rennen wurde *The Galloping Ghost* im Jahr 1950 an Jack Hardwick verkauft. In den folgenden Jahren wechselte die Maschine einige Male den Besitzer, bis sie 1983 von James »Jimmy« Leeward gekauft wurde [11].



Abbildung 2.6: P-51D *The Galloping Ghost* (Rennzustand) Illustrationen im Profil⁵[12]

An der P-51D wurden viele Modifikationen durchgeführt. Raymond und Beville entfernten viele der schwerwiegenden Teile, um schneller fliegen zu können. Sie verdichteten und glätteten die Oberfläche des Flugzeugs so stark, dass ein runtergefallener Polierlappen sofort daran herunterrutsche [9]. Zusätzlich zu der Wassereinspritzung bekam die Maschine einen luftwiderstandsverringernenden Wärmetauscher, der sowohl die Funktion des Radiators als auch des Ölkühlers übernahm. Dieser Wärmetauscher befand sich in einem Gemisch aus Wasser und Methanol, welches während des Fluges verdampfte. Aus aerodynamischen Gründen wurde auch das nach hinten schiebbare »Bubble-Top« der P-51D durch ein nach oben zu öffnendes »Turtle-Deck« ersetzt (siehe Abbildungen 2.5 & 2.6). Auf Abbildung 2.5 ist des Weiteren zu erkennen, dass sowohl die Tragflächen als auch die Ruder stark verkürzt und der große Lufteinlass an der Unterseite des Flugzeugs entfernt wurden. Aus dem Bericht des NTSBs geht weiterhin hervor, dass auch die Motoraufhängung den enormen Gravitationskräften angepasst wurde [2, S. 13]. Die in Abbildung 2.6 dargestellte Profilansicht zeigt den Zustand, in dem sich das Flugzeug vor dem Unfall befand. Vergleicht man diese Darstellung mit der aus Abbildung 2.4 wird klar, wie drastisch die Veränderungen waren.

⁵<http://www.leewardairranch.com/system/files/u2/GG-177-profile1.jpg>

2.4 WAS IST WHY-BECAUSE-ANALYSIS

Die WBA ist eine Methode zur detaillierten Darstellung und Untersuchung von ungewünschtem Systemverhalten. »Why-Because-Analysis überprüft und leitet die kausalen Zusammenhänge zwischen den Faktoren her und kann als informale, semi-formale oder formale Methode angewendet werden.« [1] Die WBA eignet sich für die Unfallursachenanalyse einer Vielzahl von Bereichen.

DEFINITION 2 (Unfall) *Ein Unfall ist ein Ereignis, das zu einem signifikanten Verlust führt, bezogen auf den aktuellen Interessenbereich [13, S. 5].*

Die WBA bedient sich zweier grundlegender Tests zur Gewährleistung der Korrektheit und Vollständigkeit.

Zur Prüfung der Korrektheit wird der Counterfactual Test (CFT), (siehe Definition 3) herangezogen. Dieser Test nach *David Hume* und *David Levis* stellt die Korrektheit von Ursachen-Wirkung- Beziehungen sicher. Ist der Test erfolgreich, handelt es sich um Necessary Causal Factors (NCFs), (siehe Definition 4) [1, 13, S. 7].

DEFINITION 3 (Counterfactual Test) *Die essentielle Frage des Counterfactual Test ist, ob die Wirkung hätte eintreten können, wenn die Ursache nicht geschehen wäre. Wird diese Frage mit »Nein« beantwortet, war der Test positiv [1, 13, S. 7].*

DEFINITION 4 (Necessary Causal Factor) *Haben zwei Faktoren den Counterfactual Test mit »Nein« beantwortet, handelt es sich bei der **Ursache** um einen »notwendigen kausalen Faktor« (NCF) [1, 13, S. 7].*

Das Ergebnis einer WBA ist ein sog. Why-Because-Graph (WBG), welcher einfach und übersichtlich auch komplexe Geschehen darstellt. Mathematisch ist der WBG ein gerichteter, azyklischer Graph. Kausale Faktoren werden durch Knoten, Ursache-Wirkung-Beziehungen durch gerichtete Kanten dargestellt. Um die relative Vollständigkeit zu gewährleisten wird der Causal Sufficiency Test (CST) (siehe Definition 5) verwendet [1, 13, S. 8].

DEFINITION 5 (Causal Sufficiency Test) *Ist die Wirkung eine zwingende Folge aller aufgeführten Ursachen, gilt der CST als bestanden. Die Gruppe der getesteten Faktoren wird als relativ-vollständig bezeichnet [1, 13, S. 8].*

Die Verwendung beider Tests gewährleistet einen korrekten, relativ-vollständigen Graphen, der durch den Formalismus der WBA objektiv, falsifizierbar und reproduzierbar ist. [1]

BEISPIEL EINES WHY-BECAUSE-GRAPHEN

Als überschaubares Beispiel dient ein Kaugummiautomat. Die einfache Funktionsweise dieses Geräts ermöglicht eine anschauliche Darstellung des Sachverhalts und der Methode. Das Funktionsprinzip ist simpel. Es werden 10 ct in den dafür vorgesehenen Schlitz eingeführt und der Drehmechanismus betätigt, woraufhin ein Kaugummi aus einer Öffnung fällt. Aus dem vorhergehenden Satz lassen sich drei Faktoren herauslesen.

Faktor – Event: 10 ct in den Münzschlitz stecken

Bezahlung der Ware.

Faktor – Event: Drehmechanismus betätigen

Um die Maschine in Gang zu setzen, muss die Münze mittels dieses Mechanismus in das Innere des Automaten gedreht werden.

Faktor – Event: Erhalten des Kaugummis

Nach erfolgreichem Münzeinwurf fällt ein Kaugummi aus dem dafür vorgesehenen Schacht.

Es existieren jedoch noch zwei weitere Faktoren, die gegeben sein müssen, um einen Kaugummi zu erhalten. Der Automat muss funktionsfähig sein und es müssen sich Kaugummis im Behälter befinden.

Faktor – State: Der Automat muss funktionstüchtig sein

Dieser Zustand muss die gesamte Zeit über eingehalten werden.

Faktor – State: Es befindet sich ein Kaugummi im Automaten

Befindet sich kein Kaugummi im Automaten, kann kein Kaugummi erhalten werden. Dieser Zustand muss die gesamte Zeit über eingehalten werden.

Erst wenn alle vier Faktoren vorhanden sind, funktioniert das Gerät einwandfrei. Daraus ergibt sich ein WBG, der in Abbildung 2.7 dargestellt ist.

Um die Korrektheit und Vollständigkeit zu testen, werden der Counterfactual Test (Definition 3) und Causal Sufficiency Test (Definition 5) angewendet.

Counterfactual Test:

Kann ein Kaugummi erhalten werden, wenn kein Geld in den Münzschlitz eingeführt wird?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Kann ein Kaugummi erhalten werden, wenn sich kein Kaugummi im Automaten befindet?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Kann ein Kaugummi erhalten werden, wenn der Drehmechanismus nicht betätigt wird?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Kann ein Kaugummi erhalten werden, wenn der Automat nicht funktionstüchtig ist?

Antwort: Nein

Causal Sufficiency Test:

Kann nur dann ein Kaugummi erhalten werden, wenn alle vier Faktoren eintreten?

Antwort: Nein

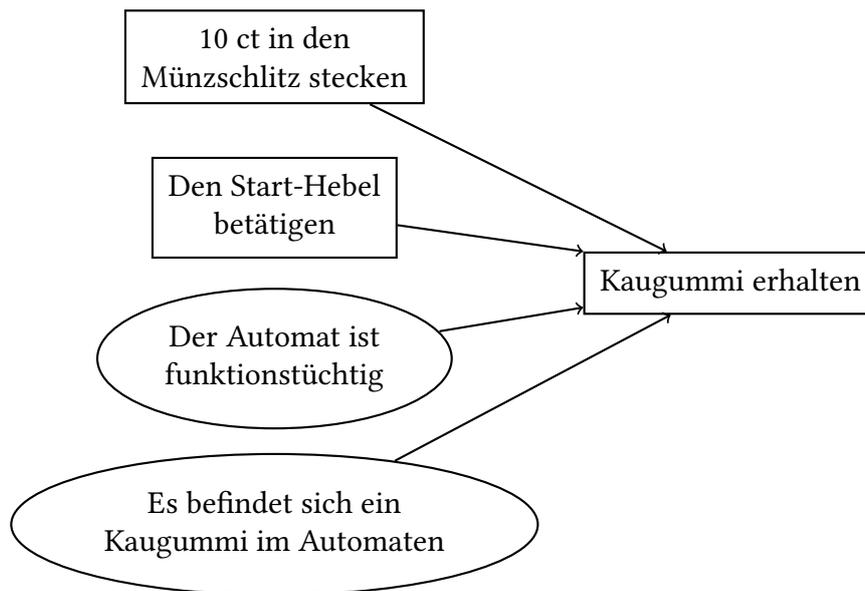


Abbildung 2.7: WBG zum Beispiel des Kaugummiautomaten, alle vier Faktoren sind Necessary Causal Factors. Der Graph ist kausal vollständig.

DER UNFALL

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Unfall. Es werden der Hergang und die identifizierten Fakten beschrieben. Abschließend werden sowohl der entstandene Schaden als auch die direkten Folgen des Unfalls aufgegriffen.

3.1 UNFALLHERGANG

DEFINITION 6 (Upset) *Bei einem Upset handelt es sich um ein unvorhergesehenes Verhalten eines Flugzeugs während des Flugs.*

Am Sonntag, dem 16. September 2011, um ca. 16:25 Uhr Pacific Daylight Time (Pazifische Sommerzeit, PDT) stürzte die stark modifizierte P-51 Mustang *The Galloping Ghost* (siehe Abschnitt 2.3) während des National Championship Air Race auf das Vorfeld des Reno Stead Airport (RSA), auf dem sich unter anderem die Zuschauertribünen befinden. Bei dem Absturz kamen 10 Zuschauer und der Pilot ums Leben. Insgesamt wurden 64 Personen aus dem Publikum verletzt.

Während der dritten von sechs Runden des Gold- Rennens der *Unlimited-Class* (siehe Abschnitt 2.1) befand sich die Maschine auf dem dritten Platz, als sie mit einer Geschwindigkeit von annähernd 445 kn (824,14 km/h) Pylon 8 (Abbildung 3.1) passierte. Dabei kam es zum Upset, der mit einem unvorhergesehenen Rollen nach links über 73° hinaus begann. Während der Rollbewegung, die zu einem Winkel von annähernd 93° führte, wirkten auf Flugzeug und Piloten Kräfte von approximativ 11 G. Anschließend vollführte die Maschine



Abbildung 3.1: Darstellung des abzufliegenden Kurses. Pylonen sind durch blaue, rote und gelbe Dreiecke markiert. Die Absturzstelle markiert ein roter Kreis, auf den ein weißer Pfeil mit der Aufschrift »Accident Site« zeigt [2, S. 3] (verkleinerte Abbildung)

eine Rechtsdrehung, während sie gleichzeitig parallel in einen starken Steigflug ging. Am Höhepunkt dieses Manövers betrug die vertikale Beschleunigungskraft 17,3 G. Unmittelbar danach löste sich das Trimmruder des linken Höhenruders aus der Verankerung, wodurch sich die Steuercharakteristik des Flugzeugs veränderte. Das effektive Reaktionsfenster des Piloten betrug weniger als eine Sekunde bevor er bewusstlos wurde. Die Maschine stürzte helikal zu Boden und schlug auf dem Vorfeld in der Nähe einer Besuchertribüne auf. Durch den Aufprall wurden 64 Menschen verletzt, 11 davon tödlich [2, S. 1,2].

Tabelle 3.1 stellt den Unfallhergang in Bezug auf die verstrichene Zeit dar. Dabei wird besonders Augenmerk auf die Stellung der Trimmruder gelegt.

Tabelle 3.1: Timeline des Unfalls [2, S. 19] Es werden die Zeit, die verstrichene Zeit und die Ereignisse des Unfalls zusammengefasst.

Zeit [hh:mm:ss,f]	verstrichene Zeit [s]	Ereignisse
16:24:28,9	0	Umrundung von Pylon 8 Flugzeug beginnt über 73° nach links zu rollen
16:24:29,17	0,27	Trimmrudder des linken Höhenruders zeigt nach oben Trimmrudder des rechten Höhenruders gerade Pilot beginnt gegenzusteuern
16:24:29,46	0,56	Anstellwinkel des linken Trimmruders mind. 21°
16:24:29,73	0,83	Maximaler Neigungswinkel von 93° erreicht Flugzeug erreicht maximale vertikale Beschleunigung
16:24:30,20	1,3	Hinterrad fährt aus Trimmrudder des rechten Höhenruders zeigt nach unten Trimmrudder des linken Höhenruders gerade
16:24:30,34	1.44	Trimmrudder des rechten Höhenruders zeigt nach oben Trimmrudder des linken Höhenruders zeigt nach unten Querrudder bei maximaler oder nahezu maximaler Auslenkung
16:24:32,00	3.1	Höhepunkt des Steigflugs wird erreicht Teil des Trimmruders des linken Höhenruders löst sich von der Aufhängung
16:24:33,50	4.6	Innenliegender Teil des Trimmruders des linken Höhenruders separiert sich
16:24:38.00	9.1	Flugzeug schlägt auf dem Boden auf

3.2 IDENTIFIZIERTE FAKTOREN

Faktor – Event – 0

nach 16:24:38,00

Text: 11 Personen sterben, 64 werden verletzt

Anmerkung: keine

Faktor – Event – 1

16:24:38,00

Text: Flugzeug schlägt auf dem Boden auf

Anmerkung: Pylon 8 liegt im Sichtfeld - und somit in unmittelbarer Nähe - des Flughafenvorfeldes, auf dem sich die Zuschauertribünen befinden.

Faktor – Event – 2

Text: Kontrollverlust seitens des Piloten

Anmerkung: Ohnmächtig und in das Cockpit gedrückt hatte der Pilot keine Möglichkeit das Flugzeug zu steuern.

Faktor – Event – 3.1

Text: Pilot wird ohnmächtig (Blackout)

Anmerkung: Die hohen Kräfte, die auf den Körper von *James Leeward* wirkten, verhinderten eine ausreichende Sauerstoffversorgung des Gehirns.

Faktor – Event – 3.2

Text: Pilot wird in das Cockpit gedrückt

Anmerkung: Den enormen Kräften ausgesetzt, drückt es den Körper des Piloten nach vorne in das Cockpit.

Faktor – Event – 4

Text: Es wirken enorme Kräfte auf Pilot und Flugzeug

Anmerkung: Das abrupte Manöver bewirkt, dass innerhalb von weniger als einer Sekunde 17.3 G auf Pilot und Flugzeug wirken.

Faktor – Event – 5

Text: helikaler Steigflug

Anmerkung: Das gleichzeitige Steigen und Rollen nach rechts resultiert in einem helikalen Steigflug.

Faktor – Event – 6

Text: Maschine rollt nach rechts

Anmerkung: Reaktion auf die »Right-Wing-Down«-Stellung der Querruder.

Faktor – Event – 7

16:24:29,47

Text: »Right-Wing-Down«-Stellung der Querruder sichtbar

Anmerkung: Ergebnis des Gegensteuerns des Piloten.

Faktor – Event – 8

16.24:29,17

Text: Pilot steuert dagegen

Anmerkung: Um die extreme Fluglage zu korrigieren, beginnt der Pilot, ein Gegenmanöver zu initiieren.

Faktor – Event – 9.1

Text: Maschine beginnt Steigflug

Anmerkung: Die verringerte Funktionsfähigkeit des Höhenruders lässt die Maschine steigen.

Faktor – Event – 9.2**16:24:29,73**

Text: Extreme Fluglage von 93°

Anmerkung: keine

Faktor – Event – 10.1**16:24:33,5**

Text: Innenbordabschnitt des linken Trimmruders separiert sich

Anmerkung: keine

Faktor – Event – 10.2**16:24:28,9**

Text: Upset

Anmerkung: Unerwartete Reaktion des Flugzeugs. In diesem Fall handelte es sich um ein Rollen linksseits.

Faktor – Event – 10.3

Text: Ausgeprägte Änderung in der Vibrationsamplitude

Anmerkung: Der Unfallbericht des NTSB [2] beweist - unter Zuhilfenahme der Leistungsstudie [14] - dass sich die Vibrationsamplitude bei Geschwindigkeiten ab 400 ktn verändert. Dies tritt hauptsächlich bei Pylon 4 und Pylon 8 auf.

Faktor – Event – 10.4**16:24:28,9**

Text: 73° Neigung linksseits

Anmerkung: Für die Umrundung von Pylon 8 wird die Maschine in diese extreme Neigung gebracht.

Faktor – Event – 11.1**16:24:32,0**

Text: Teil des linken Trimmruders löst sich aus der Aufhängung

Anmerkung: keine

Faktor – Event – 11.2

Text: Verringerte Funktionsfähigkeit des Höhenruders

Anmerkung: keine

Faktor – Event – 11.3**16:24:28,12**

Text: Änderung des Rollmoments

Anmerkung: Der Unfallbericht des NTSB [2] weist auf eine Änderung des Rollmoments vor dem Upset hin.

Faktor – Event – 11.4**16:24:28.9**

Text: Umrundung von Pylon 8

Anmerkung: Hierbei handelt es sich um eine Kurve, die mit hoher Geschwindigkeit geflogen wird. Sie befindet sich in der Nähe des Vorfelds und somit in direkter Sichtlinie der Zuschauer.

Faktor – Event – 12**spätestens 16:24:29,46 - sehr wahrscheinlich eher**

Text: Aufhängung des linken Trimmruders gebrochen

Anmerkung: Zeigt sich durch einen ungewöhnlichen Anstellwinkel von 21°. Normalerweise ist die maximale Auslenkung 13° – 15°.

Faktor – Event – 13

Text: Die Kräfte, die auf das linke Trimmruder wirken, übersteigen dessen Biegefestigkeit

Anmerkung: keine

Faktor – State – 14

Text: Flattern des linken Trimmruders

Anmerkung: Hierbei handelt es sich um ein Oszillieren, das sich schnell von einem Summen zu einer Katastrophe ausweiten kann. Die dabei entstehenden Kräfte strapazieren das Material stark.

Faktor – State – 15

Text: Verringerte Steifigkeit des Höhenrudertrimmkontrollsystems

Anmerkung: keine

Faktor – Event – 16

Text: Ungewollte Bewegungsfreiheit des Trimmruders

Anmerkung: Das Trimmruder darf in der Regel kein Spiel haben, da es sich um eine präzise Apparatur handelt.

Faktor – State – 17.1

Text: Innenbordschraube bündig an Kontermutter gebrochen (vor dem Rennen)

Anmerkung: Durch die während des Rennens wirkenden Kräfte kam es zu einem Ermüdungsriss in der Innenbordschraube des linken Trimmruders. Da die Bruchstelle bereits Anzeichen von Korrosion zeigte, muss dies weit vor dem Rennen geschehen sein.

Faktor – Event – 17.2

Text: Mittlere Befestigungsschraube des rechten Trimmeruders ist gebrochen

Anmerkung: Die während des Fluges - und besonders während des Rennens - wirkenden Kräfte resultierten in einem Beugungsbruch der mittleren Befestigungsschraube des rechten Trimmeruders.

Faktor – State – 18.1

Text: Während des Flugs wirken wechselnde Biegekräfte auf das bewegliche Teil

Anmerkung: Je nach Stellung des Trimmeruders wirken die Kräfte in eine andere Richtung.

Faktor – Process – 18.2

Text: Es entstehen Ermüdungsbrüche bzw. vorhandene verstärken sich

Anmerkung: Durch die andauernde Strapazierung des Materials gibt dieses irgendwann nach.

Faktor – Event – 18.3

Text: Krafteinwirkung durch Scherkräfte

Anmerkung: Während des Fluges sind viele der beweglichen Außenteile der Maschine starken Scherkräften ausgesetzt. Sind diese Kräfte zu stark, kann das zu Schäden führen.

Faktor – State – 19

Text: Während der Oszillation wirken stärkere Kräfte auf die Schrauben

Anmerkung: Es sind nicht mehr nur die reinen Bewegungskräfte, die auf die Schrauben wirken. Durch die Bewegungsfreiheit ist auch ein Reißen möglich, welches zu einem erhöhten Verschleiß führt.

Faktor – State – 20

Text: Schrauben können sich bewegen

Anmerkung: Die Schrauben können sich auch unter Volllast noch bewegen.

Faktor – State – 21

Text: Intakte Schrauben beider Trimmeruder sind lose

Anmerkung: Von den drei vorhandenen Schrauben waren nur zwei intakt. Diese beiden Schrauben hatten Spiel, sodass sie nicht die nötige Haltekraft aufwiesen.

Faktor – State – 22

Text: Kontermuttereinsätze zeigen Anzeichen von Alterung und Wiederverwendung

Anmerkung: Die gelben Farbreste an den Kontermuttern weisen darauf hin, dass diese häufig wiederverwendet wurden. Durch lange Verwendung der immer gleichen Kontermuttern zeigten diese Verschleißerscheinungen.

Faktor – State – 23

Text: Kontermuttern weisen Rest von gelber Farbe auf

Anmerkung: Zu einem früheren Zeitpunkt war die gesamte Maschine gelb lackiert.

3.3 POTENTIELLE UMWELTBEDINGTE FAKTOREN

Die Leistungsstudie des NTSB [14] führt drei Möglichkeiten auf, die das Rollen der *Galloping Ghost* verursacht haben könnten. Zwei dieser Möglichkeiten sind hier aufgeführt. Bei der dritten Möglichkeit handelt es sich um Vibrationen, die durch das Überschreiten der Schallgeschwindigkeit auftreten können. Da die Maschine zu keinem Zeitpunkt des Rennens die Schallgeschwindigkeit überschritt, wird diese Möglichkeit vernachlässigt.

3.3.1 WINDBÖEN

Aus dem Leistungsbericht [14] geht hervor, dass eine starke Windböe das Rollen hätte initiieren können. Da durch den meteorologischen Bericht [15] jedoch belegt ist, dass während des Rennens die Winde laminar und nicht böig waren, kann diese Ursache als unwahrscheinlich betrachtet werden.

3.3.2 WIRBELSCHLEPPEN

Bei Wirbelschleppen handelt es sich um Verwirbelungen, die an den Enden der Tragflächen entstehen. Die Analyse der Leistungsstudie [14, S. 19] stützt sich auf die Daten der führenden Maschinen *Voodoo* (ca. 4,5 s Vorsprung) und *Strega* (ca. 8,8 s Vorsprung), aus deren Fluglage, Flughöhe, Position und Geschwindigkeit unter Berücksichtigung der meteorologischen Daten zum Rennzeitpunkt [15] sich die Bewegungsgeschwindigkeit des Wirbelschleppen berechnen lässt. Durch die Auswertung der GPS-Daten der *Voodoo* und der *Galloping Ghost* kann festgestellt werden, dass die *Voodoo* um 16:24:24.45 Uhr PDT eine Position hatte, in welcher der Wind die Wirbelschleppe direkt zum Punkt des Kontrollverlusts der *Galloping Ghost* tragen konnte. Die Windgeschwindigkeit betrug 21 kts, wodurch die Schleppe 157 ft in 4,5 s zurücklegen konnte. Bezogen auf die 333 ft Abstand zwischen den Flugzeugen fehlen somit 176 ft zum Unglücksflugzeug. Die Berechnung wurde unter Annahme einer Erhöhung der Windgeschwindigkeit auf 25 kts wiederholt. Dabei ergab sich eine Weite von 202 ft, welche ebenfalls nicht ausreichend ist [14].

Aufgrund fehlender Daten war es dem NTSB nicht möglich, den Effekt einer Wirbelschleppe gegen andere Faktoren abzugrenzen. Nichtsdestotrotz kann gefolgert werden, dass eine

Wirbelschlepe nur einen geringen Beitrag zur Einleitung des Rollens geliefert haben kann [14, S. 21].

3.4 ENTSTANDENER SCHADEN

Durch den Aufschlag des Flugzeugs auf das Flugplatzvorfeld des RSA wurde die Maschine sehr schwer beschädigt, wodurch der Pilot ums Leben kam. Auf dem Vorfeld des Reno Stead Airport befinden sich die Zuschauertribünen. Die Absturzstelle befindet sich in unmittelbarer Nähe der Zuschauerplätze, weshalb bei dem Unglück 10 weitere Menschen starben und 64 Menschen verletzt wurden.

ANALYSE

Dieses Kapitel befasst sich mit der Erklärung und Verifikation des aus den identifizierten Faktoren (siehe Abschnitt 3.2) erstellten WBGen. Dabei wird zunächst der vollständige WBG dargestellt und anschließend auf einzelne Sub-Graphen desselben eingegangen. Zur Verifikation werden hierbei der in Abschnitt 2.4 vorgestellte Counterfactual Test und der Causal Sufficiency Test verwendet.

4.1 WHY-BECAUSE-GRAPH

Die in Abschnitt 3.2 identifizierten Faktoren ergeben einen Why-Because-Graph. Dieser ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

4.2 VERIFIKATION DES HAUPTGRAPHEN

Aufgrund der Größe des WBGen wird dieser in zwei Abschnitte aufgeteilt. Zunächst wird der obere Teil von Ebene (0) bis Ebene (11) betrachtet (Abbildung 4.2). Anschließend folgt die Verifikation von Ebene (10) bis (18) (Abbildung 4.3) und (18) bis (22) (Abbildung 4.4).

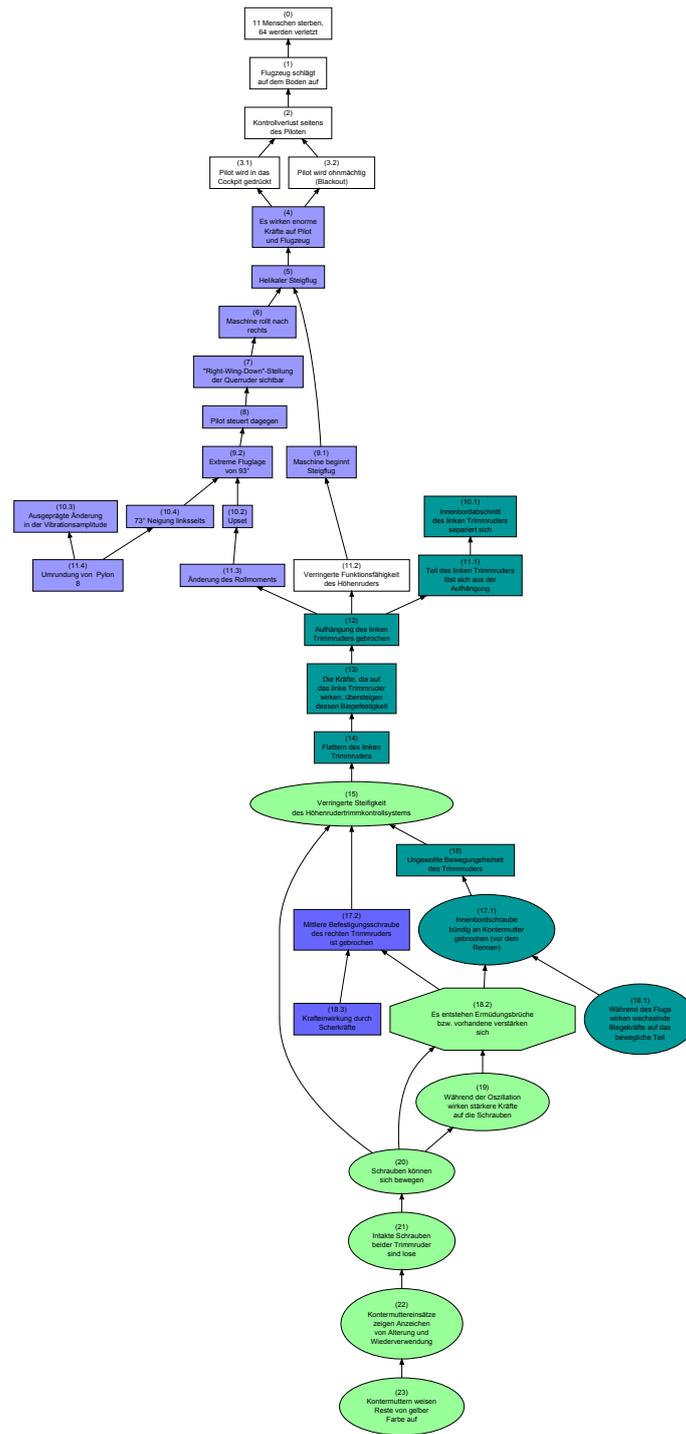


Abbildung 4.1: Gesamter Why-Because-Graph des Unfalls. Die grünen Knoten stellen Faktoren dar, die sich auf beide Trimmer beziehen, die türkisen Ereignisse, die unmittelbar mit dem linken Trimmer verknüpft sind. Die dunkelvioletten Knoten bezeichnen Ereignisse, bei denen das rechte Trimmer involviert ist und die zart violetten Knoten beschreiben Ereignisse, die unmittelbar mit dem Upset bzw. Manövern verknüpft sind.

OBERER ABSCHNITT**Counterfactual Test:**

Wären 11 Menschen gestorben und 64 verletzt worden, wäre das Flugzeug nicht auf den Boden in der Nähe der Tribünen eingeschlagen?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Wäre die Maschine auf den Boden aufgeschlagen, hätte der Pilot die Kontrolle über die Maschine gehabt?

Antwort: Nein

Causal Sufficiency Test:

Hätte der Pilot die Kontrolle verloren, wäre er nicht ohnmächtig gewesen und nach vorne in das Cockpit gedrückt worden?

Antwort: Nein

Anmerkung: Es ist nicht klar, welches der beiden Ereignisse zuerst auftrat. Beide Faktoren sind in der Regel ausreichend, um einen Kontrollverlust zu verursachen.

Counterfactual Test:

Wäre der Pilot ohnmächtig geworden, hätten keinen enormen Kräfte auf ihn gewirkt?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Wäre der Pilot in das Cockpit gedrückt worden, hätten keine enormen Kräfte auf ihn gewirkt?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Hätten enorme Kräfte auf den Piloten gewirkt, hätte sich die Maschine nicht in einem abrupten helikalen Steigflug befunden?

Antwort: Nein

Causal Sufficiency Test:

Kann die Maschine nur dann in einen helikalen Steigflug gehen, wenn die Maschine nach rechts rollt und beginnt zu steigen?

Antwort: Ja

Anmerkung: Ein helikaler Steigflug ist auch in die entgegengesetzte Richtung möglich, sofern die Maschine nach links rollt.

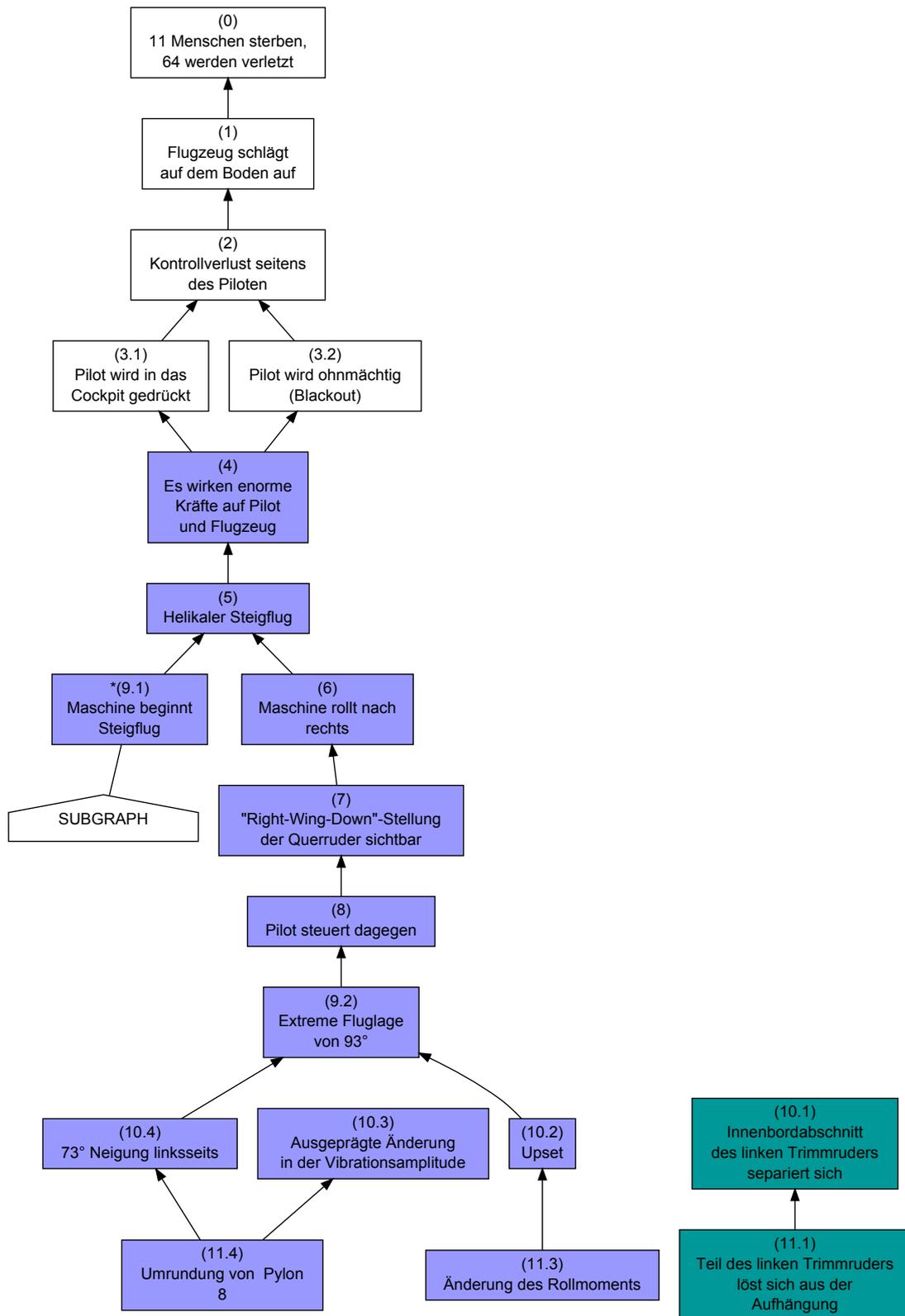


Abbildung 4.2: Ebenen 0 – 11 des Why-Because-Graphen. Bei den lilanen Knoten handelt es sich um Knoten, die direkt mit dem Upset zu tun haben oder um Manöver.

Counterfactual Test:

Wäre die Maschine nach rechts gerollt, wenn sich die Querruder nicht in »Right-Wing-Down«-Stellung befunden hätten?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Hätten sich die Querruder in »Right-Wing-Down«-Stellung befunden, hätte der Pilot nicht gegengesteuert?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Hätte der Pilot gegengesteuert, hätte er sich nicht in einer ungewollt extremen Fluglage befunden?

Antwort: Nein

Causal Sufficiency Test:

Wäre es zu einer extremen Fluglage von 93° gekommen, wäre die Maschine nicht bereits auf 73° linksseits gewesen und hätte einen Upset erlegt?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Hätte die Maschine eine linksseitige Neigung von 73° gehabt, hätte sie nicht in diesem Moment Pylon 8 umrundet?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Hätte die Maschine einen Upset erlebt, hätte sich das Rollmoment nicht geändert?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Hätte die Maschine einen Steigflug begonnen, wäre die Funktionsfähigkeit des Höhenruders nicht verringert gewesen?

Antwort: Nein

MITTLERER ABSCHNITT**Counterfactual Test:**

Hätte sich der Innenbordabschnitt des linken Trimmruders separiert, hätte er sich nicht aus der Aufhängung gelöst?

Antwort: Nein

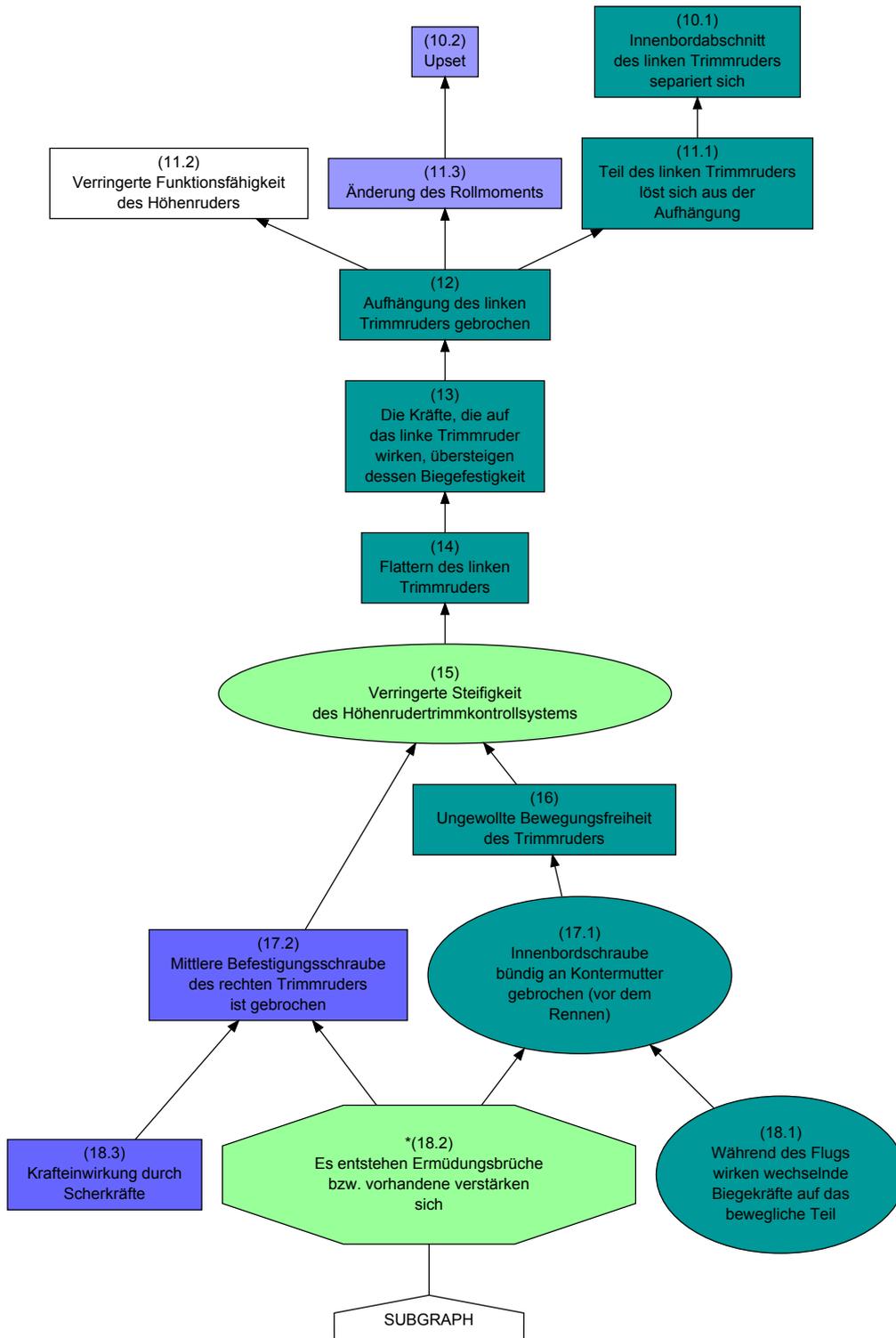


Abbildung 4.3: Ebene 10 – 18 des Why-Because-Graphen. Die grünen Knoten beziehen sich auf beide Trimmeruder, die violetten auf das rechte und die türkisen Knoten auf das linke Trimmeruder.

Counterfactual Test:

Hätte sich ein Teil des linken Trimmruders aus der Aufhängung lösen können, wäre die Aufhängung des linken Trimmruders nicht gebrochen?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Wäre die Funktionsfähigkeit des Höhenruders verringert worden, wäre die Aufhängung des linken Trimmruders nicht gebrochen?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Hätte sich das Rollmoment verändert, wäre die Aufhängung des linken Trimmruders nicht gebrochen?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Wäre die Aufhängung des linken Trimmruders gebrochen, hätten die Kräfte, die auf das Bauteil wirkten, nicht die Biegefestigkeit des Bauteils überstiegen?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Hätten die Kräfte, die auf das linke Trimmruder wirken, dessen Biegefestigkeit überschritten, hätte das linke Trimmruder nicht ozsilliert?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Hätte das linke Trimmruder flattern können, wäre die Steifigkeit des Höhenrudertrimmkontrollsystems nicht verringert gewesen?

Antwort: Nein

Causal Sufficiency Test:

Wäre die Steifigkeit des Höhenrudertrimmkontrollsystems signifikant verringert gewesen, hätten sich die Schrauben unter Vollast nicht bewegen können und wären nicht jeweils zwei der drei Befestigungsschrauben der Trimmruder gebrochen gewesen?

Antwort: Nein

Causal Sufficiency Test:

Wäre die mittlere Befestigungsschraube des rechten Trimmruders gebrochen, hätten die durch Scherung entstandenen Kräfte auf das Teil gewirkt, welches bereits Ermüdungsbrüche aufwies?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Wäre es zu einer übermäßigen Bewegungsfreiheit des linken Trimmruders gekommen, wäre die Innenbordschraube nicht bündig an der Kontermutter gebrochen?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Wäre die Innenbordschraube korrodiert gewesen, wäre sie erst direkt vor dem Rennen gebrochen?

Antwort: Nein

Causal Sufficiency Test:

Wäre die Innenbordschraube des linken Trimmruders bündig an der Kontermutter gebrochen, hätte diese nicht bereits Ermüdungsbrüche aufgewiesen und wäre nicht den wechselnden Biegekräften während des Flugs ausgesetzt gewesen?

Antwort: Nein

UNTERER ABSCHNITT**Counterfactual Test:**

Würden während der Oszillation stärkere Kräfte auf die Schrauben wirken, wären diese nicht beweglich?

Antwort: Nein

Causal Sufficiency Test:

Würden Ermüdungsbrüche entstehen, wenn die Schrauben sich nicht unter Volllast bewegen können und somit stärkere Kräfte auf das Material wirken?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Könnten sich die Schrauben unter Volllast bewegen, hätten sie nicht zu viel Spiel?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Hätten die Schrauben zu viel Spiel, würden die Kontermutterneinsätze keine Anzeichen

von Alterung und Wiederverwendung zeigen?

Antwort: Nein

Counterfactual Test:

Würden sich an den Kontermuttern Spuren gelber Farbe nachweisen lassen, wären diese nicht wiederverwendet worden?

Antwort: Nein

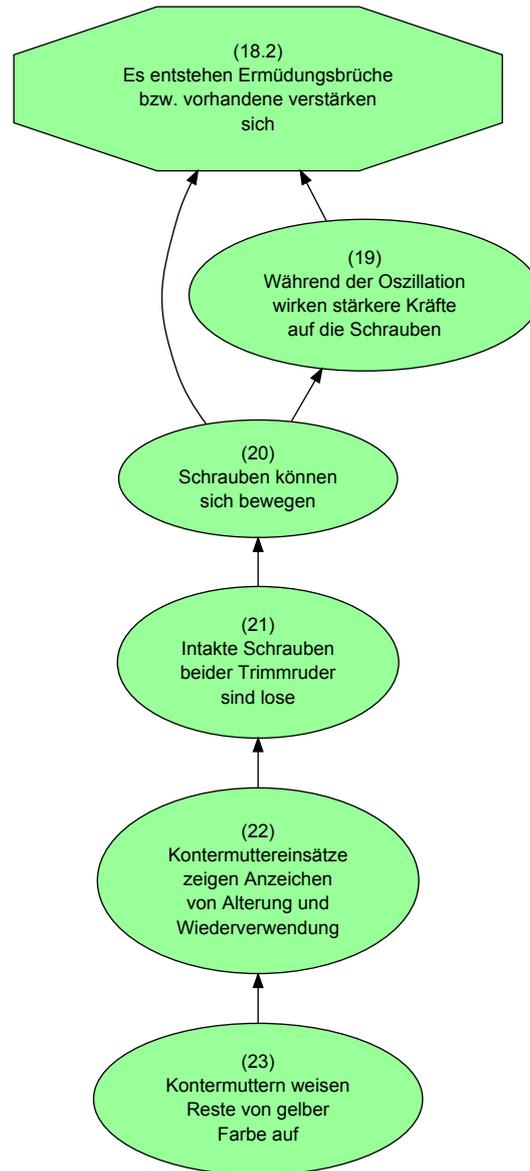


Abbildung 4.4: Ebene 18 – 23 des Why-Because-Graphen. Die Knoten beziehen sich auf beide Trimmeruder und zeigen die Wartungsmisstände der Maschine.

DISKUSSION

Der in Abschnitt 4.1 dargestellte Why-Because-Graph wird in diesem Kapitel ausgewertet. Ziel dieses Kapitels ist, die mögliche Unfallursache herauszuarbeiten. Dazu werden unter anderem die Verifikationen aus Abbildung 4.2 verwendet. Bei genauerer Betrachtung des WBG fällt auf, dass er leicht in drei Abschnitte unterteilt werden kann: Wartungsbedingte Faktoren (5.1), Upset und dessen Folgen (5.2) und Zusammenspiel von Upset und schlechter Wartung (5.3).

5.1 WARTUNGSBEDINGTE FAKTOREN

Sowohl die Modifikationen als auch die Wartung der *Galopping Ghost* wurden nur sehr schlecht dokumentiert [2, S. 7, 32–34]. Die Kontermuttern wiesen Spuren von gelber Farbe auf - der Farbe, in der die Maschine zuvor lackiert war. Durch die häufige Wiederverwendung befanden sich die Muttern in einem sehr schlechten Zustand, welcher zur Folge hatte, dass die Befestigungsschrauben viel Spiel hatten und sich somit auch unter voller Belastung bewegen ließen. Wirkten nun Kräfte auf die Trimmruder, beschränkten sich diese nicht nur auf Ziehen und Drücken. Durch das vorhandene Spiel erhielten die Schrauben nun auch Schläge, die das Material wesentlich stärker belasteten. Die dadurch entstandenen Ermüdungsbrüche in den Schrauben führten dazu, dass pro Trimmruder nur zwei der drei Befestigungsschrauben intakt waren. Die innenliegende Schraube des linken und die mittlere Schraube des rechten Trimmruders versagten, wodurch es zu einer ungewollten Bewegungsfreiheit der Trimmruder und somit auch zu einer verringerten Steifigkeit des Höhenrudertrimmklappensystems kam.

Die unmittelbare Folge dieses Stabilitätsverlusts ist die Möglichkeit des Entstehens von Trimmruderflattern. Dabei handelt es sich um ein unkontrolliertes Oszillieren der bzw. des Trimmruders, wodurch enorme Kräfte entstehen können. Diese könnten ausreichen, um die Aufhängungen zu verbiegen und brechen zu lassen.

Die Flugdaten während der vorhergehenden Runden entsprachen denen vorhergehender Rennen [14]. Der Unfallbericht weist jedoch darauf hin, dass annähernd 8 s vor dem Upset ein signifikanter Abfall des Ladedrucks und der Drehzahl gemessen wurde.

Das Trimmruderflattern ist auf keinem der visuellen Materialien nachweisbar. Dennoch handelt es sich hierbei um die *wahrscheinlichste Ursache* für das Brechen der Trimmruderaufhängung. Das NTSB konnte feststellen, dass nicht alle am Flugzeug durchgeführten Veränderungen auch einen positiven Effekt hatten [2, S. 33]. So war die Maschine beispielsweise so modifiziert worden, dass nur das linke Trimmruder beweglich war. Das rechte Trimmruder war fixiert worden. Somit stiegen die Kräfte, die während eines Manövers auf die Fläche wirkten, an. Nach dem Upset war zu sehen, dass sich die Trimmruder in ungewöhnlich steilen Positionen befanden. Dies weist darauf hin, dass ihre Aufhängungen gebrochen waren.

Auch wurde die Maschine keiner erneuten Kontrolle der Reno Air Racing Association (RARA) unterzogen, da im Anmeldeformular angegeben wurde, dass seit dem letzten Jahr keine weiteren Modifikationen vorgenommen worden waren. Dies entsprach zwar der Wahrheit, die Maschine hatte jedoch zwei Jahre vor dem Unfall keine Zulassung bekommen und hätte dementsprechend erneut geprüft werden müssen.

Dass die Aufhängung bereits vor dem Upset gebrochen war, lässt sich aufgrund der Position der Maschine zu den filmenden und fotografierenden Zuschauern nicht ermitteln. Dennoch handelt es sich hierbei um die *wahrscheinlichste Ursache* für den Upset. Die Leistungsstudie [14] zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit, dass eine Wirbelschlepe den Upset ausgelöst haben könnte, aufgrund von Position, Geschwindigkeit und Windverhältnissen unwahrscheinlich, wenn auch nicht auszuschließen ist. Der meteorologische Bericht [15] beschreibt die Windstömungen als laminar und beständig, wodurch auch eine Initiation durch eine Windböe unwahrscheinlich erscheint.

5.2 UPSET UND DESSEN FOLGEN

Während der Umrundung von Pylon 8 (siehe Abbildung 2.2) erlebte die *Galopping Ghost* einen Upset (siehe Definition 6). Auf dieses unvorhergesehene Rollen der Maschine reagierte der Pilot, indem er die Querruder in »Right-Wing-Down«-Stellung brachte. Zu diesem Zeitpunkt arbeitete das Trimmrudersystem bereits nicht mehr tadellos, was an der Position

der Trimmruder zu sehen war. Diese hatten eine Stellung eingenommen, welche unter normalen Bedingungen nicht möglich gewesen wäre. Die daraus resultierende eingeschränkte Funktionsfähigkeit des Höhenruders veranlasste die Maschine zu steigen. Die Kombination aus Auftriebsverlust und »Right-Wing-Down«-Stellung der Querruder resultierte in einem rapiden helikalen Steigflug.

Durch dieses abrupte Manöver wurde *James Leeward* mit einer Kraft von 17,3 G nach vorne rechts in seinen Sitz gepresst. Des Weiteren verhinderten die enormen Kräfte, dass sein Gehirn ausreichend mit Sauerstoff versorgt wurde, wodurch er ohnmächtig wurde. In Fliegerkreisen spricht man von einem Blackout. Sowohl der Blackout als auch die Positionsveränderung zogen einen Kontrollverlust seitens des Piloten nach sich.

9,1 s nach der Umrundung von Pylon 8 schlug die Maschine auf dem Vorfeld im Bereich der Zuschauertribünen ein. Dabei kamen der Pilot und 10 weitere Menschen ums Leben, 64 Zuschauer wurden verletzt.

5.3 ZUSAMMENSPIEL VON UPSET UND SCHLECHTER WARTUNG

Durch das Zusammenspiel von Upset und schlechter Wartung kam es zu einem rapiden helikalen Steigflug, dessen Folge ein totaler Kontrollverlust seitens des Piloten war. Werden die Ursachenbäume separat betrachtet, so muss dem Faktor Wartung eine höhere Gewichtung beigemessen werden. Ein Upset aufgrund von Windböen oder Wirbelschleppen ist in der Luftfahrt nichts Ungewöhnliches. Piloten trainieren diese Art der Störung, wodurch sie in der Regel wissen, mit derartigen Ereignissen umzugehen. Mit einem Alter von 74 Jahren, war *James Leeward* nicht der jüngste Pilot und dass die Reaktionsgeschwindigkeit im Alter nachlässt ist weithin bekannt. Die langjährige Flugerfahrung und der gute gesundheitliche Zustand des Piloten, weisen jedoch nicht auf einen Kontrollverlust aufgrund mangelnder Urteilsfähigkeit oder physiologischer Probleme hin.

Durch die schlechte Wartung hatte der Pilot der *Galopping Ghost* keine Chance, sich und die Maschine - und damit die Zuschauer - zu retten. Ihm blieb nach Angaben des Unfallsberichts weniger als eine Sekunde Zeit, um zu reagieren [2]. Diese wurde zwar genutzt, lieferte jedoch nicht das gewünschte Ergebnis.

FAZIT

Nachdem sich Abschnitt 5.3 mit den verschiedenen Ursachen auseinandergesetzt hat, liefert dieses Kapitel eine Zusammenfassung der Analyse und zieht ein Resümee.

Die durch das National Transportation Safety Board für die Why-Because-Analyse zur Verfügung gestellten Materialien waren sehr umfangreich. Aus den identifizierten Faktoren ergab sich ein verifizierbarer Graph, der Why-Because-Graph. Dieser kann in drei Teilbereiche aufgeteilt werden: den wartungsbedingten Teil (Abschnitt 5.1), den upsetbedingten Teil (Abschnitt 5.2) und die direkten Folgen des Zusammenspiels beider Teilbereiche (Abschnitt 5.3).

Der Unfallbericht des National Transportation Safety Board kommt zu dem Ergebnis, dass die verringerte Steifigkeit des Trimmrudersystems, ausgelöst durch veraltete Kontermuttern, Ursache des Unfalls gewesen sein könnte. Die in dieser Arbeit durchgeführte Why-Because-Analyse kommt zu dem Ergebnis, dass die *wahrscheinlichste Ursache* für den Unfall das Brechen der Trimmruderaufhängung aufgrund von Trimmruderflattern, welches durch eine verringerte Steifigkeit des Höhenrudertrimmsystems ausgelöst wurde, war. Hierbei kommt die unzureichende Wartung zum Tragen. Der Unfall hätte wahrscheinlich verhindert werden können, wenn die Wartung ordnungsgemäß durchgeführt und dokumentiert gewesen wäre. Auch besteht die Möglichkeit, dass *James Leeward* die Maschine - und damit auch sich und das Leben einiger Zuschauer - hätte retten können, wäre die Maschine anders modifiziert worden. Die Modifikationen wurden weder dokumentiert noch getestet, was zur Folge hatte, dass einige dieser Veränderungen negative Effekte auf die Flugeigenschaften der Maschine

hatten. Nichtsdestotrotz handelt es sich um ein Zusammenspiel von mehreren Faktoren, das erst durch das gleichzeitige Eintreten selbiger zum Unglück führte.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

2.1	Pylon mit Aufschrift »RENO«	4
2.2	Schematische Darstellung des abzufliegenden Kurses.	6
2.3	Schematischer Ablaufplan der National Championship Air Races	7
2.4	P-51D <i>The Galloping Ghost</i> (Originalzustand) Illustrationen im Profil	8
2.5	P-51D <i>The Galloping Ghost</i> Modifikationsübersicht	9
2.6	P-51D <i>The Galloping Ghost</i> (Rennzustand) Illustrationen im Profil	10
2.7	Beispiel eines Why-Because-Graphen	13
3.1	Darstellung des abzufliegenden Kurses	15
4.1	Gesamter Why-Because-Graph des Unfalls	24
4.2	Ebenen 0 – 11 des Why-Because-Graphen.	26
4.3	Ebene 10 – 18 des Why-Because-Graphen.	28
4.4	Ebene 18 – 23 des Why-Because-Graphen.	31

TABELLENVERZEICHNIS

3.1 Timeline des Unfalls 16

LITERATUR

- [1] Jan Sanders. *Why-Because Analysis*. deutsch. Techn. Ber. AG RVS, Technische Fakultät, Universität-Bielefeld. URL: http://www.rvs.uni-bielefeld.de/research/WBA/wba_on_one_page.pdf (besucht am 18. 07. 2013).
- [2] Noel Coleman. *Pilot/Race 177, The Galloping Ghost. North American P-51D, N79111 Reno, Nevada September 16, 2011*. englisch. Aircraft Accident Brief. National Transportation Safety Board, 27. Aug. 2012. 43 S. URL: <http://www.nts.gov/doclib/reports/2012/AAB1201.pdf> (besucht am 10. 07. 2013).
- [3] S.L. Hamilton. *Reno Air Races*. englisch. Xtreme Races. ABDO, 2013. ISBN: 9781617836961. URL: <http://books.google.de/books?id=hgCXDGkESXoC> (besucht am 29. 07. 2013).
- [4] P. Handleman. *Air Racing Today: Heavy Iron at Reno*. englisch. Mbi Publishing Company, 2001. ISBN: 9780760311172. URL: http://books.google.de/books?id=_LhU-GRpo9kC (besucht am 29. 07. 2013).
- [5] Inc Reno Air Racing Association. *National Championship Air Races and Air Show. Official Rules of Competition 2011*. englisch. 1. Sep. 2011.
- [6] Leeward Air Ranch - Official Homepage. *James Kent »Jimmy« Leeward, 74*. englisch. 3. Juli 2013. URL: <http://www.leewardairranch.com/obituary/2011/james-kent-jimmy-leeward-74> (besucht am 07. 07. 2013).
- [7] Taichiro Yamashita. *Taichi Unlimited Drawings. Racer Drawings*. englisch. 7. Juli 2013. URL: <http://www.taichiunlimiteddrawings.com/> (besucht am 07. 07. 2013).
- [8] Unbekannt. *North American P-51D Mustang. Fact Sheet*. englisch. National Museum of the US Air Force®. 2. Apr. 2011. URL: <http://www.nationalmuseum.af.mil/factsheets/factsheet.asp?id=513> (besucht am 17. 07. 2013).

- [9] A. Kevin Grantham. *The Galloping Ghost. The Cleveland Year*. englisch. Leeward Air Ranch - Official Homepage. URL: <http://www.leewardairranch.com/racing/history/cleveland> (besucht am 07. 07. 2013).
- [10] Joe Baugher. *1944 USAAF Serial Numbers*. englisch. 11. Juli 2013. URL: http://www.joebaugher.com/usaf_serials/1944_1.html (besucht am 18. 07. 2013).
- [11] Curtis Fowles. *P-51 Mustang Survivors. 44-15651*. englisch. 17. Aug. 2011. URL: <http://www.mustangsmustangs.com/p-51/p51survivors/pages/44-15651.php> (besucht am 18. 07. 2013).
- [12] Leeward Air Ranch - Official Homepage. *Galloping Ghost Specifications*. englisch. 4. Juli 2013. URL: <http://www.leewardairranch.com/racing/galloping-ghost-specs> (besucht am 07. 07. 2013).
- [13] Jan Sanders. *WBA Introduction*. englisch. 1. Feb. 2012, S. 44. URL: http://www.rvs.uni-bielefeld.de/research/WBA/WBA_Introduction.pdf (besucht am 10. 07. 2013).
- [14] Marie Moler und Dennis Crider. *Aircraft Performance Study*. englisch. National Transportation Safety Board, 20. Aug. 2012.
- [15] Paul Suffner. *Meteorological Factual Report*. englisch. National Transportation Safety Board, 3. März 2012.
- [16] Christopher Babcock. *Image Study*. englisch. National Transportation Safety Board, 2012.
- [17] Michael Bauer. *Data Recorders*. englisch. National Transportation Safety Board, 6. Juli 2012.
- [18] Clinton Crookshanks. *Group Chairman's Factual Report*. englisch. National Transportation Safety Board, 24. Juni 2012.
- [19] Clint Crookshanks. *Materials Laboratory Factual Report*. englisch. National Transportation Safety Board, 3. Aug. 2012.
- [20] Scotty Germain. *A Ghost Story. How We Almost Made Reno*. englisch. Leeward Air Ranch - Official Homepage. 21. Okt. 2009. URL: <http://www.leewardairranch.com/racing/story/a-ghost-story-how-we-almost-made-reno> (besucht am 07. 07. 2013).
- [21] Dan T. Horak. *Video Study*. englisch. National Transportation Safety Board, 2012.
- [22] Peter Bernard Ladkin, Jan Sanders und Thilo Paul-Stueve. *The WBA Workbook*. englisch. Causalis Limited, 13. Okt. 2005, S. 67. URL: <http://www.rvs.uni-bielefeld.de/research/WBA/TheWBACaseBook.pdf> (besucht am 10. 07. 2013).

- [23] Gerd Stegmaier. »Crossgolf, Bike-Polo, Waveboarden – die Parallelwelt zum sportlichen Establishment«. deutsch. In: *Focus Online* (2013). URL: <http://www.focus.de/sport/trendsportarten/> (besucht am 01.09.2013).

VERSICHERUNG AN EIDES STATT

Ich versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinn nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Ich versichere außerdem, dass ich keine andere als die angegebene Literatur verwendet habe. Diese Versicherung bezieht sich auch auf alle in der Arbeit enthaltenen Zeichnungen, Skizzen, bildlichen Darstellungen und dergleichen.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Bielefeld, den 20. September 2013