

Diploma Thesis

FMECA – Status quo & Analyses of international public view- and changeable practice relevant simulations

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Mechanical and Industrial Engineering

Diplomarbeit

FMECA – Status Quo & Analysen von öffentlich einseh- und veränderbaren praxisrelevanten Simulationen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Maschinenwesen und
Betriebswissenschaften

von

Fabian Hinteregger, BSc

Matr.Nr.: 01325552

unter der Anleitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Michael Weigand

Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung
Forschungsbereich Maschinenelemente und Luftfahrtgetriebe
Technische Universität Wien
Getreidemarkt 9, 1060 Wien, Österreich

Wien, im August 2019



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe. Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im August 2019



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich im Rahmen dieser Diplomarbeit und während meines gesamten Studiums begleitet und unterstützt haben.

Ganz besonders möchte ich Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Michael Weigand danken, welcher meine Arbeit durch seine fachliche und persönliche Unterstützung stets begleitet hat.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, welche mir mein Studium ermöglicht und mich durch deren positive Zugangsweise in all meinen Entscheidungen, obgleich privater, akademischer oder berufstechnischer Natur, unterstützt haben.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) ist für erfolgreiche Organisationen ein absolutes Muss, um potentielle Fehlermodi zu erkennen und auszumerzen, Kosten zu sparen, einer schlechten Reputation aus dem Wege zu gehen und Menschenleben zu retten. Durch eine strukturierte Vorgangsweise und mit der Unterstützung von diversen hilfreichen Tools, können potentielle Fehlermodi nach deren Schweregrad, Entdeckungswahrscheinlichkeit und Auftretenswahrscheinlichkeit evaluiert und kategorisiert werden und anschließend mit Hilfe einer kritischen Analyse zusätzlich betrachtet und gruppiert werden.

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit einer Theoriestudie und der Abklärung des Status Quo von FMECA, welches sich aus den beiden Begriffen FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) und CA (Criticality Analysis) zusammensetzt. Durch eine Beschreibung von Tools, welche zur Erzeugung einer FMECA unabdinglich sind, werden die theoretischen Grundlagen abgerundet.

Nachfolgend werden mit Hilfe der FMECA und verschiedenen Werkzeugen zur Erstellung eben dieser, diverse maschinenbauliche Komponenten eines einstufigen Kegelradgetriebes einer Hub-schrauber Heckrotor-Konfiguration (Tail Gearbox) analysiert um möglichst viele potentielle Fehlermodi und deren Ursachen zu entdecken.

Schlussendlich wird neben der Analyse und Interpretation der Ergebnisse auch ein Ausblick gestellt, welcher eine weitere Betrachtung von anderen Modulen eines Helikopters mittels FMECA empfiehlt. Nur durch eine stetige Weiterentwicklung, Ergänzung und Adaptierung von den erstellten FMECAs können Erfolge erzielt werden, welche der Allgemeinheit helfen. Gerade deshalb sind die Ergebnisse dieser Diplomarbeit öffentlich einseh- und veränderbar.

Die theoretischen Grundlagen mit den darin enthaltenen Definitionen, Vorgehensweisen und Werkzeugen zur Erstellung der FMECAs, wurden in deutscher Sprache verfasst. Um im Hinblick der Luftfahrt die internationale Anwendbarkeit und Adaptierung des praktischen Teils, welcher die diversen FMECAs der Bauteile des Kegelradgetriebes der Heckrotor-Konfiguration beinhaltet, gewährleisten zu können, wird zur Erstellung dieses Abschnitts die englische Sprache verwendet.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) is an absolute must for successful organizations to identify and eliminate potential failure modes, save costs, avoid bad reputation, and save human lives. Through a structured approach and with the support of various helpful tools, potential failure modes can be evaluated and categorized according to their severity, probability of discovery and probability of occurrence, and then additionally analysed and grouped with the help of a critical analysis.

This diploma thesis deals with a theory study and the clarification of the status quo of FMECA, which consists of the two terms FMEA (Failure modes and Effects Analysis) and CA (Criticality Analysis). Furthermore tools which are indispensable for creating a FMECA are presented.

Subsequently, different mechanical components of a single-stage bevel gear of a helicopter tail rotor configuration (Tail Gearbox) are analysed with the help of FMECA and various tools for creating them, in order to detect as many potential failure modes and their causes as possible.

Finally, in addition to the analysis and interpretation of the results, an outlook is provided, which recommends further consideration of other modules of a helicopter using FMECA. Only through a continuous development, completion and adaptation of the created FMECAs, can success be achieved, which will help the general public. That is why the results of this diploma thesis are publicly available and changeable.

The theoretical part, which includes the definitions, procedures and tools for creating the FMECAs, were written in German language. With regard to aviation and in order to ensure the international applicability and adaptation of the practical part, which consists of the various FMECAs of the components of the bevel gear of the tail rotor configuration, the English language is used.

Motivation der Diplomarbeit

Um die Wichtigkeit und Relevanz von Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA) herauszustreichen, sollen nachfolgend diverse Argumente gelistet werden, welche die Motivation und Beweggründe zur Erstellung dieser Arbeit und zur Heranziehung von FMECAs in Entwicklungs- und Konstruktionsprozessen herausstreichen:

- FMECA ist bei der Entwicklung und Konstruktion von Produkten unerlässlich beziehungsweise vorgeschrieben. Des Weiteren ist eine zu erreichende Mindestzuverlässigkeit zu erzielen, welche durch eine ordnungsgemäße FMECA gewährleistet werden kann.
- Die FMECA verlangt vertiefte Kenntnisse der Statistik beziehungsweise Mathematik und wird deshalb meist von einem Mathematiker durchgeführt. Zur erfolgreichen Implementierung und Umsetzung einer FMECA sollte jedoch ein mit der Entwicklung befasster Konstrukteur mit der Aufgabe vertraut werden, die FMECA, in Zusammenarbeit mit Statistikern und anderen relevanten Personen, zu erstellen und zu betreuen. Durch diese Maßnahme können FMECAs in den Konstruktionsprozess integriert werden und Erfolge leichter erzielt werden.
- In der Regel wird die FMECA in wenigen Wochen erstellt. Diese relativ kurze Bearbeitungszeit stellt keineswegs eine vollständige Erfassung aller möglichen Fehlermodi sicher. Durch eine modulartige Verwendung von FMECAs kann dieser Faktor ausgemerzt werden und somit Leben gerettet werden.
- Ziel ist es die diversen FMECAs zu lebendigen Dokumenten zu machen. Durch eine durchgehende Adaptierung and Weiterentwicklung der FMECAs, können Produkte und Prozesse noch sicherer gestaltet werden. Nach Schadensereignissen sollten Fehlermodi überprüft und gegebenenfalls ergänzt beziehungsweise nachgetragen werden, um somit die Module auszureifen.
- Durch eine bessere Integration der FMECA in die Konstruktion und Serienbetreuung der Produkte und durch eine ausgereifte Softwareunterstützung für die Erstellung und Betreuung der FMECAs und insbesondere der Statistik, wird das Ziel einer Verschmelzung von Bauteilen und Prozessen mit FMECAs erreicht.

Motivation behind Master Thesis

In order to understand the importance and relevance of Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA), various arguments will be listed below that highlight the motivation behind the creation of this master thesis and the use of FMECAs in development, construction and design processes:

- FMECA is essential or mandatory in the construction, development and design of products. Furthermore, only with a proper FMECA a minimum reliability can be achieved.
- The FMECA requires in-depth knowledge of statistics and mathematics and is therefore usually carried out by a mathematician. However, to successfully implement a FMECA, a construction engineer should be familiar with the task of creating and maintaining the FMECA in collaboration with statisticians and other relevant individuals. By doing so, FMECAs can be integrated into the design process and improvements are easier to achieve.
- In general, FMECAs are created in a few weeks. This relatively short processing time does not ensure a complete coverage of all possible failure modes. Modular use of FMECAs can eradicate this factor and thus save lives.
- The ultimate goal is to turn the various FMECAs into living documents. Through continuous adaptation and further development of FMECAs, products and processes can be made even more secure. After failure events, failure modes should be checked and, if necessary, supplemented in order that the modules can be further developed.
- Only through a better integration of FMECAs into product design and series production and by a mature software support for creating and maintaining FMECAs and statistics, the goal of merging components and processes with FMECAs can be achieved.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	14
2	Theoretische Grundlagen	15
2.1	FMEA	15
2.1.1	Definition	15
2.1.2	Warum FMEA?	16
2.1.3	Historie	19
2.1.4	Vorgehensweise	20
2.1.5	Tools	29
2.1.5.1	Systemstrukturierung	29
2.1.5.2	Funktionszuordnung	30
2.1.5.3	Blockdiagramm	30
2.1.5.4	Interface Matrix	31
2.1.5.5	FMEA Formblatt	32
2.1.5.6	Fehlerbaumanalyse	34
2.1.5.7	Fragestellungen	34
2.1.5.8	5 Whys & Warum-Treppe	35
2.1.5.9	Ishikawa-Diagramm	36
2.1.5.10	Brainstorming	38
2.1.5.11	Fehler-Folgen-Matrix	39
2.1.5.12	Pareto-Diagramm	40
2.1.5.13	Häufigkeitsanalyse	41
2.1.6	Shortcomings	42
2.2	FMECA	45
2.2.1	Definition	45
2.2.2	Warum FMECA?	46
2.2.3	Historie	46
2.2.4	Vorgehensweise	46
2.2.5	Tools	56
2.2.6	Shortcomings	56
2.3	Simulationssoftware RAM-Commander	56
3	Implementation FMECA	57
3.1	General Analysis	57
3.1.1	System Structure	57
3.1.2	Function Assignment	60
3.1.3	Interface Matrix	62
3.2	FMECAs	63
3.2.1	Bearing	63
3.2.1.1	FMEA Formsheet	63
3.2.1.2	FMECA Bearing	64

3.2.2	Shaft	68
3.2.2.1	5 Whys	68
3.2.2.2	FMECA Shaft	69
3.2.3	Bevel Gear	72
3.2.3.1	Ishikawa-Diagramm	72
3.2.3.2	FMECA Bevel Gear	73
3.2.4	Bolt	75
3.2.4.1	Why-Step	75
3.2.4.2	FMECA Bolt	76
3.2.5	O-Ring	77
3.2.5.1	Fault-Tree-Analysis	77
3.2.5.2	FMECA O-Ring	78
3.2.6	Radial Shaft Seal	79
3.2.6.1	Failure-Consequences-Matrix	79
3.2.6.2	FMECA Radial Shaft Seal	80
3.2.7	Retaining Ring	81
3.2.7.1	Brainstorming	81
3.2.7.2	FMECA Retaining Ring	82
3.2.8	Locknut	83
3.2.8.1	Brainstorming	83
3.2.8.2	FMECA Locknut	84
4	Analysis and Interpretation	85
4.1	Frequency Analysis	85
4.2	Criticality Matrix	89
5	Discussion und Outlook	95

Kapitel 1

Einleitung

„Anything that can go wrong, will go wrong“¹

1949 wurde an der US Air Force ein Experiment über Beschleunigungen am menschlichen Körper durchgeführt. Die damaligen Testpersonen wurden mit 16 Sensoren ausgestattet, welche entweder in richtiger oder in falscher (90° versetzter) Anordnung positioniert wurden. Wie allseits bekannt, schlug das Experiment fehl und Edward R. Murphy verfasste sein weltbekanntes Zitat.

Dieses Experiment gilt als Warnung für all jene, welche Produkte und Dienstleistungen planen, betreuen und nachbehandeln. Qualität und Verlässlichkeit sind in einer kundenorientierten Welt von größter Bedeutung. Um vor kostspieligen Produktausfällen geschützt zu sein, einer schlechten Reputation aus dem Weg zu gehen und Produkte in allen Entstehungsprozessen vielversprechend zu betreuen, sollte FMECA (Failure Mode and Effects and Criticality Analysis) in jeder erfolgreich agierenden Organisation zum Zug kommen.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden zunächst die theoretischen Grundlagen zum Thema FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse) behandelt, wobei neben der Definition, den Gründen der Ausführung, der geschichtlichen Betrachtung, der Vorgehensweise auch Werkzeuge zum Erstellen und Shortcomings einer FMEA genauer betrachtet werden.

Da FMECA die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse um die kritische Analyse (CA) erweitert, werden danach die eben erwähnten Inhaltspunkte der FMEA auch für die FMECA betrachtet, um somit die ganzheitliche Analyse zu komplettieren.

Bei der Umsetzung der theoretischen Inhalte werden eine Vielzahl von FMECAs für unterschiedliche maschinenbauliche Bauteile mit Hilfe eines Softwareprogrammes durchgeführt. Die Komponenten stammen allesamt aus einem einstufigen Kegelradgetriebe, welches die mechanischen Größen Drehmoment und Winkelgeschwindigkeit einer Hubschrauber Heckrotor-Konfiguration regelt. Neben Kegelräder, Wälzlager, Sicherungsringe, O-Ringe, Radialwellendichtringe, Wellenmuttern und Schrauben werden auch Wellen mittels einer FMECA analysiert.

Schlussendlich sollen diese FMECAs durch Hinzufügen von weiteren potentiellen Fehlern unter einem ständigen Wandel stehen und der internationalen Gemeinschaft zur Verfügung gestellt werden, um Produkte noch sicherer zu machen, Fehler, deren vorausgehende Ursachen und implizierten Kosten zu vermeiden und Menschenleben zu retten.

¹Zitat von Edward R. Murphy, Borowska et al., 2014, S. 39

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

2.1 FMEA

2.1.1 Definition

„Failure modes and effects analysis (FMEA) is a complex engineering analysis methodology used to identify potential failure modes, failure causes, failure effects and problem areas affecting the system or product mission success, hardware and software reliability, maintainability, and safety.“¹

Im Grunde können Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen in 2 grundsätzliche Typen eingeteilt werden:

1. Design FMEA:

Die Design FMEA beschäftigt sich mit Designaktivitäten wie Maschinen-, Werkzeug- oder Produktdesign. Sie beinhaltet die Zerlegung von Systemen in Subsysteme und Untergruppen und identifiziert jeden potentiellen Fehlermodus und dahinter liegende Ursachen². Design FMEA's gehen in der Regel davon aus, dass das Produkt gemäß den Spezifikationen hergestellt wird³. Die folgenden Fragestellungen geben einen Anhalt, in welchen Bereichen Design FMEAs eingesetzt werden⁴:

- Welche Fehler und damit verbundenen Ursachen können auftreten?
- Mit welcher Wahrscheinlichkeit und weshalb kann ein Bauteil im Betrieb versagen?
- Mit welcher Wahrscheinlichkeit kann die fehlerhaft produzierte Komponente während der Entwicklung entdeckt werden?

2. Prozess FMEA:

Die Prozess FMEA betrachtet Herstell- oder Planungsprozesse, wie zum Beispiel den Prozess vom Wareneingang bis zur Auslieferung⁵. Ebenso werden Montagevorgänge mit zusammenhängenden erforderlichen Anforderungen bei der Prozess FMEA betrachtet⁶. Nachfolgende Fragestellungen können mit Prozess FMEAs beantwortet werden⁷:

- Welche Ursachen und welche implizierten Fehler können in der Produktion auftreten?
- Mit welcher Wahrscheinlichkeit und weshalb kann das beim Zulieferer/Hersteller produzierte Bauteil fehlerhaft sein?

¹Raheja und Gullo, 2012, S. 235

²Teoh und Keith, 2004, S. 253

³Carlson, 2012, S. 23

⁴Hering und Schloske, 2019, S. 23

⁵Werdich, 2012, S. 14

⁶Liu, 2016, S. 9

⁷Hering und Schloske, 2019, S. 39

- Mit welcher Wahrscheinlichkeit kann das fehlerhaft produzierte Bauteil während der Fertigung entdeckt werden?

FMEA breitet sich in viele Bereiche aus, da die Anwendung schier grenzenlos scheint. Abbildung 2.1 zeigt, welche Rolle FMEA beispielsweise in der DFR (Design for reliability) und im kontinuierlichen Verbesserungsprozess spielt. FMEA unterstützt mit Hilfe von diversen Tools die Erhöhung der Zuverlässigkeit und verbessert Testabläufe und Prozesssteuerungsmethoden. Weitere in der Literatur zu findende FMEA's sind *System FMEAs*, *Reliability-Centered Maintenance*, *Concept FMEAs*, *Human Factors FMEAs*, *Service FMEAs*, *Business Process FMEAs*, *Failure Modes, Mechanisms, and Effects Analysis (FMMEA)* und *Failure Modes Effects and Diagnostic Analysis (FMEDA)*⁸.

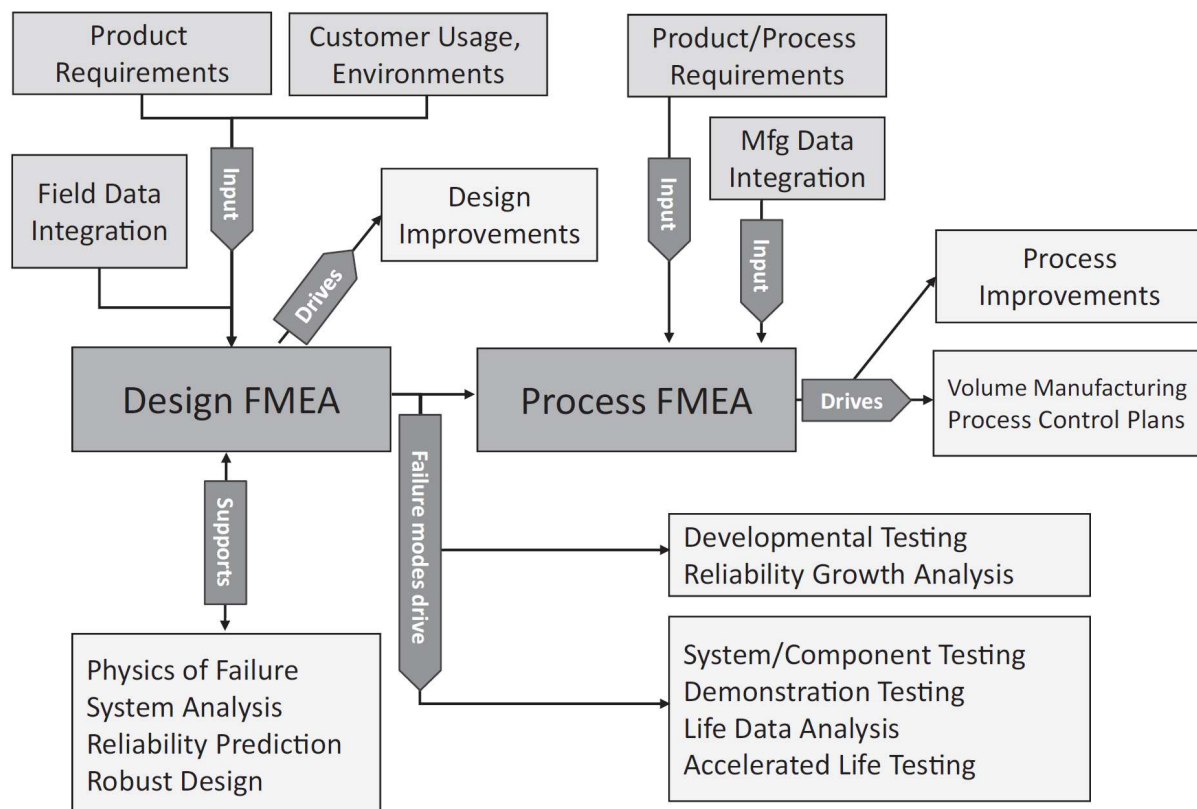


Abb. 2.1: Zusammenhang zwischen Design und Prozess FMEA & DFR (Carlson, 2012, S. 18)

2.1.2 Warum FMEA?

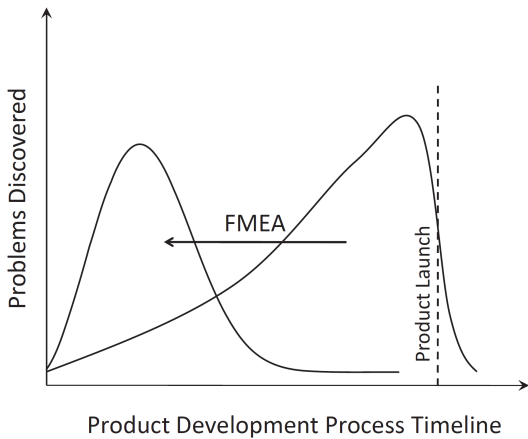
Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen (FMEA) sind in jeder Branche eine hervorragende Möglichkeit um Verlässlichkeit, Sicherheit und Kostenreduktion von möglichen Garantiefällen zu beherrschen. Produktrückrufe und Produktausfälle wirken sich meist negativ auf die Reputation einer Organisation aus und implizieren oft ein Misstrauen der Kunden, welche sich womöglich für andere Mitbewerber entscheiden⁹.

Mit Hilfe einer FMEA wird der gesamte Entwicklungsprozess strukturiert. Ebenso ist die FMEA durch die durchgängige Dokumentation für mögliche Rechtsfälle einsetzbar. Des Weiteren werden

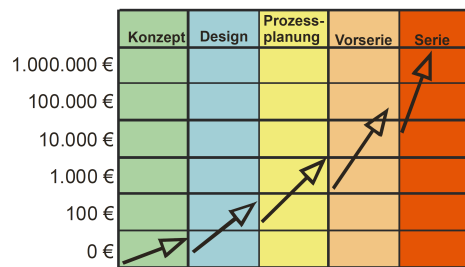
⁸Carlson, 2012, S. 18-25

⁹Carlson, 2012, S. 2

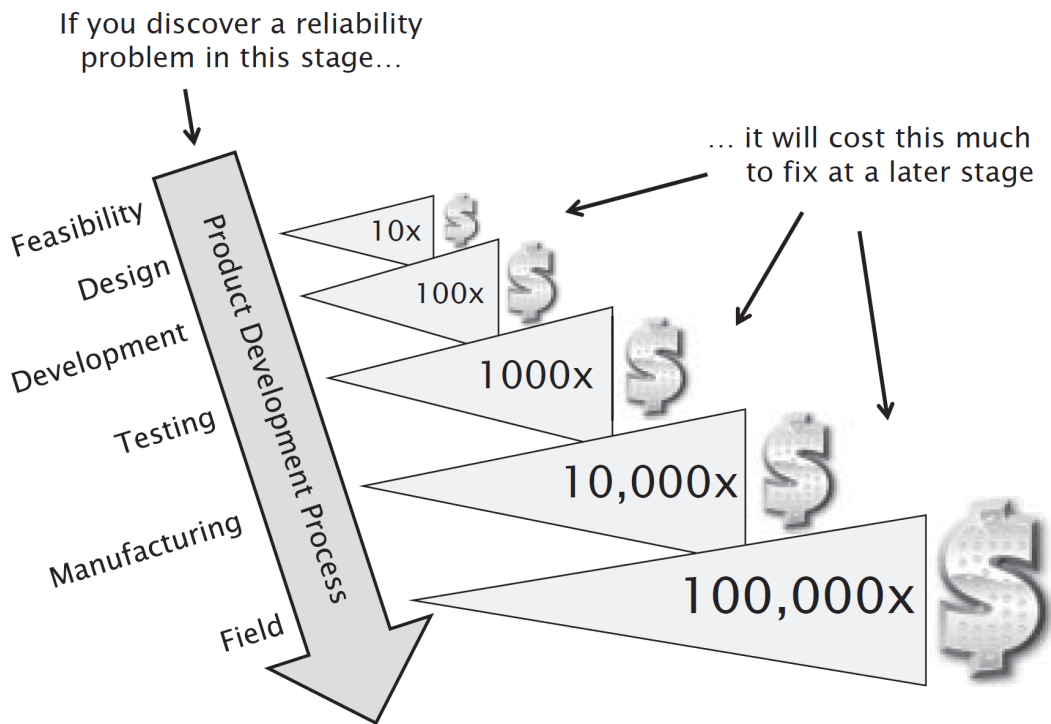
mit durchdachten Risikoanalysen Fehler mit deren Folgen und Auswirkungen minimiert und hinsichtlich der Gefahren evaluiert. Der Organisation angehörige Personen können mit deren Know-How und Erfahrung mögliche Fehler in strukturierter Abfolge durcharbeiten und von Beginn an den Entwicklungsprozess positiv beeinflussen. Neben der Verbesserung der Produktqualität können sinngemäß auch Kosten- und Zeitpotential eingespart werden.¹⁰ Abbildung 2.2a, 2.2b und 2.2c spiegeln den großen Vorteil einer FMEA wider. Durch eine FMEA werden Fehler und Probleme in frühen Entwicklungsstadien erkannt und somit Kosten eingespart, da eine spätere Fehlerentdeckung höhere Kosten und massive Probleme aufweist.



(a) Fehlerentdeckung im Produktentwicklungsprozess (Carlson, 2012, S. 30)



(b) Fehlerkosten im Produktlebenszyklus (Werdich, 2012, S. 4)



(c) Factor of 10 (Carlson, 2012, S. 29)

Abb. 2.2: Fehlerentdeckung und Fehlerkosten

¹⁰Werdich, 2012, S. 2

Um die Gefahren und Risiken bei einer Nichtbeachtung einer FMEA zu unterstreichen, soll das nachfolgende Beispiel Aufschluss geben. Am 03.03.1991 stürzte eine Boeing 737-200 der United Airlines in der Nähe von Colorado Springs ab. Ein Landefehler, dem ein plötzlicher unkontrollierter Ausschlag des Seitenruders vorausgegangen war, führte dazu, dass die Maschine abstürzte und alle 25 Passagiere ums Leben kamen. Die Ermittler vermuteten die Absturzursache, konnten sie jedoch nie beweisen. Am 07.09.1994 stürzte erneut eine Maschine des Typs Boeing 737 im Landeanflug nach Pittsburgh ab. Die Piloten verloren in einer Flughöhe von etwa 600 Metern die Kontrolle und die Maschine kippte über die linke Tragfläche ab und ging in einen Sturzflug über, welcher mit dem Tod von 132 Menschen endete. Auch hierbei konnten sich die Ermittler den Absturzgrund nicht erklären. Erst 5 Jahre nach dem ersten Absturz konnte das Rätsel mittels einem Kälteschocktests des Rudersteuerungsventils gelöst werden. Da bei Temperaturen von -40 Grad Celsius warmem Öl eine Ruderumkehr möglich ist, schlug das Ruder in die entgegengesetzte Richtung der beabsichtigten Lenkung aus und vice versa. Nach der Veröffentlichung der Unfallursache wurde der Kälte- oder Temperaturschocktest als Standard für Flugzeugtests aufgenommen. Wie sich zeigt, kann eine richtig durchgeführte FMEA Menschenleben retten¹¹.

Zusammenfassend geben die nachfolgenden Aufzählungspunkte eine Übersicht warum FMEA eingesetzt wird und welche Vorteile damit verbunden sind:

- FMEAs können die optimierte Entwicklung von Produkten unterstützen und Probleme antizipieren, bevor sie beim Testen oder in Serie entdeckt werden¹².
- FMEAs identifizieren und beseitigen bekannte und/oder potenzielle Fehler und Probleme im System, Design, Prozess und/oder im Service, bevor sie den Kunden erreichen¹³.
- FMEAs können volkswirtschaftliche Schäden und hohe betriebswirtschaftliche Kosten verhindern¹⁴.
- FMEAs können mögliche Fehler früher erkennen und somit Kapazitätsspitzen vor oder während des Serienstarts vermeiden¹⁵.
- FMEAs identifizieren potentielle Ausfallmodi, bewerten die Ursachen und Auswirkungen eben dieser und ermitteln, mit welcher Wahrscheinlichkeit und dem damit verbundenen Risiko diese beseitigt oder verringert werden können¹⁶.
- FMEAs können als Entlastungsnachweis im Produkthaftungsgesetz und im Produktsicherheitsgesetz eingesetzt werden¹⁷.
- FMEAs sind eine Risikoanalyse nach dem Stand der Technik und liefern eine effektive und effiziente Dokumentation für potentielle Fehler und deren Risiken und liefern Maßnahmen um diese zu verringern oder zu vermeiden¹⁸.
- FMEAs bieten grundlegende Informationen für die Zuverlässigkeitsvorhersage sowie für das Produkt- und Prozessdesign¹⁹.

¹¹Werdich, 2012, S. 5

¹²Carlson, 2012, S. 6

¹³Liu, 2016, S. 3

¹⁴Hering und Schloske, 2019, S. 4

¹⁵Werdich, 2012, S. 3

¹⁶Liu, 2016, S. 3

¹⁷Hering und Schloske, 2019, S. 4

¹⁸Werdich, 2012, S. 3

¹⁹Teoh und Keith, 2004, S. 153

- FMEAs können Garantie- und Fehlerfolgekosten, Imageschäden und somit implizierte Verluste von Unternehmen und Kunden verhindern²⁰.
- FMEAs können Wiederholfehler reduzieren und liefern eine gemeinsame Sprache für alle Beteiligten²¹.

2.1.3 Historie

Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) wurde 1949 vom US Militär eingeführt, um Probleme zu analysieren, welche sich aus militärischen Funktionsstörungen ergaben²². Der ursprüngliche Wortlaut des Dokuments lautete MIL-P-1629 (Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) und wurde 1980 in MIL-STD-1629A1 umbenannt. Des Weiteren begann die NASA (National Aeronautics and Space Administration) in den 1960er Jahren FMEA in deren Weltraumprogrammen mit hohem Risiko aufzunehmen, welches als Inspiration für die Zivilluftfahrt galt. Diese zog 1967 gleich und verwendete ebenso diesen Ansatz. Damit war der Beginn einer Erfolgsgeschichte geschrieben. In den 1970er Jahren verbreitete sich FMEA auch in anderen Branchen wie Offshore und Automotive. Im Laufe der Zeit hat ihre Verbreitung eine starke Dynamik erlangt und wird heutzutage in allen Branchen, von der Luft- und Raumfahrt bis zum Gesundheitswesen, eingesetzt²³.

FMEA ist in der jüngeren Literatur in mindestens 4 internationalen Standards beschrieben: *MIL-STD 1629A (DoD 1980)*, welches vom US Militär genutzt wird, *IEC 60812 (IEC 1985)*, *BS EN 60812 (BSI 2006)* und *SAE-J1739 (SAE 2002)*²⁴.

Zur Übersicht werden nachfolgend die wichtigsten geschichtlichen Betrachtungen und Veränderungen der FMEA in chronologischer Reihenfolge angegeben²⁵:

- **1949:** Einführung der FMEA als US militärische Anweisung MIL-P-1629 (Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis).
- **1967:** Aufnahme der FMEA in das NASA Apollo Raumfahrtprogramm.
- **1965:** Generelle Übernahme der Vorgangsweise in der Luft- und Raumfahrt.
- **1975:** Anwendung der FMEA in der Kerntechnik.
- **1977:** Nachdem das Ford Modell Pinto aufsehenerregende Probleme bereitete, entschloss sich Ford, als 1. Automobilhersteller, FMEA als Tool in die Qualitätssicherung einzubauen.
- **1980:** Normierte Einführung der Ausfalleffektenanalyse DIN 25448 in Deutschland.
- **1986:** Der VDA (Verband der Automobilindustrie) entwickelte die FMEA hinsichtlich der Methodenbeschreibung weiter.
- **1990:** Einführung der automobilunabhängigen Beschreibung der FMEA durch DGQ (Deutsche Gesellschaft für Qualität).

²⁰Hering und Schloske, 2019, S. 4

²¹Werdich, 2012, S. 4

²²Spreafico et al., 2016, S. 19

²³Anes et al., 2017, S. 516

²⁴Braaksmas et al., 2012, S. 6904

²⁵Werdich, 2012, S. 7

- **1994:** Erste gemeinsame Auflage der QS-9000 durch die Automobilhersteller General Motors, Ford und Chrysler. Die Grundlage hierzu bildet die DIN EN ISO 9001:1994–2008.
- **1996:** Weiterentwicklung durch die Automobilindustrie im VDA (Bd. 4, Teil 2). Nun existiert eine uniforme und von allen anerkannte Vorgehensweise der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse.
- **1998:** Immer größere Verwendung in der Automobilindustrie. Die Hersteller verlangen von den Zulieferern FMEAs für die zugekauften Produkte. Als Basis für diese Forderungen wird die international gültige ISO:9001:1994 herangezogen.
- **2001:** Anwendung der FMEA in vielen weiteren, auch nicht technischen Gebieten, durch eine Förderung des DGQ.
- **2006:** Die Vorgehensweise bei einer FMEA-Erstellung im Automobilbereich wird in der aktuellen VDA Bd. 4 Teil 3 detailliert beschrieben. Eine enorme Zahl an verschiedenen Branchen und Interessensgebieten akzeptiert die FMEA und hat diese in deren Organisationen übernommen.

2.1.4 Vorgehensweise

Die FMEA unterliegt, wie auch sämtliche andere Risikoanalysen, einer vordefinierten Vorgehensweise. Da es in der Literatur jedoch nicht eine universal anwendbare Vorgehensweise gibt, können sich die jeweiligen FMEA's marginal unterscheiden. Liu (2016, S. 7) empfiehlt bei der Durchführung der FMEA jene Strategie, welche in Abbildung 2.3 ersichtlich ist und mit den nachfolgenden 9 Schritten erläutert wird. Der Prozess wird mit Inputs von anderen Autoren bekräftigt.

1. Determine the scope of FMEA analysis:

Zu Beginn ist es wichtig den Umfang der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse zu definieren und einzugrenzen. Dies ist essentiell, da die nachgehenden Punkte innerhalb dieser Grenzen agieren²⁶. Ein Produkt, Prozess oder Unterprozess wird ausgewählt und zur FMEA freigegeben²⁷.

2. Assemble the FMEA team:

FMEAs sollten von einem Team behandelt werden und nicht von Einzelpersonen. Durch Teammitgliedern aus unterschiedlichsten Disziplinen, können diverse Einflüsse und Informationsansichten miteinbezogen werden. Die Mitglieder müssen des Weiteren allesamt Wissen bezüglich Gruppen- und Teamverhalten besitzen. Außerdem sollte das Team cross-functional arbeiten und eine kompetente Führungsperson besitzen, welche Erfahrung im Führen von Teams und umfangreiches Wissen hinsichtlich der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse besitzt²⁸. Ineffektive Teams können die komplette FMEA zerstören. Mit Hilfe von gezieltem Management Support sollten die richtigen Personen, mit Unterstützung von adäquatem Training und ergebnisorientierter Ausbildung, in einer Teamgröße von 4-8 Personen, die Analyse vollziehen und durchgängig betreuen²⁹.

²⁶Liu, 2016, S. 5

²⁷Lin und Chiu, 2018, S. 3

²⁸Liu, 2016, S. 6

²⁹Carlson, 2014, S. 40

Den Mitgliedern des Teams obliegt es, diverse Faktoren zur Bewertung der FMEA durch meist subjektive Einschätzungen anzugeben. Neu entwickelte linguistische Modelle raten von subjektiven Beurteilung ab und empfehlen, dass die Mitglieder des FMEA-Teams ihre Einschätzungen zu den Risikofaktoren durch die Verwendung multigranularer sprachlicher Aussprachssätze bewerkstelligen, um Objektivität zu schaffen³⁰.

3. Understand the system to be analyzed:

Jenes System, welches mittels FMEA analysiert werden soll, muss von den involvierten Personen durchgehend verstanden werden. Mit Hilfe von Unterteilungen in Subsysteme wird der Komplexitätsgrad vermindert und das System ist leichter zu analysieren bzw. zu verstehen. Wichtige Tools sind Process Flowcharts, Schemata, Parameter Diagramme (P diagram) und Blue Prints³¹.

4. Brainstorm failure modes of each component and their effects:

Mit Hilfe von Brainstorming sollen alle Fehlermodi und die dazugehörigen Gründe evaluiert werden. Dies hat den Vorteil, dass alle involvierten Personen selbst über Fehler nachdenken können und danach in Kombination mit Ideen anderer, möglichst viele potentielle Fehler entdecken können³².

5. Determine the O, S, and D for failure modes:

Nachdem das Team die einzelnen Fehlermodi definiert hat, ist der nächste Schritt die Findung der Auftretenswahrscheinlichkeit (Occurence), des Schweregrades (Severity) und der Entdeckungswahrscheinlichkeit (Detection) der jeweiligen Fehler³³.

Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Fehlers wird mittels einer Rating Nummer angegeben, welche in Tabelle 2.1 ersichtlich ist. Sie gibt an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Fehlermodus und die dazugehörige Ursache bei dem zu analysierenden Bauteil beziehungsweise Prozess auftritt³⁴.

Occurence		
Rating	Probability of Failure	Possible Failure Rate
10	Extremely high: failure almost inevitable	≥ 1 in 2
9	Very high	1 in 3
8	Repeated failures	1 in 8
7	High	1 in 20
6	Moderately High	1 in 80
5	Moderate	1 in 400
4	Relatively low	1 in 2000
3	Low	1 in 15.000
2	Remote	1 in 150.000
1	Nearly impossible	≤ 1 in 1.500.000

Tab. 2.1: Rating - Auftretenswahrscheinlichkeit (Liu, 2016, S. 5)

³⁰Liu et al., 2016, S. 1028

³¹Liu, 2016, S. 6

³²Pillay und Wang, 2003, S. 6

³³Werdich, 2012, S. 50

³⁴Carlson, 2012, S. 38

Nachfolgend muss das Team den Schweregrad jedes einzelnen Fehlermodi einschätzen und nutzt dazu die in Tabelle 2.2 angegebene Skala. Ein tieferes Rating impliziert einen geringeren Schweregrad³⁵.

Severity		
Rating	Severity of Effect	Effect
10	Hazardous without warning	Highest severity ranking of a failure mode, occurring without warning, and consequence is hazardous
9	Hazardous with warning	Higher severity ranking of a failure mode, occurring with warning, and consequence is hazardous
8	Very high	Operation of system or product is broken down without compromising safe
7	High	Operation of system or product may be continued, but performance of system or product is affected
6	Moderate	Operation of system or product is continued, and performance of system or product is degraded
5	Low	Performance of system or product is affected seriously, and the maintenance is needed
4	Very low	Performance of system or product is less affected, and the maintenance may not be needed
3	Minor	System performance and satisfaction with minor effect
2	Very Minor	System performance and satisfaction with slight effect
1	None	No effect

Tab. 2.2: Rating - Schweregrad (Liu, 2016, S. 5)

Schlussendlich ist die Entdeckungswahrscheinlichkeit zu ermitteln. Dieses ebenso vom FMEA Team zu bestimmende Rating, welches in Tabelle 2.3 abgebildet ist, ermöglicht es die Wahrscheinlichkeit der Entdeckung des Fehlers und die dazugehörigen Ursachen und Auswirkungen zu bestimmen. Ein niedrigeres Rating impliziert, dass der Fehler leichter zu entdecken ist und vice versa³⁶.

³⁵Headquaters, 2006, S. 3-14

³⁶Werdich, 2012, S. 51

Detection		
Rating	Detection	Criteria
10	Absolutely impossible	Design control does not detect a potential cause of failure or subsequent failure mode, or there is no design control
9	Very remote	Very remote chance the design control will detect a potential cause of failure or subsequent failure mode
8	Remote	Remote chance the design control will detect a potential cause of failure or subsequent failure mode
7	Very low	Very low chance the design control will detect a potential cause of failure or subsequent failure mode
6	Low	Low chance the design control will detect a potential cause of failure or subsequent failure mode
5	Moderate	Moderate chance the design control will detect a potential cause of failure or subsequent failure mode
4	Moderately high	Moderately high chance the design control will detect a potential cause of failure or subsequent failure mode
3	High	High chance the design control will detect a potential cause of failure or subsequent failure mode
2	Very high	Very high chance the design control will detect a potential cause of failure or subsequent failure mode
1	Almost certain	Design control will almost certainly detect a potential cause of failure or subsequent failure mode

Tab. 2.3: Rating - Entdeckungswahrscheinlichkeit (Liu, 2016, S. 6)

6. Calculate the RPN of each failure mode:

Da das Team nun alle Ratings durchgeführt hat, muss ein international vergleichbarer Wert gefunden werden, um Fehler und deren Ursachen klassifizieren zu können. Diese Einteilung wird mit der Risikoprioritätszahl (RPN) ermöglicht. Die RPN setzt sich aus der Multiplikation des Schweregrads mit der Auftretenswahrscheinlichkeit und der Entdeckungswahrscheinlichkeit zusammen. Die RPN kann somit einen Wert zwischen 1 (kein Risiko) und 1000 (höchstes Risiko) annehmen³⁷.

$$RPN = Severity * Occurrence * Detection \quad (2.1)$$

Einige Autoren und Experten raten von der Verwendung der Risikoprioritätszahl ab, da sie eine geringe Aussagekraft hinsichtlich der Qualität der Produkte und Prozesse hat und

³⁷Zhou und Tang, 2018, S. 3

nur ein Anhaltspunkt sei. Der VDI (Verein Deutscher Ingenieure) beispielsweise empfiehlt die Verwendung von Risikomatrizen oder eine Priorisierung mit individuellen Grenzwerten³⁸.

Um jedoch die internationale Einigkeit weiterhin bestehen zu lassen, werden die in Kapitel 3 simulierten FMECAs dennoch mit Hilfe der Risikoprioritätszahl analysiert.

7. **Prioritize the failure modes for preventive actions:**

Nun müssen die Fehlermodi mit Hilfe der RPN klassifiziert werden. Dafür müssen für jene Risiken, welche eine hohe Risikoprioritätszahl aufweisen, empfohlene Maßnahmen gefunden werden, um die Fehlermodi zu eliminieren, die Entdeckungswahrscheinlichkeit zu erhöhen und/oder die eingehenden Verluste zu minimieren. Aber auch Risiken mit geringer RPN muss Aufmerksamkeit gewidmet werden, um eine oder mehrere der drei eben erwähnten Maßnahmen anwenden zu können³⁹.

8. **Prepare FMEA report by summarizing the analysis results:**

Einer der bedeutendsten Punkte in der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse ist das Dokumentieren der gefundenen Fehler, deren Gründe und die Ratings der Entdeckungswahrscheinlichkeit, des Schweregrads, der Auftretenswahrscheinlichkeit und der implizierten Risikoprioritätszahl. Auch die empfohlenen Maßnahmen müssen niedergeschrieben werden, um für zukünftige FMEAs historische Daten extrahieren zu können und somit Verbesserungen noch effektiver gestalten zu können⁴⁰. Ebenso kann die Dokumentation als Kommunikationstool gesehen werden, welches dem interdisziplinären Team bei der Anwendung der FMEA als Unterstützung dient⁴¹.

9. **Calculate the revised RPNs as the failure modes are reduced or eliminated:**

Sobald die gesetzten Maßnahmen getroffen worden sind, ist eine nochmalige Betrachtung des Fehlermodus essentiell. Durch eine neuerliche Bewertung der Entdeckungswahrscheinlichkeit, des Schweregrads und der Auftretenswahrscheinlichkeit, kann die Risikoprioritätszahl von neuem berechnet werden⁴².

Diese Rückkopplung zeigt, inwieweit die spezifischen Maßnahmen das Risiko verringert oder gar eliminiert haben. Das langfristige Ziel ist es, jeden einzelnen Fehler vollständig zu beseitigen während es das kurzfristige Ziel ist, die Fehler zu minimieren, wenn nicht zu beseitigen⁴³.

³⁸Werdich, 2012, S. 52f

³⁹Liu, 2016, S. 9

⁴⁰Teoh und Keith, 2004, S. 257

⁴¹Liu, 2016, S. 9

⁴²Lin und Chiu, 2018, S. 5

⁴³Liu, 2016, S. 9

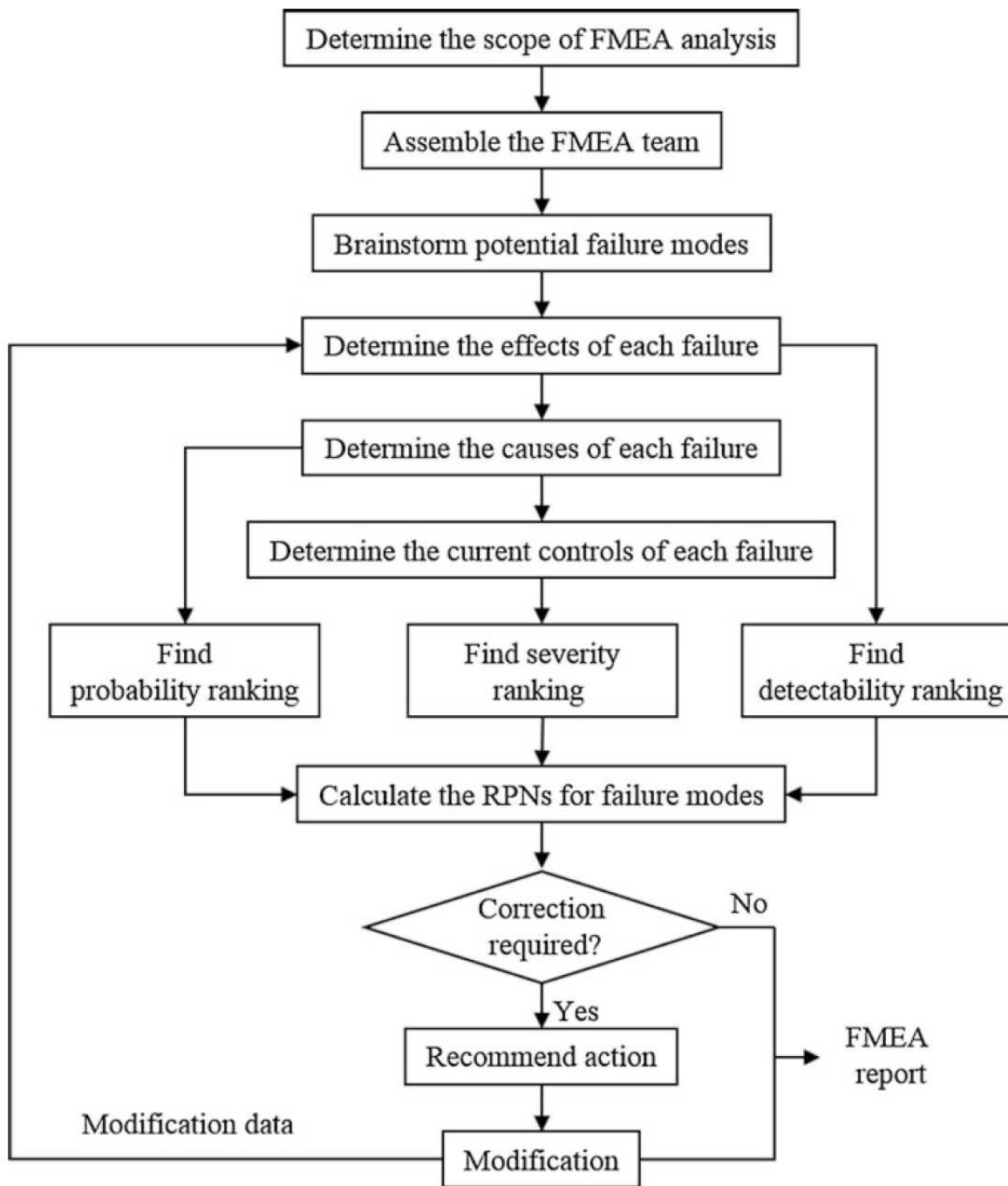


Abb. 2.3: FMEA Vorgehensweise (Liu, 2016, S. 7)

Carlson⁴⁴ schlägt das in Abbildung 2.4 illustrierte FMEA Worksheet vor, auf welches nachfolgend näher eingegangen und mit einem Beispiel unterstrichen wird.

⁴⁴Carlson, 2012, S. 26-45

Item	Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	Severity	Potential Cause(s) of Failure	Occurrence	Current Design Controls (Prevention)	Current Design Controls (Detection)	Detection	RPN	Recommended Action(s)	Responsible Person	Actions Taken
												Target Completion Date	Effective Completion Date
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑧	⑨	⑩	⑪		

Abb. 2.4: FMEA Worksheet (Carlson, 2012, S. 26)

1. **Item:**

Das Item ist der Fokus der FMEA. Je nach Betrachtung, kann das Item eine Komponente, System, Subsystem oder Prozess sein, auf welchen näher eingegangen wird.

Beispiel: Rillenkugellager

2. **Function:**

Die Funktion beschreibt welche Tätigkeiten oder Funktion das Item hat. Es können mehrere Funktionen für ein Item auftreten.

Beispiel: Führt zwei gegeneinander bewegliche Bauteile (Welle und Hohlwelle eines Getriebes).

3. **Potential Failure Mode:**

Der potentielle Fehlermodus ist jene Art und Weise, in welcher das Item gegebenenfalls die beabsichtigte Funktion und die damit verbundenen Anforderungen nicht erfüllt. Je nach der vom Reliability Engineer festgelegten Fehlerdefinition können die Fehlermodi eine unzureichende oder schlechte Leistung der Funktion, das Fehlschlagen einer Funktion innerhalb definierter Grenzen, eine wechselnde Leistung einer Funktion und/oder die Ausführung einer unbeabsichtigten oder unerwünschten Funktion umfassen.

Beispiel: Pitting (schalenförmiger Materialausbruch bei wechselnder Beanspruchung welcher durch oberflächennahe Mikrorissbildung hervorgerufen wird).

4. **Potential Effect(s) of Failure:**

Die potentielle Auswirkung eines Fehlermodus auf das System wird Effekt genannt. Es können mehrere Effekte auf einen Fehlermodus zutreffen. Des Weiteren werden die Effekte in *Local Effect* (Die Konsequenzen des Ausfalls eines Items oder angrenzender Items, *Next Level Higher Effect* (Die Konsequenzen des Ausfalls auf nächst höherer Ebene) und *End Effect* (Die Konsequenzen des Ausfalls auf dem übergeordnetsten System und/oder dem Endbenutzer) eingeteilt.

Beispiel:

- Local Effect: Spannungsspitzen im Rillenkugellagerinnenring entlang der Hauptschubspannungsrichtung unter 45° der Oberfläche.

- Next Level Higher Effect: Bruch des Rillenkugellagerinnenrings.
- End Effect: Getriebeausfall mit Totalschaden.

5. Severity:

Anhand der in Tabelle 2.2 gezeigten Einteilung des Schweregrades, werden potentielle Fehlermodi einem Rating zugeordnet, welches für die weitere Betrachtung überaus bedeutend ist. Hierbei ist zu unterstreichen, dass es sich um ein relatives Ranking im Rahmen der FMEA handelt und dass die Einteilung ohne Rücksicht auf die Wahrscheinlichkeit des Auftretens oder der Erkennung durchgeführt wird.

Beispiel: 6 (Moderate)

6. Potential Cause(s) of Failure:

In diesem Merkmal geht es um die potentiellen Ursachen von Fehlermodi. Vorzugsweise wird diese Frage mit *Warum* aufgeworfen und sollte danach systematisch abgearbeitet werden. Herstellungs-, Konstruktions- oder Montagefehler könnten mögliche Ursachen sein, welche identifiziert werden müssen. Per Definition tritt bei Auftreten einer Ursache der entsprechende Fehlermodus auf. Für einen Fehlermodus können eine Mehrzahl an Ursachen festgestellt werden.

Beispiel:

- Tribologische Überbeanspruchung
- Mangelnde Ölviskosität
- Falsche Betriebstemperatur

7. Occurrence:

Wie auch schon bei der Schweregradanalyse wird bei der Auftretenswahrscheinlichkeit dem Fehlermodus ebenfalls eine numerische Bewertung zugeordnet. Die Evaluierung basiert auf den Kriterien der entsprechenden Vorkommensskala, welche in Tabelle 2.1 ersichtlich ist. Das Auftreten der Ereignisse stellt hier einen absoluten Wert dar und wird ohne Rücksicht auf den Schweregrad oder die Wahrscheinlichkeit der Erkennung bestimmt.

Beispiel: 5 (Moderate)

8. Current Design Controls (Prevention & Detection):

Kontrollen sind die Methoden oder Maßnahmen, welche zurzeit geplant oder bereits in der Durchführung sind, um das mit jeder potentiellen Ursache verbundene Risiko zu reduzieren oder zu beseitigen. Schon während der Produktentwicklung aber auch in späteren Produktlebenszyklusphasen sollen Kontrollen potentielle Fehlerquellen verhindern oder erkennen. Das Ziel ist es, die Kontrollen in der FMEA auf jenes zu beschränken, was derzeit geplant oder bereits vorhanden ist. Auch in diesem Falle können mehrere Kontrollen für einen Grund vorhanden sein.

Beispiel:

- Prevention Control: Für den jeweiligen Einsatzzweck die Verwendung von *richtigem* Werkstoff und der *richtigen* Wärmebehandlung. Berechnungen um materialtechnische Überbelastungen zu vermeiden.

- Detection Control: Schwingungsmessungen an der Lagerstelle. Regelmäßige Überprüfung der Komponenten.

9. Detection:

Das dritte numerische Ranking, welches für die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse benötigt wird, besteht aus der Wahrscheinlichkeit der Entdeckung von Fehlermodi. Das Ranking berücksichtigt die Wahrscheinlichkeit der Erkennung des Fehlermodus beziehungsweise der Fehlerursache nach definierten Kriterien, welche in Tabelle 2.3 ersichtlich ist. Dieser Prozess wird wie schon auch bei beiden anderen numerischen Parametern (Schwere und Eintrittswahrscheinlichkeit des Fehlermodus) unabhängig von den jeweilig anderen ermittelt.

Beispiel: 7

10. RPN:

Die Risikoprioritätszahl (RPN) ist eine Berechnungsmöglichkeit, um das für jeden potenziellen Ausfallmodus beziehungsweise jede potenzielle Ausfallursache zusammenhängende Risiko zu kalkulieren und mit anderen Ausfallmodi zu vergleichen. Diese setzt sich aus dem Produkt der drei bereits behandelten numerischen Variablen (Schwere der Auswirkung, Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Ursache und Wahrscheinlichkeit der Erkennung der Ursache) zusammen. Die RPN kann Zahlen von 1 bis 1000 annehmen.

$$RPN = Severity * Occurence * Detection \quad (2.2)$$

Beispiel:

$$RPN = Severity * Occurence * Detection = 6 * 5 * 7 = 210 \quad (2.3)$$

11. Recommended Action(s):

Die empfohlenen Maßnahmen sollen dabei helfen, die Risiken zu minimieren oder im Bestfall zu eliminieren. Bei den Maßnahmen sollten die bestehenden Kontrollen, die Priorisierung des Problems sowie die Kosten berücksichtigt werden. Wiederrum kann es für jede Ursache viele empfohlene Maßnahmen geben.

Beispiel:

- Richtige Auswahl des Rillenkugellagers für den spezifischen Anwendungsfall (Tribologische, mechanische und temperaturtechnische Beanspruchung).
- Zukauf von qualitativ hochwertigen Rillenkugellager von vertrauenswürdigen Lieferanten.
- Installation von Schwingungs- und Temperaturmessungen.

Das von Liu (2016, S. 8) illustrierte Worksheet, welches in Abbildung 2.5 zu sehen ist, ähnelt der von Carlson beschriebenen Vorgehensweise sehr. Der Unterschied hierbei ist, dass nach der Behandlung der Recommended Action(s) eine nochmalige Berechnung der Risikoprioritätszahl durchgeführt wird. Diese erneute Risikobewertung, welche wiederum mit der Multiplikation von Severity, Occurence und Detection ermittelt wird, ist essentiell, da sie offenbart, inwieweit sich das mit den einzelnen Fehlermodi verbundene Risiko aufgrund der spezifischen Maßnahmen der FMEA verringert hat. Das große aber meist auch langfristige Ziel ist es, jeden einzelnen Fehler vollständig zu beseitigen. Auf kurze Zeit betrachtet, muss es die Intention sein, Fehler zu minimieren, wenn nicht gar zu beseitigen⁴⁵.

⁴⁵Liu, 2016, S. 8

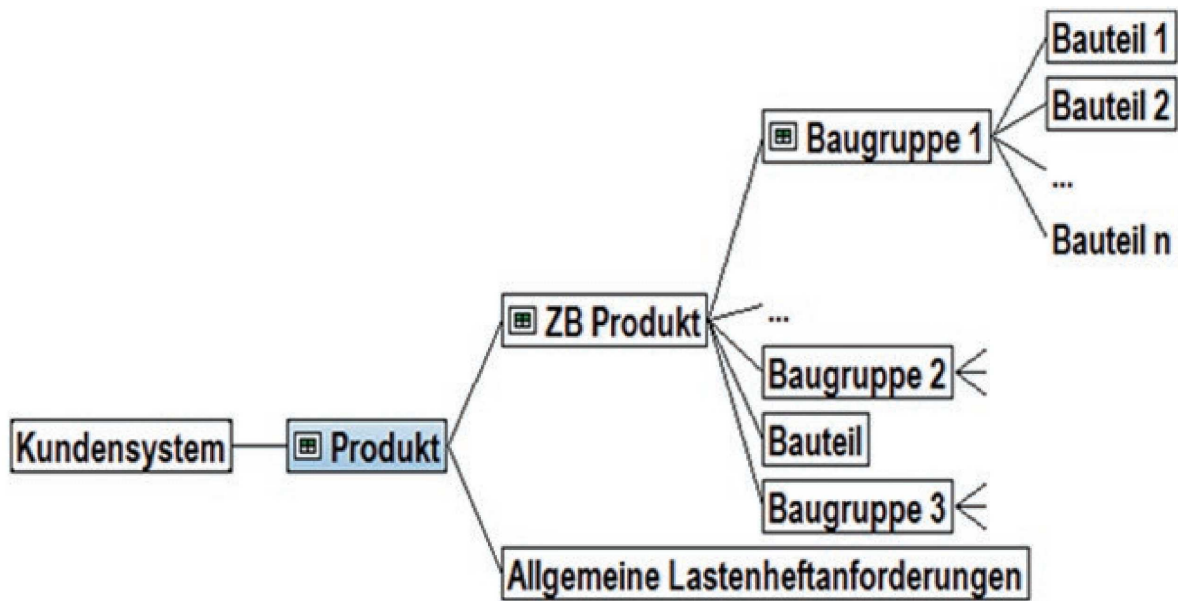


Abb. 2.6: Systemstrukturierung (Hering und Schloske, 2019, S.24)

2.1.5.2 Funktionszuordnung

Dem eben erwähnten Struktur- bzw. Prozessbaum werden anschließend Funktionen, Prozess- und Produktmerkmale assoziiert⁴⁷. Das Ergebnis hierbei wird als Funktionsbaum oder Funktionsnetz bezeichnet und ist in Abbildung 2.7 ersichtlich. Zur Eintragung im Diagramm werden folgende Fragestellungen verwendet: Um nach rechts zu einer höheren Detailgenauigkeit zu kommen wird mit *Wie?* gefragt. Um nach links zu gelangen mit *Warum?*⁴⁸.

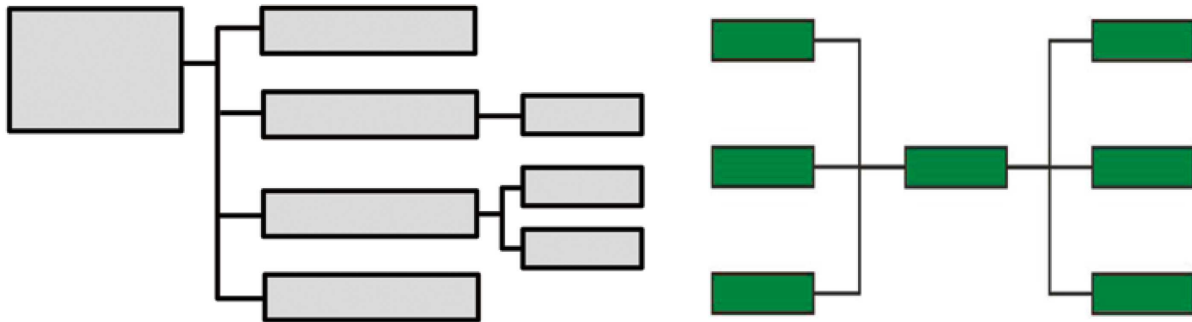


Abb. 2.7: Funktionsbaum und Funktionsnetz (Werdich, 2012, S.33)

2.1.5.3 Blockdiagramm

Das FMEA Blockdiagramm ist ein visuelles Werkzeug, um Grenzen und den Umfang der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse zu definieren. Das Diagramm zeigt des Weiteren physische und logische Beziehungen zwischen den einzelnen Bauteilen oder Komponenten⁴⁹. Das zu betrachtende Produkt soll den Mittelpunkt des Blockdiagramms einnehmen. Danach werden alle Einflussgrößen und damit zusammenhängende Bauteile niedergeschrieben und Schnittstellen sind

⁴⁷Hering und Schloske, 2019, S. 6,23f

⁴⁸Werdich, 2012, S. 33

⁴⁹Carlson, 2012, S. 82

All-Terrain Bicycle System and Hand Brake Subsystem

Interface Type: Physical (P)
 Material Exchange (M)
 Energy Transfer (E)
 Data Exchange (D)

Functional Necessity:
 Must be present (1)
 Must not be present (2)

Bicycle Subsystems	1.1 Frame S/S	1.2 Front Wheel S/S	1.3 Rear Wheel S/S	1.4 Sprocket–Pedal S/S	1.5 Chain–Derailleur S/S	1.6 Seat S/S	1.7 Handlebar S/S	1.8 Suspension S/S	1.9 Hand Brake S/S	1.9.1 Brake Lever	1.9.2 Brake Cable	1.9.3 Brake Pads	1.9.4 Brake Caliper
1.1 Frame Subsystem		P1	P1	P1		P1	P1	PE1	P1		P1		P1
1.2 Front Wheel Subsystem									E1			E1	
1.3 Rear Wheel Subsystem					PE1				E1			E1	
1.4 Sprocket–Pedal Subsystem					PE1								
1.5 Chain–Derailleur Subsystem													
1.6 Seat Subsystem													
1.7 Handlebar Subsystem									P1	P1			
1.8 Suspension System													
1.9 Hand Brake Subsystem													
1.9.1 Brake Lever											PE1		
1.9.2 Brake Cable													PE1
1.9.3 Brake Pads													P1
1.9.4 Brake Caliper													

Abb. 2.9: Interface Matrix (Carlson, 2012, S. 85)

2.1.5.5 FMEA Formblatt

Das FMEA Formblatt ist eine übersichtliche Möglichkeit Fehler mit deren Ursachen und Folgen zu visualisieren. Abbildung 2.10 gibt ein Beispiel über ein FMEA Formblatt. Der zu betrachtende Fehler wird in folgende 3 Spalten eingeteilt: *Mögliche Fehlerfolgen*, *Möglicher Fehler* und *Mögliche Fehlerursachen*. Die Analyse wird anhand verschiedener Ebenen durchgeführt, sodass der ursprüngliche Grundfehler identifiziert werden kann. Wie zu sehen ist, ist der Fehler einer Ebene die Folge der untergeordneten Ebene und die Ursache des übergeordneten Systems⁵².

⁵²Werdich, 2012, S. 39

System	Motor		
	Leistung von 100 KW abgeben		
	Fahrzeug wird nicht ausreichend beschleunigt	Motor gibt zu wenig Leistung ab	Kühlwasser wird zu wenig gekühlt
Subsystem	Kühlsystem		
	Kühlwasser kühlen		
	Motor gibt zu wenig Leistung ab	Kühlwasser wird zu wenig gekühlt	Wasserpumpe wälzt zu wenig Wasser um
Subsystem	Wasserpumpe		
	Kühlwasser umwälzen		
	Kühlwasser wird zu wenig gekühlt	Wasserpumpe wälzt zu wenig Wasser um	Pumpenrad dichtet gegenüber Gehäuse nicht dicht genug ab
Bauteil	Pumpenrad		
	Gegen das Pumpengehäuse abdichten		
	Wasserpumpe wälzt zu wenig Wasser um	Pumpenrad dichtet gegenüber Gehäuse nicht dicht genug ab	Falsch ausgelegte Geometrie des Pumpenrades

Abb. 2.10: FMEA Formblatt (Werdich, 2012, S. 40)

2.1.5.6 Fehlerbaumanalyse

Die Fehlerbaumanalyse (englisch Fault-Tree-Analysis) ist ein nützliches Tool um festzustellen, aufgrund welcher Fehler niedrigerer Ebenen, ein Fehler einer übergeordneteren Ebene eintritt. Die Fehlerbaumanalyse hat den Hauptzweck kritische Fehlerursachen oder Ausfallsursachen visuell darzustellen, wie Abbildung 2.11 mit dem Beispiel *Bersten eines Druckbehälters* zeigt⁵³. Die Fehlerbaumanalyse existiert seit über 40 Jahren und hat maßgeblich dazu beigetragen, die Zuverlässigkeit von Systemen zu erhöhen⁵⁴.

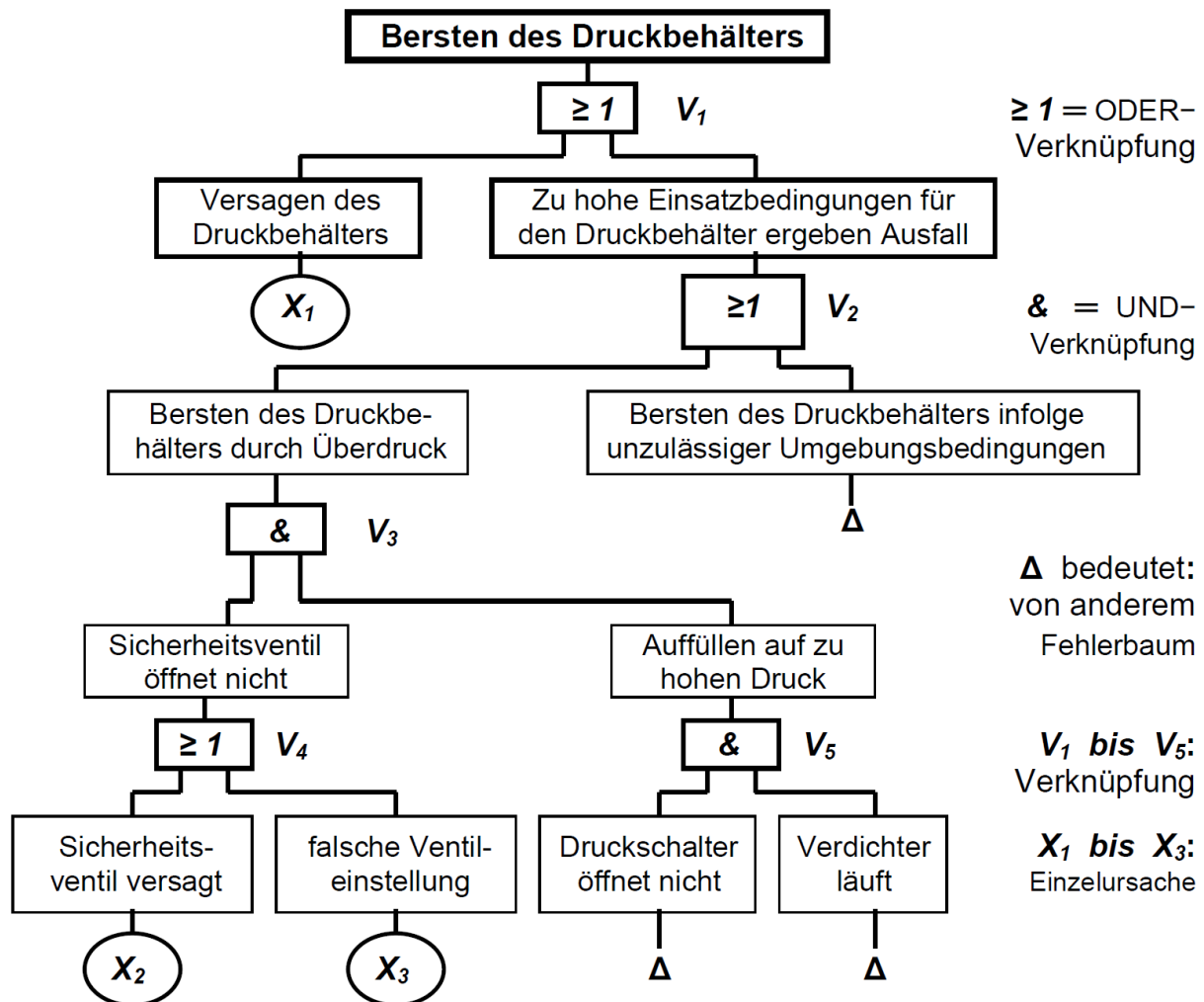


Abb. 2.11: Fehlerbaumanalyse (Geiger und Kotte, 2008, S.130)

2.1.5.7 Fragestellungen

Um Fehler und deren Gründe zu finden, müssen neben einer systematischen Vorgangsweise, diverse Fragen gestellt werden, welche dabei helfen an potentielle Ausfälle zu denken. Nachfolgend werden einige Fragestellungen angegeben, welche hierbei Rat geben sollen⁵⁵:

- Wie kann der Fehler auftreten?

⁵³Geiger und Kotte, 2008, S. 130

⁵⁴Yu et al., 2011, S. 957

⁵⁵Carlson, 2012, S. 85

- Warum und welche Umstände können dazu führen, dass das Bauteil/Produkt auf diese Weise versagt?
- Welche Faktoren tragen dazu bei, dass das System die zu erfüllende Funktion nicht ausführt?
- Warum könnte der Ausfall auftreten?
- Wie äußert sich der Ausfall?
- Gibt es angrenzende Systeme, Schnittstellen, Produkte und/oder Prozesse, welche von einem Ausfall beeinflusst werden?
- Warum? Weshalb? Wie? Wann? Wo?

2.1.5.8 5 Whys & Warum-Treppe

Die 5 Whys sind ein nützliches Tool um potentiellen Fehlern auf den Grund zu gehen. Diese Methode, welche von Taiichi Ohno, Gründer des Toyota Production Systems, erfunden wurde schlägt vor, 5 mal *Warum* zu fragen, um so die tatsächlichen Gründe von Fehlern zu entdecken. Tabelle 2.4 zeigt ein Beispiel der 5 Whys Methode, welche an einem berstenden Kabel angewandt wird⁵⁶.

Whys	Questions/Answers
1	Why does the cable break?
	Because the stress from the most extreme in - use operating conditions exceeds the strength of the cable.
2	Why does the stress from the most extreme in - use operating conditions exceed the strength of the cable?
	Because the strength of the current cable material can degrade under certain extreme environmental operating conditions.
3	Why can the strength of the current cable material degrade under certain extreme environmental operating conditions?
	Because the current cable material corrodes when exposed to extreme hot and moist environments.
4	Why does the current cable material corrode when exposed to extreme hot and moist operating environments?
	Because the current cable material is not suitable for the most extreme operation conditions for the all - terrain bicycle.
5	Why is the current cable material not suitable for the most extreme operation conditions for the all - terrain bicycle?
	Because the cable supplier selected the wrong material for the brake cable.

Tab. 2.4: 5 Whys (Carlson, 2012, S. 137f)

Die Warum-Treppe ist mit der 5 Whys Methode vergleichbar. Durch die mehrmalige Fragestellung *Warum* können die Ursachen von Fehler identifiziert werden wie Abbildung 2.12 zeigt⁵⁷.

⁵⁶Carlson, 2012, S. 136f

⁵⁷Werdich, 2012, S. 45



Abb. 2.12: Warum-Treppe (Werdich, 2012, S. 46)

2.1.5.9 Ishikawa-Diagramm

Das Ishikawa-Diagramm oder auch Ursache-Wirkungs-Diagramm beziehungsweise Fischgräten-Diagramm hilft bei der Erstellung der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, da es die Auswirkungen von potentiellen Fehlern in kleinsten Subeinheiten auf die nächste gelegene Einheit usw. darstellt⁵⁸. Das Diagramm hilft dem Team sich auf die wesentlichen Dinge der Fehlerentdeckung zu konzentrieren und nicht auf weniger relevante geschichtliche oder persönliche Interessen⁵⁹. Abbildung 2.13 verdeutlicht ein Template zum Ishikawa-Diagramm und Abbildung 2.14 zeigt das Beispiel eines Ishikawa-Diagramms zur Kopiertechnik.

⁵⁸Geiger und Kotte, 2008, S. 131

⁵⁹Werdich, 2012, S. 45

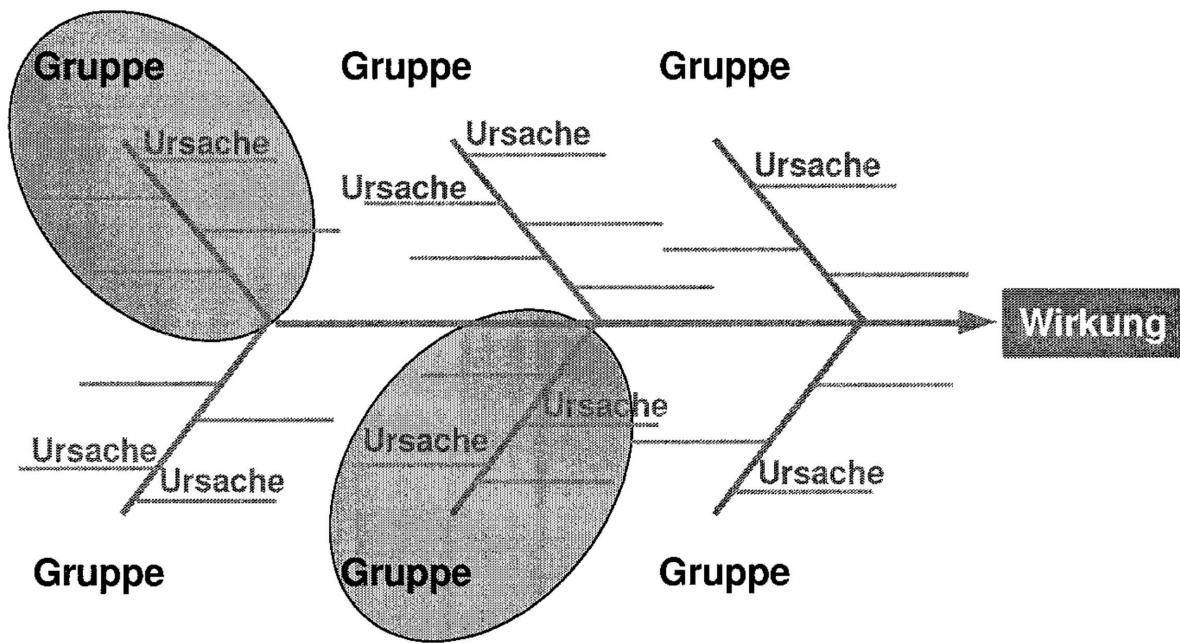


Abb. 2.13: Ishikawa-Diagramm Template (Ophey, 2005, S.131)

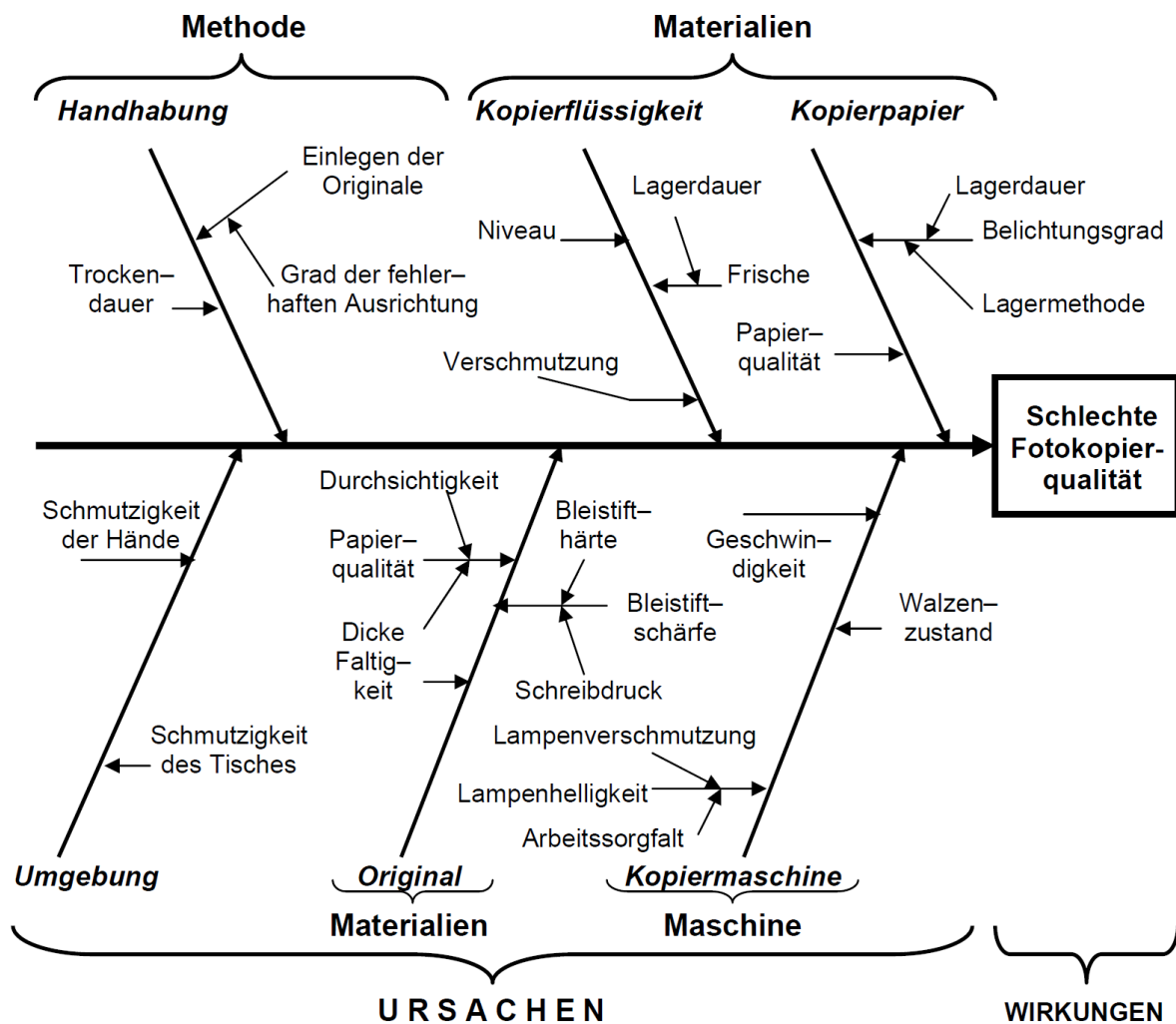


Abb. 2.14: Ishikawa-Diagramm (Geiger und Kotte, 2008, S.131)

2.1.5.10 Brainstorming

Brainstorming ist ein hilfreiches Tool um Basisvariablen zu identifizieren, welche in Fehlern enden. Im besten Fall sollte ein cross-functional Team aus interdisziplinären Aufgabenfeldern das Brainstorming abhalten. Jedes Teammitglied sollte dessen Ideen zunächst selbst finden und danach der Gruppe präsentieren. Schlussendlich sollen unter gemeinsamer Betrachtung potentielle Fehler gefunden und niedergeschrieben werden⁶⁰. Die von den Teammitgliedern gefundenen Ideen sollen ohne Zwang herbei geführt werden und möglichst viele Lösungsmöglichkeiten beinhalten⁶¹. Um ein erfolgreiches Brainstorming durchzuführen, ist es wichtig dass einige Punkte beachtet werden⁶²:

- Keine Verurteilung:
Jedes Teammitglied hat dieselben Rechte Ideen einzubringen und dessen Ideen dürfen nicht von anderen Mitgliedern bewertet werden.

⁶⁰Sonigra, 2017, S. 62,64

⁶¹Werdich, 2012, S. 210f

⁶²Falstein, 2004, S. 47

- Jede Idee ist gleich viel wert:
Jede von einem Teammitglied eingebrachte Idee steht einer anderen Idee nichts nach. Alle Vorschläge müssen mit der selben Gewichtung behandelt werden, obgleich von wem die Idee stammt.
- Keine Vorgesetzten:
In Anwesenheit von Vorgesetzten fällt es Menschen schwer, Ideen freien Lauf zu lassen. Eine angenehme und entspannte Umgebung ist Voraussetzung.

Abbildung 2.15 zeigt im Rahmen eines Brainstormings angewandtes Mind Map, welches auf die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse umgelegt werden kann.

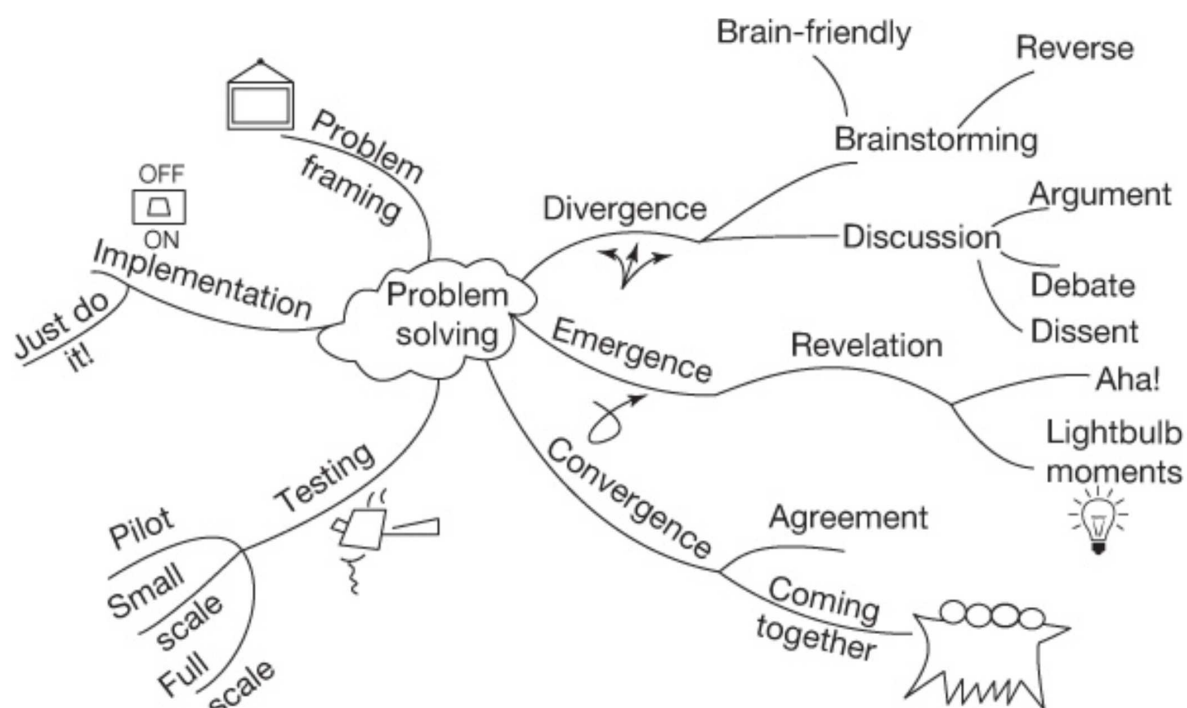


Abb. 2.15: Mind-Map (Cotton, 2016, S.131)

2.1.5.11 Fehler-Folgen-Matrix

Um alle potentiellen Fehler und Ausfälle finden zu können ist eine strukturierte Vorgangsweise unabdinglich. Abbildung 2.16 zeigt eine Fehler-Folgen-Matrix welche in 6 verschiedene Fehlerquellen unterteilt ist und bei welcher alle potentiellen Fehler eingetragen werden können⁶³:

- Aktuelles Bauteil
- Übergeordnete Baugruppe
- System
- Endprodukt
- Kunde

⁶³Werdich, 2012, S. 41

- Gesetzliche Vorschriften

Produkt:							
		Fehler - Folgen - Matrix					
		Mögliche Fehler					
Mögliche Folgen	Aktuelles Bauteil						
	Übergeordnete Baugruppe						
	System						
	Fahrzeug / Endprodukt						
	Kunde						
	Gesetzliche Vorschriften						

Abb. 2.16: Fehler-Folgen-Matrix (Werdich, 2012, S. 42)

2.1.5.12 Pareto-Diagramm

Das Pareto Diagramm, welches in Abbildung 2.17 ersichtlich ist, ist eine nützliche Methode, um Qualitätsmängel oder Fehlerursachen nach deren Wichtigkeit zu ordnen. In der klassischen 80/20 Klassifizierung, wird davon ausgegangen, dass 80% der Fehler durch 20% der Ursachen erklärbar sind⁶⁴. Dies impliziert, dass durch die Richtigstellung von 20% der Ursachen, die Fehlerwahrscheinlichkeit um satte 80% gemindert wird⁶⁵.

Ein weitere Möglichkeit um eine Klassifizierung bewerkstelligen zu können, ist ebenso in Abbildung 2.17 eingezeichnet. Durch die ABC-Analyse werden Fehler in die Klassen A, B und C, welche nach absteigender Bedeutung geordnet sind, eingeteilt⁶⁶.

⁶⁴Daum et al., 2010, S. 302

⁶⁵Werdich, 2012, S. 61

⁶⁶Daum et al., 2010, S. 302

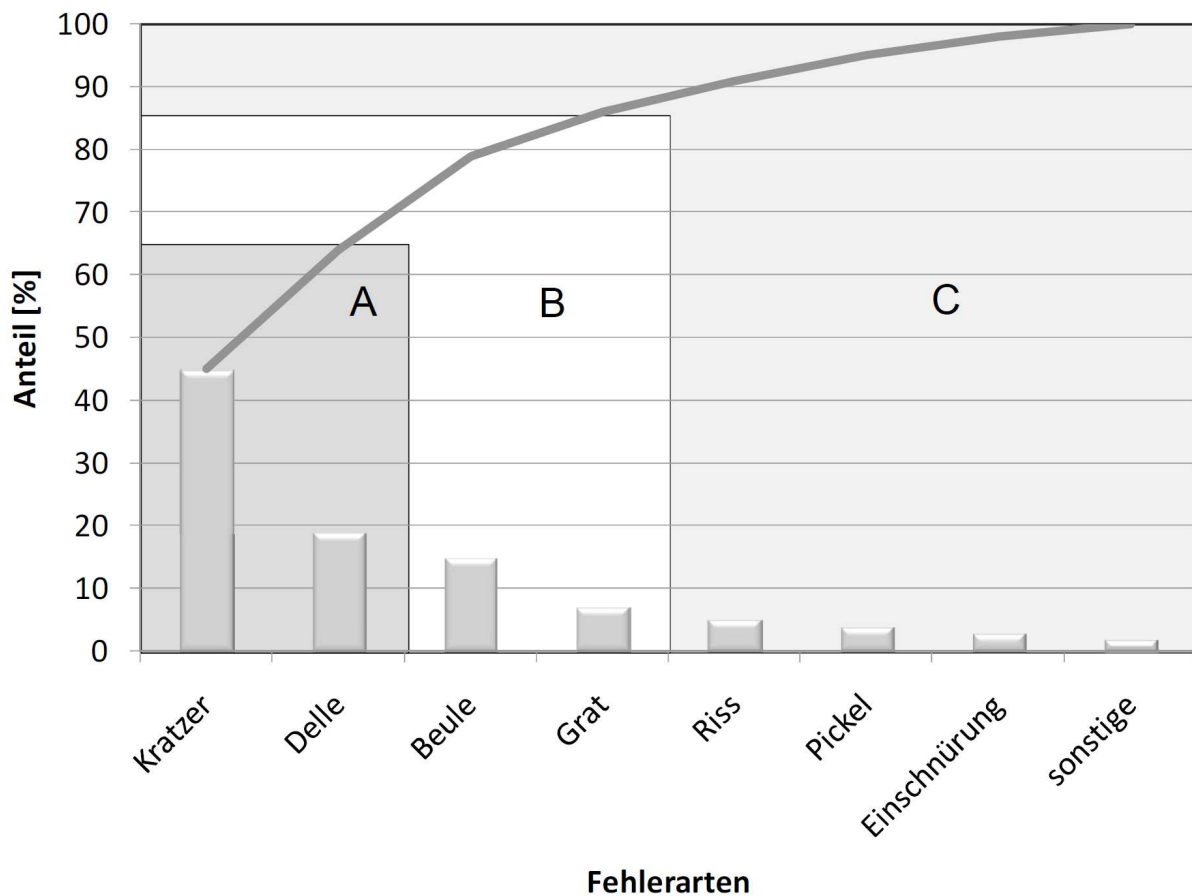


Abb. 2.17: Pareto-Diagramm mit ABC-Analyse (Daum et al., 2010, S. 302)

2.1.5.13 Häufigkeitsanalyse

Eine Häufigkeitsanalyse unterstützt die Teammitglieder bei der Auswertung aller potentiellen Fehler. Durch die Auftragung diverser Risikoprioritätszahlklassen, können absolute Häufigkeiten von mehr oder weniger risikoreichen Fehlern schnell erkannt werden (Abbildung 2.18)⁶⁷. Diese Analyse liefert jedoch keine Aussagen zur Qualität eines technischen Systems. Ob bestimmte Risikoprioritätszahlklassen risikoreich oder risikoarm sind, kann nur über externe Akzeptanzkriterien evaluiert werden⁶⁸.

⁶⁷Werdich, 2012, S. 61

⁶⁸Mock, 2003, S. 169

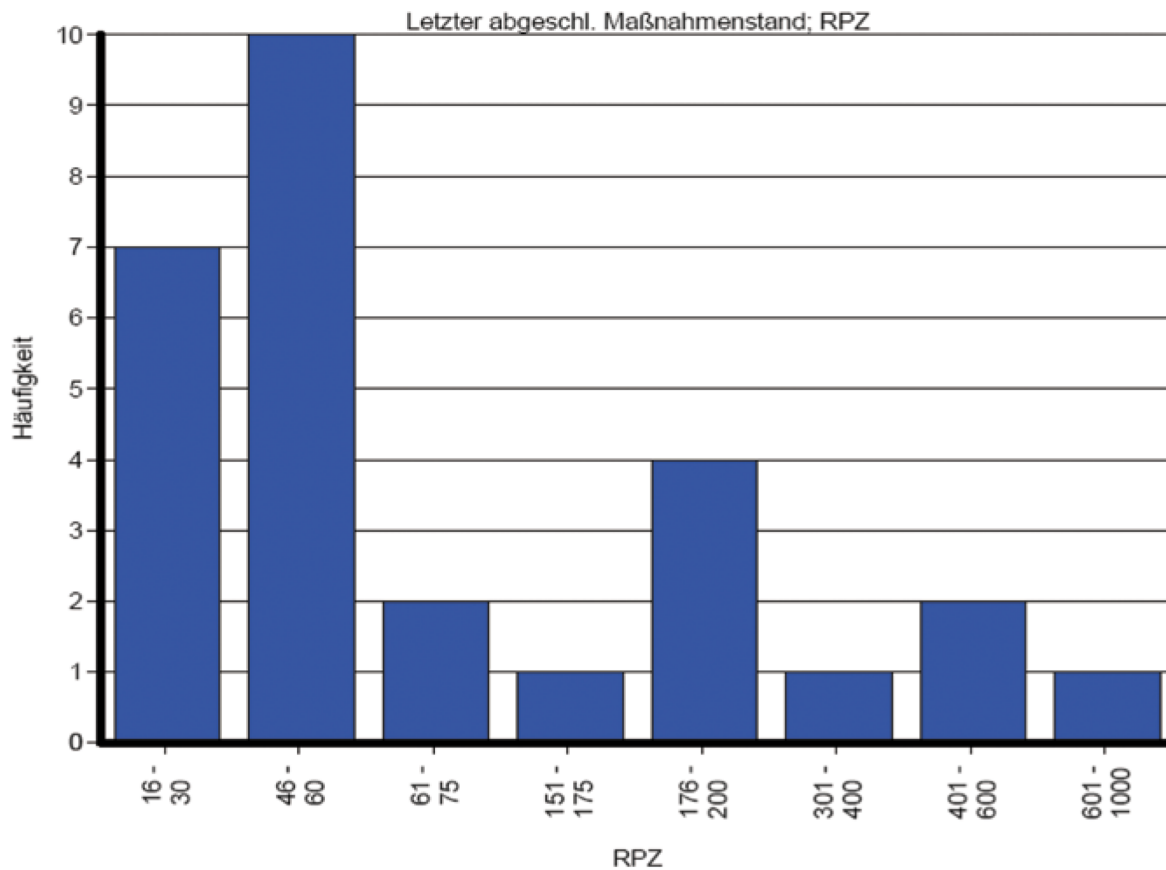


Abb. 2.18: Häufigkeitsanalyse (Werdich, 2012, S. 63)

2.1.6 Shortcomings

Wie bereits zuvor erwähnt, ist die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse ein nützliches Tool um Risiken zu bewerten und präventive Maßnahmen zu setzen, um etwaige Fehler und deren Auswirkungen zu vermeiden. Dennoch unterliegen der FMEA Anwendungsgrenzen und Schwächen, welche in den nachfolgenden Punkten genauer erläutert werden⁶⁹:

- **Risikoprioritätszahl (RPN):**

Viele Spezialisten sind der überzeugten Meinung, dass die RPN eine veraltete Methode der Risikobewertung ist und nicht zu empfehlen ist. Das nachfolgende Beispiel, welches wiederum die Variablen Schweregrad (S), Auftretenswahrscheinlichkeit (O) und Entdeckungswahrscheinlichkeit (D) beinhaltet, soll Aufschluss darüber geben, warum dies so ist. Der Vollständigkeit halber wird die Berechnung der Risikoprioritätszahl nachfolgend nochmals angegeben⁷⁰.

$$RPN = Severity * Occurrence * Detection \quad (2.4)$$

⁶⁹Liu, 2016, S. 10

⁷⁰Werdich, 2012, S. 52

	RPN	S	O	D
Fall 1	60	10	2	3
Fall 2	90	3	10	3
Fall 3	150	3	5	10

Tab. 2.5: Beispiel Risikoprioritätszahl (Werdich, 2012, S. 52)

Tabelle 2.5 zeigt die Berechnung 3 unterschiedlicher Fälle mit verschiedenen Ratings für den Schweregrad (S), die Auftretenswahrscheinlichkeit (O) und die Entdeckungswahrscheinlichkeit (D). Nach der klassischen Berechnungsmethode wird der Fall 3 als der kritische Fall gesehen, da hier die höchste RPN ausgewiesen wird. Doch es ist leicht ersichtlich, dass dies nicht der Wahrheit entspricht. Fall 1 ist der kritische Fall, da dieser höchst sicherheitskritisch ist und weder ausgeschlossen werden kann, noch zu 100% entdeckt werden kann. Wie zu sehen ist, ist die RPN ein wenig aussagekräftiges Tool um Risiken zu bestimmen⁷¹.

Des Weiteren können unterschiedliche Werte für die gleich gewichteten Variablen S,O und D dieselbe RPN ergeben, wobei deren Auswirkungen der vorhandenen Risiken völlig unterschiedlich sein können. Dies impliziert eine Verschwendung von Ressourcen und in manchen Fällen können risikoreiche Ausfälle unbemerkt bleiben⁷². Dennoch ist diese Berechnungsmethode in der Praxis gängig und somit wird diese auch bei den in Kapitel 3 folgenden FMECA Simulationen verwendet.

- **Subjektivität:**

Subjektive Einschätzungen der Teammitglieder können ganze FMEA Analysen nichtig machen und für Unsicherheit sorgen⁷³. Ebenso sind die in den Tabellen 2.1, 2.2 und 2.3 einzuordnenden Kriterien mit linguale Expressionen wie *very high*, *likely* oder *likely* beschrieben⁷⁴.

- **Weitere Gründe:**

Die direkten und indirekten Gründe von Fehlern werden nicht verlinkt und systematisch aufgebaut. Des Weiteren werden nur die 3 Faktoren S, O und D hinsichtlich der Sicherheit und der Risikoberechnung herangezogen, obwohl es viele weitere Variablen geben würde. Die RPN kann weiters nicht zur Wichtigkeit von korrektiven Maßnahmen herangezogen werden, sondern bezieht sich einzig und allein auf das Risiko⁷⁵. Abbildung 2.19 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Shortcomings, welche bei der Erstellung der FMEA in Betracht gezogen werden sollten und in der Literatur aufgegriffen wurden⁷⁶.

⁷¹Werdich, 2012, S. 52

⁷²Liu, 2016, S. 10

⁷³Liu et al., 2016, S. 1028

⁷⁴Liu, 2016, S. 11

⁷⁵Liu, 2016, S. 11

⁷⁶Liu et al., 2013, S. 831

Shortcomings	Literature	Total number
The relative importance among O, S and D is not taken into consideration	Wang et al. (2009b), Chin et al. (2009a, 2009b), Liu et al. (2011, 2012), Gargama and Chaturvedi (2011), Kutlu and Ekmekçioglu (2012), Zhang and Chu (2011), Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003a, 2003b), Sharma et al. (2005, 2007a, 2007b, 2007c, 2007d, 2008a, 2008b, 2008c), Sharma and Sharma (2012, 2010), Chang and Cheng (2011, 2010), Chang and Wen (2010), Chang et al. (2010, 1999, 2001), Seyed-Hosseini et al. (2006), Tay and Lim (2010, 2006a), Keskin and Zkan (2009), Pillay and Wang (2003), Bowles and Peláez (1995), von Ahsen (2008), Carmignani (2009), Xiao et al. (2011), Franceschini and Galetto (2001), Nepal et al. (2008), Sankar and Prabhu (2001), Zammori and Gabbrielli (2011), Abdelgawad and Fayek (2010), Shahin (2004), Puente et al. (2002), Garcia et al. (2005), Chang and Sun (2009)	45
Different combinations of O, S and D may produce exactly the same value of RPN, but their hidden risk implications may be totally different	Wang et al. (2009b), Chin et al. (2009a, 2009b), Liu et al. (2011, 2012), Gargama and Chaturvedi (2011), Kutlu and Ekmekçioglu (2012), Zhang and Chu (2011), Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003b), Sharma et al. (2005, 2007a, 2007b, 2007c, 2007d, 2008a, 2008b, 2008c), Sharma and Sharma (2012, 2010), Tay and Lim (2010, 2006a), Keskin and Zkan (2009), Pillay and Wang (2003), Chen (2007), von Ahsen (2008), Carmignani (2009), Franceschini and Galetto (2001), Chang et al. (1999, 2001), Shahin (2004), Puente et al. (2002), Chang and Sun (2009)	33
The three risk factors are difficult to be precisely evaluated	Wang et al. (2009b), Chin et al. (2009a, 2009b), Liu et al. (2011, 2012), Gargama and Chaturvedi (2011), Kutlu and Ekmekçioglu (2012), Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003a, 2003b), Sharma et al. (2005), Chang et al. (2010), Xu et al. (2002), Braglia (2000), Yang et al. (2011), Chen and Ko (2009a, 2009b), Zammori and Gabbrielli (2011), Abdelgawad and Fayek (2010), Garcia et al. (2005)	21
The mathematical formula for calculating RPN is questionable and debatable	Chin et al. (2009a, 2009b), Liu et al. (2011, 2012), Gargama and Chaturvedi (2011), Kutlu and Ekmekçioglu (2012), Braglia et al. (2003a, 2003b), Geum et al. (2011), Chang et al. (1999, 2001), Puente et al. (2002), Ben-Daya and Raouf (1996), Gilchrist (1993)	14
The conversion of scores is different for the three risk factors	Chin et al. (2009b), Liu et al. (2011), Braglia et al. (2003a, 2003b), Chen (2007), von Ahsen (2008), Carmignani (2009), Chang et al. (1999, 2001), Sankar and Prabhu (2001), Puente et al. (2002), Ben-Daya and Raouf (1996), Gilchrist (1993)	13
The RPN cannot be used to measure the effectiveness of corrective actions	Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003b, 2007), Pillay and Wang (2003), Chen (2007), Carmignani (2009), Chang et al. (1999, 2001), Shahin (2004), Puente et al. (2002), Ben-Daya and Raouf (1996), Gilchrist (1993)	12
RPNs are not continuous with many holes	Liu et al. (2012), Chang and Cheng (2011, 2010), Chang et al. (2010), Chang (2009), Keskin and Zkan (2009), Carmignani (2009), Franceschini and Galetto (2001), Garcia et al. (2005), Chang and Sun (2009)	10
Interdependencies among various failure modes and effects are not taken into account	Xu et al. (2002), Chin et al. (2008), Braglia et al. (2007), von Ahsen (2008), Carmignani (2009), Nepal et al. (2008), Zammori and Gabbrielli (2011), Shahin (2004), Chang and Sun (2009), Gandhi and Agrawal (1992)	10
The mathematical form adopted for calculating the RPN is strongly sensitive to variations in risk factor evaluations	Chin et al. (2009b), Liu et al. (2011, 2012), Gargama and Chaturvedi (2011), Kutlu and Ekmekçioglu (2012), Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003a, 2003b), Chang (2009)	9
The RPN elements have many duplicate numbers	Gargama and Chaturvedi (2011), Chang and Cheng (2011, 2010), Chang et al. (2010), Chang (2009), Seyed-Hosseini et al. (2006), Sankar and Prabhu (2001), Garcia et al. (2005), Chang and Sun (2009)	9
The RPN considers only three risk factors mainly in terms of safety	Chin et al. (2009b), Liu et al. (2011), Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003a, 2003b), Chang and Cheng (2010), Braglia (2000), Carmignani (2009), Zammori and Gabbrielli (2011)	9

Abb. 2.19: FMEA Shortcomings (Liu et al., 2013, S. 838)

Die Literatur offenbart alternative Bewertungsmethoden, welche für die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen als besser betrachtet werden. Diese sind zum Beispiel die *Priorisierung mit individuellen Grenzwerten*, die Verwendung von *Risikomatrizen* und das einfache Anschreiben der Variablen ohne Multiplikation SOE^{77} .

⁷⁷Werdich, 2012, S. 54

2.2 FMECA

2.2.1 Definition

„*FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) is an engineering analysis and a core activity performed by reliability engineers to review the effects of probable failure modes of components and assemblies of the system on system performance.*“⁷⁸

FMECA ist eine der am weitesten verbreiteten Methoden im modernen Engineering, um potenzielle Fehlermodi und deren Schweregrad im System zu untersuchen.⁷⁹ Die Fehler können vor der Auslieferung gefunden und in Verbesserungsmaßnahmen umgewandelt werden. Während des Prozesses wird das Design verbessert, um womögliche Konstruktionsfehler zu beseitigen oder zu reduzieren. In der Regel wird der FMECA-Prozess und das Produktdesign zur gleichen Zeit und so früh wie möglich durchgeführt um zukünftige Fehlerkosten zu verhindern⁸⁰. Die Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA) ähnelt der bereits behandelten Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse im Kapitel 2.1 auf S.15 mit einer Ausnahme: Sie fügt eine Berechnung oder Bewertung der Kritikalität hinzu.⁸¹

FMECA besitzt neben den erwähnten Eigenschaften nachfolgende Aufgaben⁸²:

- FMECA dokumentiert alle wahrscheinlichen Fehler in einem System innerhalb der festgelegten Grundregeln.
- FMECA bestimmt durch eine Fehlermodusanalyse die Auswirkung jedes Fehlers auf den Systembetrieb.
- FMECA identifiziert einzelne Fehlerpunkte.
- FMECA ordnet jeden Fehler gemäß einer Schweregradklassifizierung des Fehlereffekts ein.

Es existieren 2 verschiedene Arten von FMECA: *Quantitative FMECA* und *Qualitative FMECA*. Beide sind in der FMEA Vorgangsweise ident, sodass der einzige Unterschied bei der kritischen Analyse vollzogen wird. Während die qualitative FMECA eine qualitative kritische Analyse vorlebt, wird bei der quantitativen FMECA eine quantitative kritische Analyse verwendet⁸³.

Die FMECA muss wie schon bei der FMEA erwähnt, von einem Team und/oder einem Zuverlässigkeitsingenieur durchgeführt werden. Die Aufgaben eines Zuverlässigkeitsingenieurs sind breit gestreut. Technische Systeme umfassen im Allgemeinen eine Reihe von Teilsystemen und Komponenten, die so miteinander verbunden sind, dass das System eine Reihe erforderlicher Funktionen ausführen kann. Aufgrund der Komplexität der Systemstruktur mit seriellen, parallelen und überbrückten Verbindungen sind einige Subsysteme oder Komponenten kritischer als die anderen. Das Hauptanliegen eines Zuverlässigkeitsingenieurs besteht darin, potentielle Fehler zu identifizieren, bewerten und das Auftreten dieser Fehler zu verhindern. Um schwerwiegende Ausfälle zu vermeiden, sind für jede Komponente geeignete Inspektions- und Wartungsmaßnahmen

⁷⁸Luthra, 1991, S. 235

⁷⁹Yun-Seong et al., 2011, S. 2364

⁸⁰Liqing et al., 2016, S. 2

⁸¹Carlson, 2012, S. 285

⁸²Benjamin, 1991, S. 260

⁸³Carlson, 2012, S. 287

erforderlich, welche vom Zuverlässigkeitsingenieur geleitet werden⁸⁴.

Schlussendlich kann zusammengefasst werden, dass die Failure Modes, Effects and Criticality Analysis eine Kombination der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse und der Criticality Analysis ist, welches ein Verfahren ist, bei dem jeder potenzielle Fehlermodus durch den Einfluss von Schweregrad und Eintrittswahrscheinlichkeit eingestuft wird⁸⁵.

2.2.2 Warum FMECA?

Da die FMECA eine Erweiterung der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse ist, bestehen für die grundsätzliche Vorgangsweise dieselben Gründe, wie schon in Kapitel 2.1.2 zuvor beschrieben. Die Ergänzung der kritischen Analyse (CA) wird in den nächsten Sätzen jedoch genauer erläutert, um die Ursachen festzustellen, weshalb eine Ausdehnung für nötig erachtet schien.

Die kritische Analyse liefert eine explizite Betrachtung kritischer Fehler und eine quantitative oder qualitative Analyse der Risikominimierung. Sie kann zur genaueren Identifikation von kritischen Teilbereichen eines Systems verwendet werden. Die FMECA ist gekennzeichnet durch⁸⁶:

- Eine besondere Untersuchung besonders risikoreicher Komponenten, Bauteile und/oder Prozesse.
- Eine Ausrichtung auf hochkomplexe Systeme, welche mit der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse alleine nicht betrachtet werden können.

2.2.3 Historie

Wie die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse hat auch FMECA ihre Ursprünge im US Militär. 1949 wurden die ersten Anwendungsregeln definiert und als Militär Standard *Mil-Std-1629* festgelegt⁸⁷.

Mitte der 1960er wurde FMECA für das Apollo Raumfahrtprogramm der NASA genutzt. Ebenso wurde in diesem Zeitraum FMECA von vielen akademischen Instituten behandelt und analysiert. In den 1980er schaffte FMECA den Sprung in die Mikroelektronik Industrie und erreichte somit die Privatwirtschaft. Ab den 1990er setzte sich FMECA auch in der Automobilindustrie durch⁸⁸.

2.2.4 Vorgehensweise

Mit Hilfe dem MIL-STD-1629A, dem bekanntesten FMECA-Standard, wird für die Durchführung der FMECA das Flussdiagramm in 2.20 empfohlen. FMECA kann in zwei Verfahren unterteilt werden: Fehlermöglichkeitsanalyse (FMEA) und kritische Analyse (CA). Bei der FMEA wird ein Verfahren durchgeführt, das die Identifizierung der Funktion des Systems, die Analyse für jeden potenziellen Fehlermodus und die Bewertung des Schweregrads umfasst, um die Auswirkungen auf das System zu bestimmen und um die Fehlermodi nach ihrem Schweregrad zu klassifizieren. In der CA werden basierend auf den Ergebnissen der FMEA die Fehlermodi analysiert, um festzustellen, wie stark sie sich auf das System auswirken. Dies wird durch die Ausfallrate der Komponente, der Ausfalleffektwahrscheinlichkeit α und des Ausfallmodusverhältnisses β

⁸⁴Yun-Seong et al., 2011, S. 2364

⁸⁵Jackson und Warren, 1995, S. 66

⁸⁶Nollau und Neumeier, 2010, S. 167,169

⁸⁷Illiashenko und Babeshko, 2012, S. 276

⁸⁸Chen et al., 2012, S. 276

bestimmt. Die Ausfallwahrscheinlichkeit bedeutet eine bedingte Wahrscheinlichkeit, dass der Ausfalleffekt eines Ausfallmodus zu einem Komponentenausfall führt, unter der Voraussetzung, dass der Ausfallmodus auftritt. Bei dem Ausfallmodusverhältnis handelt es sich um den Anteil der Ausfallrate in Bezug auf den jeweiligen Ausfallmodus⁸⁹.

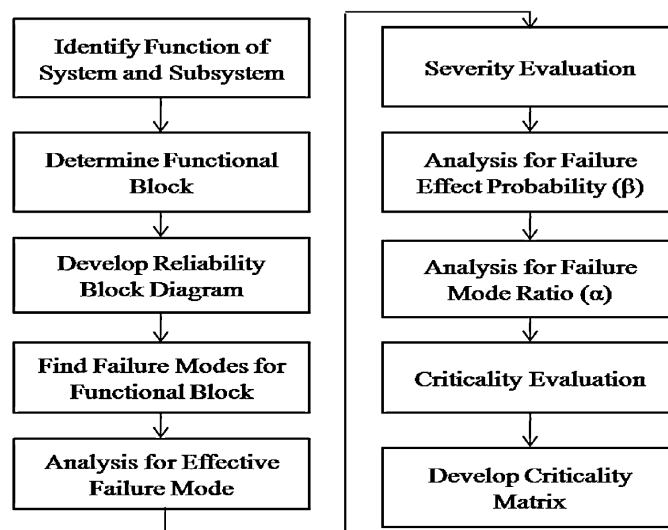


Abb. 2.20: Vorgehensweise der traditionellen FMECA MIL-STD-1629A (Yun-Seong et al., 2011, S. 2365)

Die ersten Anwendungsregeln von FMECA wurden vom US-Verteidigungsministerium zum Militärstandard erklärt. Heutzutage wird das FMECA-Verfahren durch eine Vielzahl internationaler, nationaler, Unternehmensstandards und anderer normativer Dokumente geregelt⁹⁰.

Eine andere Ansatzweise wird vom SAE (Society of Automotive Engineers) getragen. Dieser FMECA-Standard trägt wesentlich dazu bei, FMECA mit modernen Designpraktiken in Einklang zu bringen. Dies wird durch drei wesentlichen Säulen erreicht⁹¹:

1. Die neue Norm beschreibt das FMECA-Verfahren als einen Prozess, der während des gesamten Produktentwicklungszyklus anzuwenden ist, und nicht als eine Aufgabe, die nach Abschluss des Entwurfs durchgeführt werden muss. Es wird die Rolle von funktionalen und Schnittstellen-FMECAs sowie die des traditionellen Teil-FMECA hervorgehoben.
2. Das Konzept der „Fehlermodus-Äquivalenz“ ermöglicht die gemeinsame Analyse von Fehlermodi mit gleichwertigen Auswirkungen und reduziert einen Großteil der Duplikationsarbeit, die bei herkömmlichen Fehleranalysen von Komponente zu Komponente anfällt. Mit diesem Konzept können die zu Beginn des Konstruktionsprozesses durchgeführten Analysen funktionaler Fehlermodi auf die Auswirkungen von Schnittstellen- und Teilefehlermodi übertragen werden, die später in der Konstruktion analysiert werden.
3. Die kritische Komponente wird anhand eines Pareto-Ranking-Verfahrens bewertet, das auf der Wahrscheinlichkeit und der Schwere des Fehlermodus basiert.

⁸⁹Yun-Seong et al., 2011, S. 2364f

⁹⁰Illiashenko und Babeshko, 2012, S. 276

⁹¹Bowles, 1998, S. 48

Wie eingangs erwähnt kann zwischen der qualitativen und der quantitativen FMECA unterschieden werden. Nachfolgend wird die Vorgangsweise für eben diese näher erläutert⁹²:

- **Quantitative FMECA**

Um die quantitative kritische Analyse durchzuführen, sind eine Serie an Kalkulationen zu bestimmen, welche in den folgenden 5 Schritten evaluiert und mit einem Beispiel unterstrichen werden:

1. **Calculate the Expected Failures λt for Each Item:**

Im ersten Schritt muss die Anzahl der erwarteten Fehler anhand einer Wahrscheinlichkeitsanalyse bestimmt werden. Es stellt sich hierbei die Frage, wie zuverlässig ein System, Bauteil und/oder Prozess ist und wie oft es unter bestimmten Umständen ausfällt. Die Dauer für die Berechnung ist meist die angestrebte Lebens- oder Nutzungsdauer des Produkts. Falls von einer exponentiellen Verteilung ausgegangen wird, werden die erwarteten Ausfälle durch die Multiplikation der Ausfallrate (λ) mit der Zeit (t) berechnet. Bei anderen Verteilungen werden unterschiedliche Berechnungsmethoden angewandt. Die Wahl der Verteilung muss der Realität entsprechen und erfordert meist eine intensive Betrachtung.

2. **Identify the Mode Ratio of Unreliability α for Each Potential Failure Mode:**

Jedem potentiellen Fehlermodus muss nun eine prozentuale Fehlerwahrscheinlichkeit zugeordnet werden, welche aussagt, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Produkt, Bauteil oder und/oder der Prozess ausfällt. Der Gesamtprozentsatz aller identifizierten Fehler mit deren Wahrscheinlichkeiten muss 100% ergeben. Die Einschätzung kann aus Test- oder Felddaten, aus ähnlichen Bauteilen, einem technischen Urteil oder Bibliotheken wie der MIL-HDBK-338B basieren. Die Findung dieser Werte ist mit Vorsicht zu genießen und sollte keine leichtfertige Best-Guess Entscheidung sein.

3. **Rate the Probability of Loss β That Will Result from Each Failure Mode That Will Occur:**

Im dritten Schritt ist es an der Zeit die Wahrscheinlichkeit anzugeben, dass ein Ausfall des analysierten Elements einen Systemausfall führt. Tabelle 2.6 gibt die Richtlinien nach MIL-STD 1629A wieder, um die Verlustwahrscheinlichkeit der Kritikalitätsberechnung anzugeben.

Failure effect	β Value
Actual Loss	100%
Probable Loss	from >10% to <100%
Possible Loss	from >0% to <10%
None	0

Tab. 2.6: Probability of Loss (US Military, 1980, S. 102-3)

4. **Calculate the Mode Criticality C_m for Each Potential Failure Mode:**

Nun ist es an der Zeit, die Kritikalität jedes einzelnen potentiellen Fehlermodus zu berechnen. Dies wird mit der nachfolgenden Formel bewerkstelligt:

⁹²Carlson, 2012, S. 287-296

$$\text{Mode Criticality} = \text{Expected Failures} \cdot \text{Unreliability Mode Ratio} \cdot \text{Loss Probability} \quad (2.5)$$

$$C_m = \lambda t \cdot \alpha \cdot \beta \quad (2.6)$$

5. Calculate the Item Criticality for Each Item:

Schlussendlich wird für jedes Item die Kritikalität angegeben, indem man die jeweiligen Mode Criticalities aus dem vorherigen Punkt aufsummiert:

$$\text{Item Criticality} = \sum \text{of all Mode Criticalities} \quad (2.7)$$

Abbildung 2.21 zeigt ein typisches Worksheet einer quantitativen FMECA, welches dem Militärstandard MIL-STD-1629A entnommen wurde und Abbildung 2.22 gibt ein Praxisbeispiel einer quantitativen kritischen Analyse an.

MIL-STD-1629A

CRITICALITY ANALYSIS

SYSTEM _____ DATE _____
 IDENTIFY LEVEL _____ SHEET _____ OF _____
 REFERENCE DRAWING _____ COMPILED BY _____
 MISSION _____ APPROVED BY _____

IDENTIFICATION NUMBER	ITEM/FUNCTIONAL IDENTIFICATION (NOMENCLATURE)	FUNCTION	FAILURE MODES AND CAUSES	MISSION PHASE/ OPERATIONAL MODE	SEVERITY CLASS.	FAILURE PROBABILITY FAILURE RATE DATA SOURCE	FAILURE EFFECT PROBABILITY (β)	FAILURE MODE RATIO (α)	FAILURE RATE (λ_p)	OPERATING TIME (t)	FAILURE MODE CRIT # $C_m \beta \alpha p$	ITEM CRIT # $C_r = \sum (C_m)$	REMARKS

Abb. 2.21: Beispiel eines Worksheets einer quantitativen kritischen Analyse (Defense, 1980, S. 102-6)

ITEMS	OPERATING TIME (hours)	EXPECTED FAILURES	FUNCTIONS	FAILURES AND CAUSES	RATIO OF UNRELIABILITY	PROBABILITY OF LOSS	MODE CRITICALITY	ITEM CRITICALITY
Brake Pad	5475	0.548	The brake pads provide the primary means of friction between the force of the brake caliper against the front and rear wheel in order to bring the wheel to a controlled stop. The pads needs to be adjustable on the brake caliper by bicycle operator and durable in all operating conditions for the life of the bicycle.	Excessive wear of pad material - Wrong pad material selected	0.85	0.75	0.349	0.361
				Pad material cracks - Pad material cured at incorrect temperature	0.15	0.15	0.012	

TRUNCATED

Abb. 2.22: Beispiel eines einer quantitativen kritischen Analyse (Carlson, 2012, S. 290)

- **Qualitative FMECA**

Die qualitative kritische Analyse ist bei weitem nicht so aufwändig wie die eben gelistete quantitative kritische Analyse. Durch eine Einschätzung mit Vergleichstabellen und einer Kritikalitätsmatrix wird die qualitative kritische Analyse in den nachfolgenden 3 Schritten erläutert:

1. **Rate the severity of the potential effects of failure:**

Um die Schwere einzelner potentieller Fehlereffekte zu bestimmen, wird die nachfolgende Tabelle 2.7 verwendet.

Severity Classification		
Category	Severity	Criteria
I	Catastrophic	A failure that may cause death or system loss.
II	Critical	A failure that may cause severe injury, major property damage, or major system damage which will result in mission loss.
III	Marginal	A failure that may cause minor injury, minor property damage, or minor system damage which will result in delay or loss of availability or mission degradation.
IV	Minor	A failure that is not serious enough to cause injury, property damage, or system damage, but will result in unscheduled maintenance or repair.

Tab. 2.7: Severity Classification (Carlson, 2012, S. 291)

2. **Rate the likelihood of occurrence for each potential failure mode:**

Um die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Fehlers zu bestimmen, wird ebenfalls eine an den Militärstandards 1629A angelehnte Tabelle 2.8 verwendet.

Failure Probability		
Level	Failure Probability	Criteria
A	Frequent	A high probability of occurrence during the item operating time interval. Frequent may be defined as a single failure mode probability greater than 0.20 of the overall probability of failure during the item operating time interval.
B	Reasonably Probable	A moderate probability of occurrence during the item operating time interval. Reasonably probable may be defined as a single failure mode probability of occurrence which is more than 0.10 but less than 0.20 of the overall probability of failure during the item operating time.
C	Occasional	An occasional probability of occurrence during item operating time interval. Occasional probability may be defined as a single failure mode probability of occurrence which is more than 0.01 but less than 0.10 of the overall probability of failure during the item operating time.
D	Remote	An unlikely probability of occurrence during item operating time interval. Remote probability may be defined as a single failure mode probability of occurrence which is more than 0.001 but less than 0.01 of the overall probability of failure during the item operating time.
E	Extremely Unlikely	A failure whose probability of occurrence is essentially zero during item operating time interval. Extremely unlikely may be defined as a single failure mode probability of occurrence which is less than 0.001 of the overall probability of failure during the item operating time.

Tab. 2.8: Failure Probability (Carlson, 2012, S. 291)

3. Compare failure modes using a criticality matrix:

Schlussendlich werden die 2 eben gefundenen Parameter in eine Kritikalitätsmatrix eingetragen, um die Fehler mit deren Schweregraden und Auftretenswahrscheinlichkeiten zu visualisieren. Abbildung 2.23 zeigt das Beispiel einer Kritikalitätsmatrix einer Radbremse und Abbildung 2.24 gibt das Worksheet einer qualitativen kritischen Analyse wieder.

Wie auch schon bei der FMEA, sollen obgleich der Verwendung des qualitativen oder quantitativen Ansatzes, empfohlene Maßnahmen direkt evaluiert und umgesetzt werden, um potentielle Fehler, deren Ursachen und Kosten zu vermeiden.

A				
B				Excessive wear
C				
D		Cracking		
E				
	IV	III	II	I

Severity Category

Increasing Criticality

Abb. 2.23: Kritikalitätsmatrix anhand einer Radbremse (Carlson, 2012, S. 294)

ITEM	FUNCTION	FAILURE MODES AND CAUSES	FAILURE EFFECTS			SEVERITY CLASS	FAILURE DETECTION METHOD	COMPENSATING PROVISIONS
			LOCAL EFFECTS	NEXT HIGHER LEVEL	END EFFECTS			
Brake Pads	The brake pads provide the primary means of friction between the force of the brake caliper against front and rear wheel in order to bring the wheel to a controlled stop. The pads need to be adjustable on the brake caliper by bicycle operator and durable in all operating conditions for the life of the bicycle.	Excessive wear of pad material	The brake pad does not provide adequate and controlled friction to the wheel.	Wheel does not slow adequately down when brake lever pulled	The bicycle does not stop in the required distance potentially causing an accident	Category I - Catastrophic	Bicycle brake testing procedure #1234	1. Add new brake pad durability test 2. Select new brake material with better durability
		Wrong pad material selected	Pad provides erratic friction against wheel	Wheel motion chugs during stopping maneuver	Bicycle operator dissatisfied with bicycle operation			
		Pad material cracks Pad material cured at incorrect temperature				Category III - Marginal	No detection provided until owner discovers problem	1. Revise pad material curing procedure to ensure no cracking

TRUNCATED

Abb. 2.24: Beispiel eines einer qualitativen kritischen Analyse (Carlson, 2012, S. 293)

2.2.5 Tools

Da die FMEA ein Teil der FMECA ist, können und sollten alle in Kapitel 2.1.5 gelisteten und beschriebenen Werkzeuge der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse ebenfalls für die FMECA angewandt werden.

Zur Beurteilung der Fehlerverteilung der kritischen Analyse können verschiedene statistische Werke herangezogen werden, welche hier nicht im Detail behandelt werden.

2.2.6 Shortcomings

Die grundsätzlichen FMEA Probleme welche in Kapitel 2.1.6 beschrieben sind, können wie schon öfters erwähnt, auch für die FMECA übernommen werden, da die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse ein Teil der Failure Modes, Effects and Criticality Analysis ist.

2.3 Simulationssoftware RAM-Commander

Die in Kapitel 3 analysierten FMECAs werden mit dem von A.L.D. Ltd. programmierten Softwareprogramm RAM-Commander simuliert. A.L.D. (Advanced Logistics Development) ist eines der weltweit größten Dienstleister für Zuverlässigkeit, Sicherheit und Qualität. Seit 1984 ist das Unternehmen in drei Hauptaktivitäten tätig⁹³:

- Reliability, Safety and Quality Professional Services
- RAMS, FRACAS, ILS and LCC Software Development
- Quality, Reliability, Safety Training

Neben der Erstellung von Design- und Prozess FMEAs und FMECAs ermöglicht das Simulationsprogramm RAM-Commander ebenfalls eine Fehlerbaumanalyse⁹⁴.

⁹³Ltd., 2019, S. 2

⁹⁴Happel et al., 2014, S. 22,

Kapitel 3

Implementation FMECA

In order to ensure the international applicability of the FMECAs and the relevant information occurring therein, the English language is used below.

This chapter presents FMECAs of various components of a single stage tail rotor gearbox of Bölkow Bo 105 helicopter, which is a light helicopter of the German manufacturer Messerschmitt-Bölkow-Blohm (now owned by Airbus Helicopters). The Bo 105 was designed 1961 in its first version and completed 1969 its first test flight. What followed was a success story in which 300 customers worldwide purchased a total of around 1,400 machines. The Bo 105 has made a name for itself above all because of its versatility, robustness and reliability. The special rotor of the Bo 105 helped to achieve the high agility and maneuverability for which it is still known today. As a true multi-purpose helicopter, the Bo 105 was successfully used in air rescue, as police and military helicopters as well as for passenger and goods transport. The largest customer was the German Bundeswehr with over 200 aircrafts, in where some of them remained in service until December 2016. Overall, the Bo 105 fleet worldwide flew more than eight million flight hours¹.

The FMECAs have been conducted to the best knowledge and belief and are available to the international community. The goal is to put the simulations under constant change so that all relevant parties can access the FMECAs and add their knowledge and insights. Ultimately, this constant adaptation should result in product improvement, to eliminate unnecessary costs and to save human lives.

To perform the FMECAs in a professional manner, the tools described in chapter 2.1.5 are used. For this purpose, first General Analysis tools (Chapter 3.1) in the form of *System Structure*, *Function Assignment* and *Interface Matrix* are used, which apply to all analyzed components. Thereafter, the individual components are analyzed separately with FMECA (Chapter 3.2). To support this, the tools already described in the theoretical part are also used. To avoid redundancy, not all tools are used for each component.

3.1 General Analysis

As just mentioned, this chapter will take a closer look at the general methods of analysis used to describe the system and the boundaries.

3.1.1 System Structure

By means of system structuring, the helicopter is subdivided into subsystems, subsystems, etc., which is achieved through a top-down approach. The structure tree is shown in figure 3.1.

¹Aerokurier, 2017

Figure 3.2 also provides an aid to visually identify the systems and subsystems occurring in system structuring.

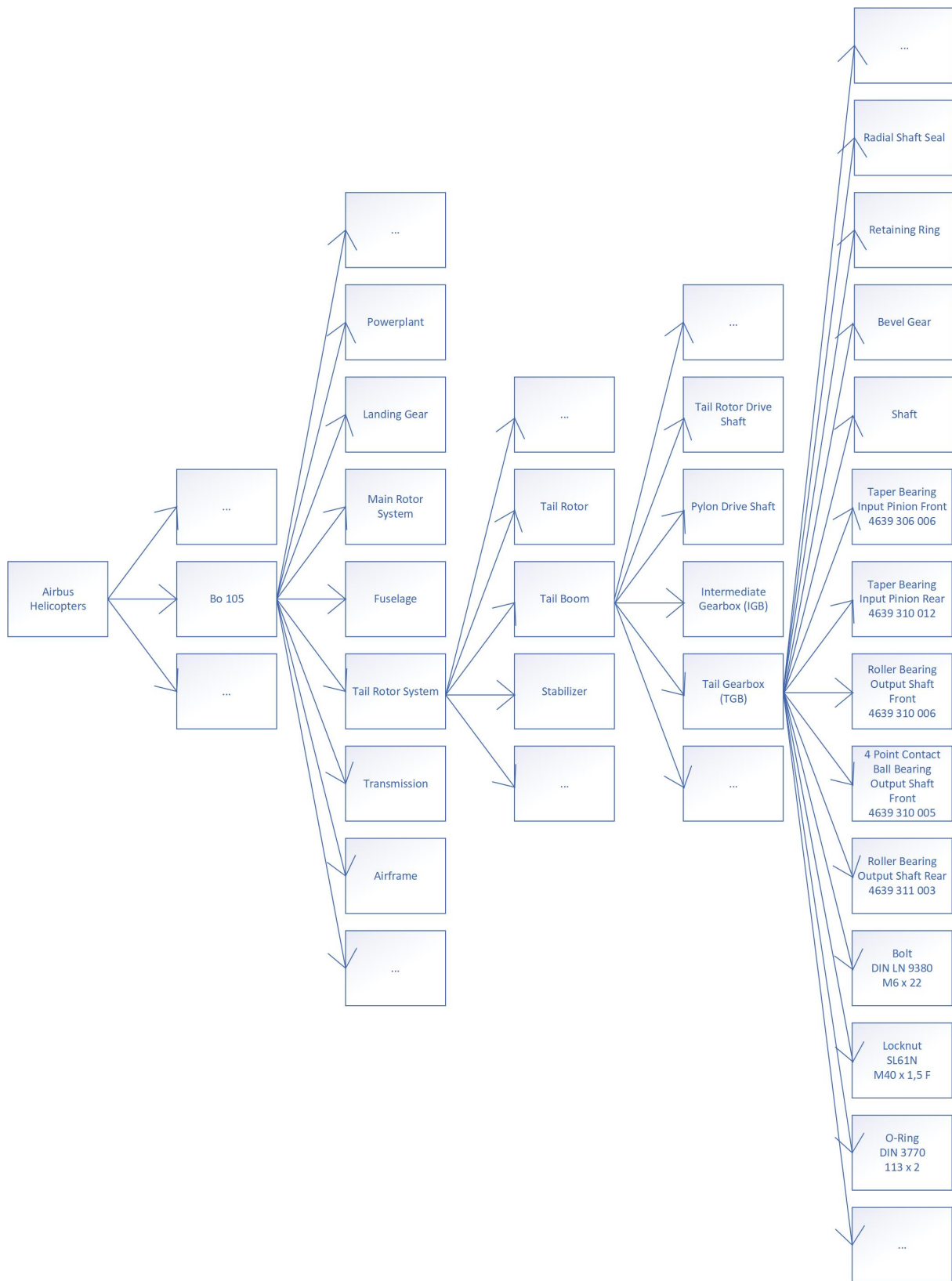


Abb. 3.1: System Structure Bo 105

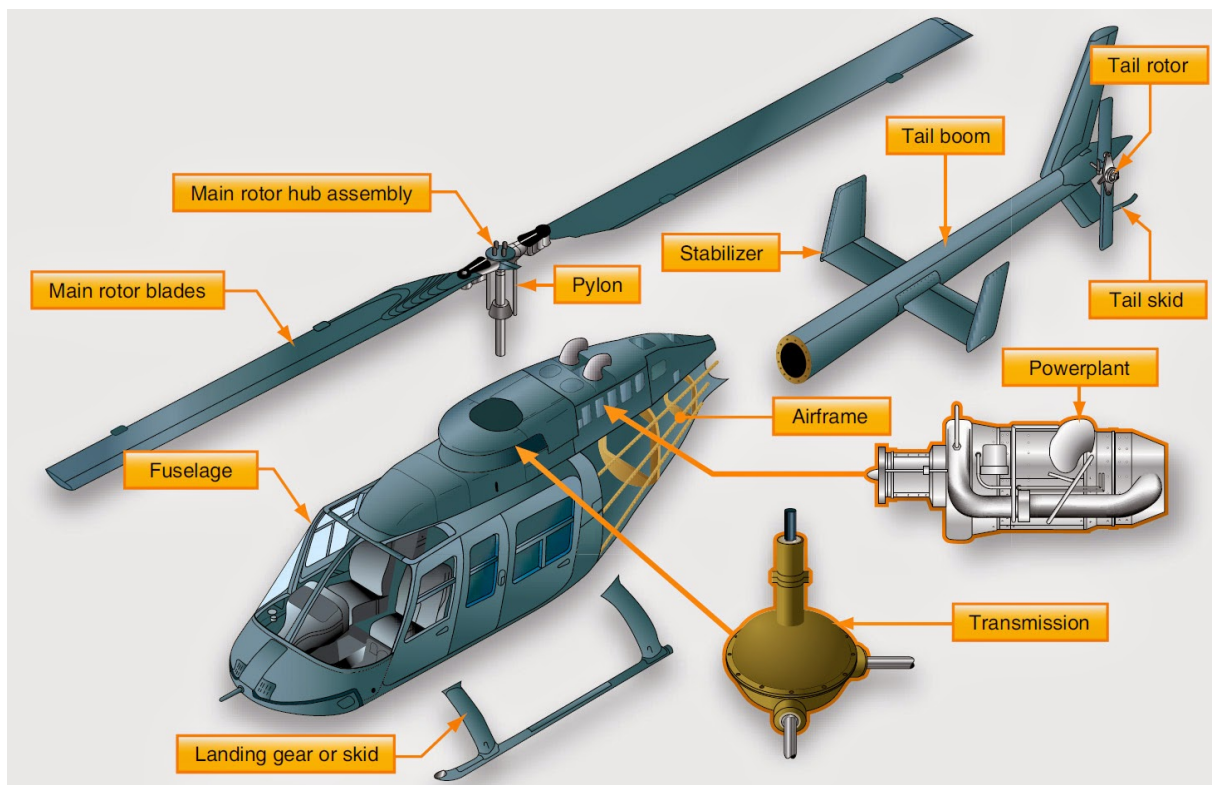


Abb. 3.2: System Structure Helicopter (Aeronautics, 2017)

3.1.2 Function Assignment

With the function assignment, the functions of the respective systems, subsystems etc. are assigned to the just visualized structure tree in Kapitel 3.1.1. It is therefore clear which functions each component possesses. This is a prerequisite for further analysis.

3.1.3 Interface Matrix

The interface matrix describes the relationships of the components of the Tail Gearbox to each other. Figure 3.4 illustrates the existing interfaces and indicates their relationship. An interface is a point, area, or process where two adjacent subsystems meet.

Tail Gearbox (TGB) Interface-Matrix		1.1 Beveal Gear	1.2 Shafts	1.3 Taper Bearing Input Pinion Front	1.4 Taper Bearing Input Pinion Rear	1.5 Roller Bearing Output Shaft Front	1.6 4 Point Contact Ball Bearing Output Shaft Front	1.7 Roller Bearing Output Shaft Rear	1.8 Bolt DIN LN 9380	1.9 Locknut SL61N	1.10 O-Ring DIN 7330	1.11 Retaining Ring	1.12 Radial Shaft Seal
		1.1 Beveal Gear	1.2 Shafts	1.3 Taper Bearing Input Pinion Front	1.4 Taper Bearing Input Pinion Rear	1.5 Roller Bearing Output Shaft Front	1.6 4 Point Contact Ball Bearing Output Shaft Front	1.7 Roller Bearing Output Shaft Rear	1.8 Bolt DIN LN 9380	1.9 Locknut SL61N	1.10 O-Ring DIN 7330	1.11 Retaining Ring	1.12 Radial Shaft Seal
1.1 Beveal Gear		P, E											
1.2 Shafts			P	P	P	P	P						
1.3 Taper Bearing Input Pinion Front													
1.4 Taper Bearing Input Pinion Rear													
1.5 Roller Bearing Output Shaft Front							P			P		P	
1.6 4 Point Contact Ball Bearing Output Shaft Front													
1.7 Roller Bearing Output Shaft Rear												P	
1.8 Bolt DIN LN 9380													
1.9 Locknut SL61N													
1.10 O-Ring DIN 7330													
1.11 Retaining Ring													
1.12 Radial Shaft Seal													
Interface Type:		Physical (P) Material Exchange (M) Energy Transfer (E) Data Exchange (D)											
Funtional Necessity:		Must be present (1) Must not be present (2)											

Abb. 3.4: Interface Matrix TGB

3.2 FMECA_s

In this chapter, the individual components are analyzed with the tools described in the theory section, to detect failures and causes and to use a structured procedure. Then the FMECA_s are presented for the respective components. In each FMECA_s, one or possibly two positions are highlighted. These potential failures, even after considering the recommended actions, have the highest risk priority number (RPN) and should be handled with particular attention. Furthermore, the qualitative critical analysis (CA) of the failure modes are given to ensure that the failure modes are ranked in terms of severity of the potential effects of failure and the likelihood of occurrence of the failure.

3.2.1 Bearing

Bearings have the function to support and constrain relative motion to only the desired motion against each other movable components. Subsequently, the FMEA formsheet will be used to identify and perform an failure analysis. The second subchapter shows the results of the FMCEA.

3.2.1.1 FMEA Formsheet

System	Helicopter Bo105		
	Ensures a secure transport of passengers and goods		
	Helicopter rotates unintentionally	Tail rotor gives to less performance	Tail rotor gearbox has high vibrations

Subsystem	Tail Gearbox		
	To transfer the power to the tail rotor		
	Tail rotor gives to less performance	Tail rotor gearbox has high vibrations	Tail rotor gearbox has high mechanical friction

Subsystem	Output Shaft		
	Directs the power to the tail rotor		
	Tail rotor gearbox has high vibrations	Tail rotor gearbox has high mechanical friction	Roller Bearing Front has high vibrations

Component	Roller Bearing Front		
	Supports and constrains relative motion against each other movable components		
	Tail rotor gearbox has high mechanical friction	Roller Bearing Front has high vibrations	Too high operating temperature

Abb. 3.5: FMEA Formsheet Bearing TGB

3.2.1.2 FMECA Bearing

FMEA										Qualitative FMECA					
Part name	Potential Failure	Potential Effect	SEV	Potential Cause	OCC	Current Controls	DET	RPN	Recommended Actions	SEV	OCC	DET	RPN	Severity of the potential effects of failure	Likelihood of occurrence of failure
Roller Bearing	Potential Failure Bearing cage break	Total gearbox failure	10	Relaxation of the mating As a result of wear	6	Visual inspection	5	300	-Use of solid cages instead of sheet metal cages	7	3	5	105		
				Rivet break Assembly damage Tilt Vibrations	5	Visual inspection	5	250	-Use of solid cages instead of sheet metal cages	7	3	5	105		
				Rapidly changing axial loads Permitted rotation speed exceeded	1	20	Do not exceed the kinematically permissible rotation speed	6	60	Avoid changing axial loads as much as possible	8	1	6	I	D
				Too high torque load	2	Visual inspection	1	20	Do not exceed the permissible torque load	8	1	1	8		
	Crater	Lifespan reduction	6	Current flashover	2	Visual inspection	6	72	For electric welding power do not lead through the bearing	1	1	6	6	III	D
	Slippage tracks on rolling elements	Lifespan reduction	3	Too little load	5	Visual inspection	5	75	Use bearing with lower load capacity ->Preload bearing ->Lower bearing clearance	2	3	5	30		
	Too high operating temperature	Lifespan reduction	6	Lack of lubrication Tension of the bearing	3	Visual inspection	5	45	Increase lubrication	2	2	5	20	III	C
				Too tight fits and tolerances	7	Temperature control	7	294	Reduce radial, axial and oval tension	4	3	7	84		
				Too high prestressing	5	Temperature control	7	210	Use right fits for the bearing	4	3	7	84	III	C
				Shaft deflection	4	Temperature control	7	210	Use right prestressing for conditions	4	3	7	84		
				Classic fatigue	10	Temperature control	2	120	Use bearings with higher lifespan	3	2	7	42	III	C
				Over- and Underloading	2	Temperature control	5	60	Use right working conditions	2	1	5	10		
				Unsuitable lubricant	2	Temperature control	4	48	Use the right lubricant for the desired conditions	4	1	4	16	III	C
				Lack of lubricant	3	Temperature control	2	36	Increase lubricant	4	2	2	16		
				Overlubrication	2	Temperature control	3	36	Reduce lubricant	4	1	3	12	III	C
				External heat	1	Temperature control	4	24	Protect against external heat ->Reduce external heat	3	1	4	12		
				High rotation speed	1	Temperature control	3	18	Reduce rotation speed	4	1	3	12	III	C
				Too weak fit	6	Temperature control	5	150	Use the right fits for the bearing	4	3	5	60		
	Too high vibrations	Lifespan reduction	5	Too little preload	5	Temperature control	5	150	Use the right preloads for the bearing	4	3	5	60	III	C
				Classic fatigue	10	Temperature control	2	120	Use bearings with higher lifespan	5	10	2	100		
				Contamination	6	Temperature control	3	108	Ensure lubricant cleanliness ->Clean assembly	4	4	3	48	III	C
				Wrong assembly method Birmelling from the rolling elements	3	Temperature control	5	60	Install according to manufacturer's instructions	5	1	5	25		
				Standstill corrosion	1	Temperature control	4	24	Use right lubrication	5	3	3	45	III	C
					1	Temperature control	4	24	Use right lubrication	5	1	4	20		

Abb. 3.6: FMECA Bearing TGB 1/4

Bearing cage damage	6	Wear due to contamination	4	Temperature control	6	144	>Clean assembly	5	2	6	60	II	D
		Wear due to lack of lubricant	2	Visual inspection	6	72	>Use the correct lubricant quantity	5	1	6	30		
		Wear due to high rotation speed	2	Temperature control	6	72	>Use the right rotation speed	5	1	6	30		
		Wear due to roll restriction	2	Temperature control	6	72	>Use other bearing cage type	5	2	6	60		
		Wear due to tilting	2	Temperature control	6	72	>Correct adjustment	5	2	6	60		
		Bearing clearance too low	3	Temperature control	5	90	>Use angle adjustable bearings or polyamide cages	5	2	6	60		
Damage due to overheating	6	Lack of lubrication	3	Temperature control	5	90	>Increase bearing clearance	5	2	5	50	II	D
		Too high bearing temperature	3	Temperature control	5	90	>Increase lubrication	5	2	5	50		
		Overlubrication	4	Temperature control	3	72	>See "Too high operating temperature"	4	2	3	24		
		Rotation inhibition by bearing cage breakage	2	Temperature control	5	60	>Decrease lubrication	4	1	5	20		
		Radial tension due to external heating	2	Temperature control	5	60	>Avoid cage break - see "Bearing cage break"	5	1	5	25		
		Micro-movements between fitted parts	2	Temperature control	4	48	>Sufficiently slow external heating or cooling	4	1	4	16		
Friction corrosion - fretting corrosion	7	Housing deformation	3	Visual inspection	9	504	>Provide floating bearing function on the ring with point load	4	4	9	144	III	B
		Shaft deflection	2	Visual inspection	6	126	>Make housing more rigid	5	2	6	60		
		Rotary movement between ring and shaft / housing	8	Visual inspection	4	160	>Use as tight as possible bearing fits	5	1	6	30		
		Fluctuating bearing moves stiff	5	Visual inspection	5	125	>Keep fitting surfaces dry	4	5	4	80		
		Too low axial fixation of the rings	6	Visual inspection	4	120	>Improve floating bearing function	4	4	5	80		
		Unsuitable construction	5	Visual inspection	6	150	>Keep fitting surfaces dry	3	3	4	36		
Uneven support of the bearing rings	5	Insufficient fixing of the bearings in the housing	4	Visual inspection	3	48	>Secure axial fixation	4	4	6	96	IV	D
		Strong contamination in gap	3	Visual inspection	3	36	>Modify parts constructively while ensuring even housing fit	4	4	6	96		
		Too high axial clearance	2	Visual inspection	3	24	>Use other bearing	3	2	3	18		
		Radial tension	3	Visual inspection	6	108	>Fix parts properly	3	2	3	18		
		Unsuitable construction	5	Visual inspection	6	150	>Ensure lubricant cleanliness	3	2	3	18		
		Radial tension	3	Visual inspection	6	108	>Check axial play and narrow if necessary	3	1	3	9		
Lateral rubbing marks	4	Radial tension	3	Visual inspection	6	108	>Increase bearing clearance	5	2	6	60	IV	C
		Unsuitable construction	5	Visual inspection	6	150	>Reduce temperature differences between inner and outer ring	5	2	6	60		
		Unsuitable construction	5	Visual inspection	6	150	>Improve lubricant supply	5	2	5	50		
		Unsuitable construction	5	Visual inspection	6	150	>Adjust the lubricant viscosity to the operating conditions	5	2	5	50		
		Unsuitable construction	5	Visual inspection	6	150	>Use lubricant with proven additives	5	2	5	50		
		Unsuitable construction	5	Visual inspection	6	150	>Use bearing parts with surface coating	5	2	5	50		
Marks on the rings (inner side)	6	Unsuitable construction	5	Visual inspection	6	150	>Improve sealing design	5	2	5	50	III	C
		Unsuitable construction	5	Visual inspection	6	150	>Clean assembly and well-washed components, possibly lacquer	5	2	5	50		
		Unsuitable construction	5	Visual inspection	6	150	>Rinse the entire oil system before putting it into operation	5	2	5	50		
		Unsuitable construction	5	Visual inspection	6	150	>Reduce different housing stiffness	5	2	6	60		
		Unsuitable construction	5	Visual inspection	6	150	>No use of non-round casing or shafts	5	2	6	60		
		Unsuitable construction	5	Visual inspection	6	150	>Check the fit and form accuracy of the parts	5	1	6	30		
Unsuitable construction	5	Visual inspection	6	150	>Change assembly and operating conditions	5	1	6	30				
Unsuitable construction	5	Visual inspection	6	150	>Use bearings with axial relocatability	5	1	6	30				

Abb. 3.7: FMECA Bearing TGB 2/4

Failure Mode	Lifespan reduction	Contamination of lubrication	5	Visual inspection	6	180	Shortening of the lubricant change periods						III	D	
							5	4	6	120					
Wear at rib contact	Lifespan reduction	Contamination of lubrication	6	5	Visual inspection	6	180	->Shortening of the lubricant change periods						III	D
								5	4	6	120				
Break of rib	Nearly total gearbox failure	Too high axial load	9	2	Visual inspection	5	90	->Improve sealing ->Filter lubricant ->Ensure high cleanliness ->Select suitable lubricant (Viscosity, EP additives) and en						I	D
								8	1	5	40				
Bearing cage damage due to improper installation	Nearly total gearbox failure	Incorrect bearing heating for assembly Unsuitable assembly equipment	8	7	Visual inspection	5	280	->Constructively ensure good rib support ->Observe installation instructions ->Reduce axial impacts						I	C
								7	6	5	210				
Pitting	Lifespan reduction	Insufficient lubrication Surface hardness	7	10	Visual inspection	6	430	->Use right heat treatment and material ->Recalculate permissible surface pressure						II	B
								6	3	5	90				
Fatigue due to foreign parts rollover	Lifespan reduction	Damage of the track, particularly dangerous are impressions of hard particles (boundary sand, abrasives)	8	8	Visual inspection	4	256	->Better lubricant, eg. with higher viscosity or additives ->Use right heat treatment and material ->Recalculate permissible surface pressure ->Thoroughly wash out housing parts, if necessary lacking ->Cleanliness and care during assembly ->Improvement of the seal ->Sauberkeit des Schmierstoffes ->Rinse with filtering before start						II	B
								7	4	5	140				

Abb. 3.9: FMECA Bearing TGB 4/4

3.2.2 Shaft

For the FMCEA of the shaft, a potential failure mode was analyzed using the 5 Whys method. For this purpose, by questioning *Why* 5 times the failure mode is accurately detected and its causes are uncovered. In addition to this presentation of the 5 Whys method, the FMECA of the shaft is given below.

3.2.2.1 5 Whys

Whys	Questions/Answers
1	Why can the shaft break?
	Because a crack has spread around a notch and ultimately leads to breakage.
2	Why spread the crack around a notch?
	Because of stress peaks due to the notch effect.
3	Why do stress peaks due to the notch effect occur?
	Because if notches are designed too small.
4	Why are the notches designed too small?
	Because in the calculation of notches the dimension size was calculated.
5	Why has this dimension size been calculated?
	Because an failure occurred in the calculation of DIN 743.

Tab. 3.1: 5 Whys Shaft TGB

3.2.2.2 FMECA Shaft

Part name	Potential Failure	Potential Effect	SEV	Potential Cause	FMEA					Qualitative FMECA					
					OCC	Current Controls	DET	RPN	Recommended Actions	SEV	OCC	DET	RPN	Severity of the potential effects of failure	Likelihood of occurrence of failure
Shaft	Crack at a notch	Nearly total gearbox failure	8	Inclusions in shaft, e.g. shrinkages	7	Visual inspection	7	392	>Use high quality shafts >Cleanliness in the manufacturing process	7	6	7	294	I	B
					6	Visual inspection	6	286	>Avoid notches in construction design >Design bigger notches in construction >Recalculate DIN 743 >Polish surfaces	8	5	6	240		
	Too high vibrations	Nearly total gearbox failure	8	Eccentricities	7	Unbalance measurement	7	392	>Use high quality shafts >Make shaft more rigid	7	5	7	245	II	C
					8	Visual inspection	6	394	>See "FMECA Bearing"	5	5	6	150		
					5	Visual inspection	6	240	>Use shafts with higher lifespan	8	3	6	144		
					7	Visual inspection	4	224	>Use tight bearing fits >Use the right lubricant for the desired conditions	6	5	4	120		
					9	Vibration control	3	216	>Rapid passage through critical rotation speed	4	2	3	24		
					2	Visual inspection	4	64	>Use right lubrication	6	2	4	48		
					4	Temperature control	7	252	>Reduce vibrations	4	4	7	112		
	Too high operating temperature	Lifespan reduction	6	Shaft deflection	7	Temperature control	7	168	>Use more rigid shafts	3	2	7	42	II	C
					5	Temperature control	5	150	>Use the right lubricant for the desired conditions	5	4	5	100		
					3	Temperature control	3	36	>Use right rotation speed	4	1	3	12		
	Corrosion due to moisture or aggressive fluids/gases	Lifespan reduction	7	External heat	4	Temperature control	4	24	>Reduce external heat >Protect against external heat	3	1	4	12	III	D
					10	Visual inspection	5	350	>Reduce temperature fluctuations	5	9	5	225		
					8	Visual inspection	5	280	>Suitable storage according to the regulations of the roll	6	4	5	120		
6					Visual inspection	6	252	>Improvement of the sealing	6	5	6	180			
4					Visual inspection	4	112	>Prevent water inlet	4	3	4	48			
3					Visual inspection	5	105	>Use of lubricant with corrosion protection additives	5	2	5	50			
8					Visual inspection	9	504	>Provide floating bearing function on the ring with point to point	4	4	9	144			
2					Visual inspection	6	84	>Make shaft more rigid	5	1	6	30			
8					Visual inspection	4	160	>Use as tight as possible bearing fits >Keep fitting surfaces dry	4	5	4	80			
Scuff marks or sliding wear					Lifespan reduction	5	Rotary movement between bearing ring and shaft	5	Visual inspection	5	125	>Improve loading bearing function >Keep fitting surfaces dry	4		
	6	Visual inspection	4	120				>Increase axial contact surfaces for the bearings >Secure axial fixation of the bearings >Keep fitting surfaces dry	3	3	4	36			
	6	Visual inspection	4	120				>Increase axial contact surfaces for the bearings >Secure axial fixation of the bearings >Keep fitting surfaces dry	3	3	4	36			

Abb. 3.10: FMECA Shaft TGB 1/3

Failure Mode	Cause	Effect	Wrong assembly method	Inspection	Prevention	Detection	Mitigation	Severity			Risk	
								7	6	5		
Damages on shaft	Lifespan reduction	Wrong assembly method	7	7 Visual Inspection	6 294	>Assemble according to manufacturer's instructions	7	6 252	6 6	6 210	C	
			6	6 Visual Inspection	6 252	>Assemble according to manufacturer's instructions	7	5 6	5 6	5 6	B	
			7	9 Visual Inspection	5 315	>Clean assembly >Assemble according to manufacturer's instructions	6	8 5	8 5	8 5	240	B
Contamination of the gearbox	Lifespan reduction	Wrong assembly method	7	4 Visual Inspection	4 112	>Use high quality shafts >Sufficient dimensioning of the shaft	6	3 4	4 72	4 72	B	
			8	7 Vibration control	8 560	>Recalculation of DIN 743 >Use the right materials for the desired condition >Reduce number of load changes (oscillations) >Use dampings >Apply residual compressive stresses in the material surface	10	6 8	8 480	6 8	480	B
Eruptions of small particles	Lifespan reduction	Wrong assembly method	7	10 Visual Inspection	4 400	>Polish surfaces >Apply residual compressive stresses in the material surface >Avoid inclusions in shaft, e.g. shrinkages >Use the right materials for the desired condition >Recalculation of DIN 743	5	10 4	4 200	4 200	D	
			10	9 Visual Inspection	4 360	>Sufficient dimensioning on the shaft >Apply residual compressive stresses in the material surface >Use the right materials for the desired condition >Polish surfaces >Recalculation of DIN 743	7	8 4	4 224	8 4	224	D
Fatigue breakage	Total gearbox failure	Cracks on shaft	10	7 Vibration control	4 280	>Recalculation of DIN 743 >Use the right materials for the desired condition >Apply residual compressive stresses in the material surface >Sufficient dimensioning of the shaft	8	6 4	4 192	6 4	192	D
			7	7 Vibration control	4 280	>Recalculation of DIN 743 >Use the right materials for the desired condition >Apply residual compressive stresses in the material surface >Sufficient dimensioning of the shaft	8	6 4	4 192	6 4	192	D
			4	4 Vibration control	6 240	>Use the right materials for the desired condition >Reduce high amplitudes >Apply residual compressive stresses in the material surface	9	3 5	5 135	3 5	135	D

Abb. 3.11: FMECA Shaft TGB 2/3

3.2.3 Bevel Gear

By creating an Ishikawa diagram, the causes of potential failure modes of the bevel gear can be found. Similarly, causes of causes etc., could be discovered which leads to the detection of all origins of potential failure modes.

3.2.3.1 Ishikawa-Diagramm

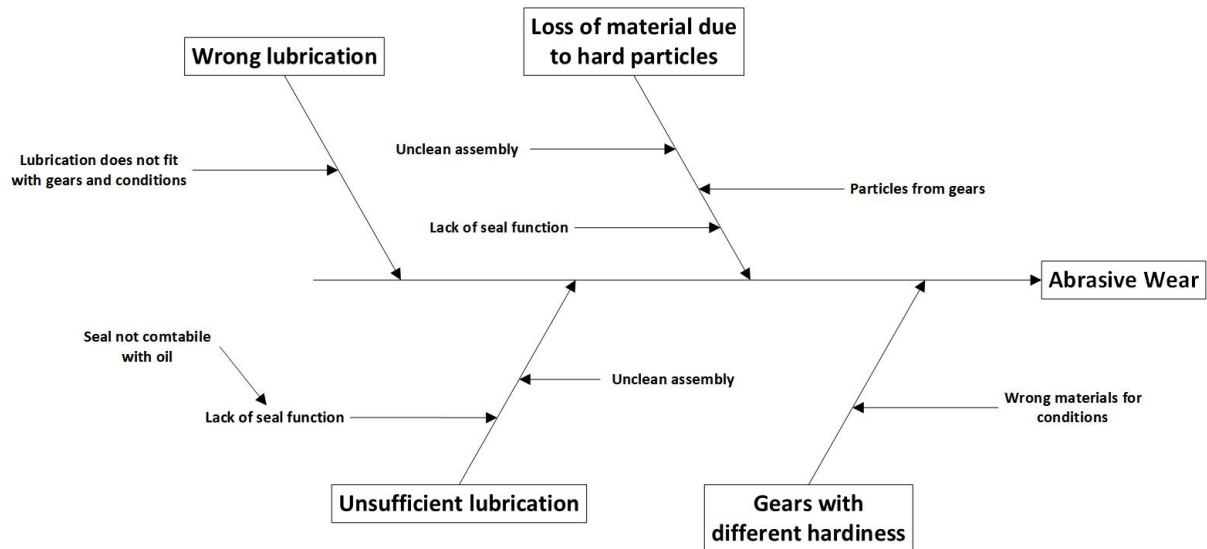


Abb. 3.13: Ishikawa-Diagramm Bevel Gear TGB

3.2.3.2 FMECA Bevel Gear

Part name Bevel Gear	FMEA										Qualitative FMECA			
	Potential Failure	Potential Effect	SEV	Potential Cause	OCC	Current Controls	DET	RPN	Recommended Actions	SEV	OCC	DET	RPN	Severity of the potential effects of failure
Adhesive wear	Lifespan reduction	7	High surface pressure	6	Visual inspection	6	252	-Recalculate the calculations ->Use wear-resisting surfaces	6	5	6	180	II	B
			Insufficient lubrication	4	Visual inspection	5	140	-Use the right lubricant for the desired conditions	5	3	5	75		
			Particles in lubrication	9	Visual inspection	6	378	-Ensure cleanliness in lubrication ->Renew lubrication in shorter intervals	5	6	6	180		
			Loss of material due to hard particles	8	Taber Abraser	6	336	-Ensure cleanliness in the gearbox ->Use wear-resisting surfaces	6	7	6	252		
			Lack of seal function	4	Visual inspection	5	140	-Renew seals in shorter intervals	6	2	5	60		
			Unclean assembly	4	Visual inspection	4	112	-Ensure clean assembly	6	3	4	72		
			Insufficient lubrication	4	Visual inspection	4	112	-Use the right lubricant for the desired conditions	5	3	4	60		
			Gears with different hardness	7	Visual inspection	1	49	-Use gears with same hardness	4	3	1	12		
			Improper storage in the warehouse	6	Visual inspection	4	168	-Suitable storage according to the regulations manufacturer	6	3	4	72		
			Failure of the seals	4	Visual inspection	5	140	-New sealing	5	3	5	75		
Corrosive wear	Lifespan reduction	7	Unsuitable lubricant	4	Visual inspection	4	140	-Use of lubricant with corrosion protection additives	5	4	4	80	II	C
			Chemical action of the lubrication	3	Visual inspection	6	126	-Proper assembly	5	2	6	60		
			Strong temperature fluctuations (condensation)	10	Temperature control	1	70	-Reduce temperature fluctuations	6	7	1	42		
			Micro-movements between bevel gear and shaft	6	Visual inspection	6	384	-Protect against heat or cold ->Use right fits between bevel gear and shaft	7	6	6	252		
			Too low fit clearances	8	Visual inspection	6	288	-Use tight fits between bevel gear and shaft	7	4	6	168		
			Lack of lubrication	4	Visual inspection	5	160	-Ensure sufficient lubrication	6	3	5	90		
			Repeated loading of tooth surface	10	Visual inspection	6	540	-Recalculate permissible surface pressure with DIN 3990 ->Use right heat treatment and material	9	9	6	486		
			Surface hardness	8	Visual inspection	5	360	-Recalculate permissible surface pressure with DIN 3990 ->Use better lubricant, eg. with higher viscosity or additive	8	7	5	280		
			Insufficient lubrication	4	Visual inspection	5	180	-Use gears with higher hardness ->Use high quality gears	8	4	5	160		
			Rolling fatigue	9	Visual inspection	5	360	-Use gears for the desired conditions	7	7	5	245		
Pitting	Lifespan reduction	9	Too high load	6	Visual inspection	7	336	-Recalculate DIN 3990	7	4	7	196	I	B
			Wrong design	4	Visual inspection	8	256	-Design gears for desired conditions	5	3	8	120		
			Oscillation	7	Vibration control	4	224	-Use dampings ->Use the right materials and design for the desired condition	7	6	4	168		
			Insufficient lubrication	4	Visual inspection	5	160	-Improve lubricant supply ->Adjust the lubricant viscosity to the operating conditions	5	3	5	75		
			Unsuitable lubrication	5	Visual inspection	5	160	-Use lubricant with proven additives ->Renew lubrication within shorter intervals	5	3	5	75		
			Current flashover	3	Visual inspection	5	120	-Do not lead welding power through gears	6	2	5	60		

Abb. 3.14: FMECA Bevel Gear TGB 1/2

Spalling	Nearly total gearbox failure	9	Unfavorable contact pattern	7	Contact pattern check	5	315	>Change contact pattern to desired conditions	8	5	5	200	I	C
			Wrong design	5	Visual inspection	6	270	>Design gears for desired conditions	8	4	6	192		
Overheat	Lifespan reduction	7	Friction corrosion - fretting corrosion	6	Too high load	5	270	>Design gears for desired conditions >Recalculate DIN 3990	7	3	5	105	II	D
					Insufficient lubrication	4	144	>Improve lubricant supply >Adjust the lubricant viscosity to the operating conditions >Use lubricant with proven additives	7	3	4	84		
Cavitation	Lifespan reduction	7	Lack of lubrication	4	Too much friction heat	6	252	>Ensure sufficient lubrication >Recalculate DIN 3990	5	4	6	120	III	D
					High oil temperature	5	175	>Cool oil temperature >Use lubricant with proven additives	5	4	6	120		
Current flashover	Lifespan reduction	7	Oscillation	4	Friction corrosion - fretting corrosion	6	210	>Ensure sufficient lubrication >Use lubricant with proven additives >Recalculate DIN 3990	6	5	5	150	I	C
					Insufficient lubrication	4	112	>Use lubricant with proven additives >Ensure sufficient lubrication	5	3	4	60		
Plastic deformation	Lifespan reduction	7	Welding power through gear	4	Lack of lubrication	4	112	>Use lubricant with proven additives >Ensure sufficient lubrication	5	3	4	60	II	D
					High oil temperature	5	175	>Cool oil temperature >Use lubricant with proven additives	5	4	6	120		
Cracks at tooth	Nearly total gearbox failure	8	Compressive stress	9	Oscillation	4	168	>Reduce oscillations >Use dampings	6	3	6	108	I	B
					Insufficient lubrication	4	112	>Use lubricant with proven additives >Ensure sufficient lubrication	6	3	4	72		
Fatigue tooth breakage	Total Gearbox Failure	10	Unfavorable contact pattern	6	Welding power through gear	4	112	>Do not lead welding power through gears	6	3	4	72	II	E
					Wrong design	5	175	>Use the right design for the desired conditions	5	3	5	75		
Overload tooth breakage	Total Gearbox Failure	10	Cracks at tooth	8	Impacts	5	175	>Prevent gears from impacts or shocks	6	3	5	90	I	C
					Gear not hard enough	4	112	>Increase hardness >Use harder gear materials	6	3	4	72		
Overload both breakage	Total Gearbox Failure	10	Cracks at tooth	8	Lack of lubrication	4	112	>Increase lubrication >Use high quality materials	6	3	4	72	I	C
					Material-related vulnerability	9	576	>Use materials for desired conditions >Recalculate DIN 3990	7	7	8	392		
Fatigue tooth breakage	Total Gearbox Failure	10	Cracks at tooth	8	Compressive stress	9	360	>See "Friction corrosion - fretting corrosion"	7	8	5	280	I	C
					Internal crack due to hydrogen embrittlement	6	288	>Prevent water inlet >Use lubricants with additives	7	5	6	210		
Overload both breakage	Total Gearbox Failure	10	Cracks at tooth	8	Cracks at tooth	8	640	>See "Cracks at tooth"	9	6	8	432	I	C
					Oscillations over long period	6	360	>Use dumping	10	5	6	300		
Overload both breakage	Total Gearbox Failure	10	Cracks at tooth	8	Unfavorable contact pattern	6	300	>Change contact pattern to desired conditions	10	4	5	200	I	C
					Cracks at tooth	8	640	>See "Cracks at tooth"	10	7	8	560		
Overload both breakage	Total Gearbox Failure	10	Cracks at tooth	8	Sudden high impact	4	240	>Prevent from impacts/shocks	10	3	6	180	I	C
					Sudden high impact	4	240	>Prevent from impacts/shocks	10	3	6	180		

Abb. 3.15: FMECA Bevel Gear TGB 2/2

3.2.4 Bolt

The Why-Step, as also with other tools already mentioned, can be used to find failure modes with the respective causes. This method is used below to get to the bottom of the failure mode of high oil loss and to find out that loosening of screws on the gear casing lid are the cause.

3.2.4.1 Why-Step

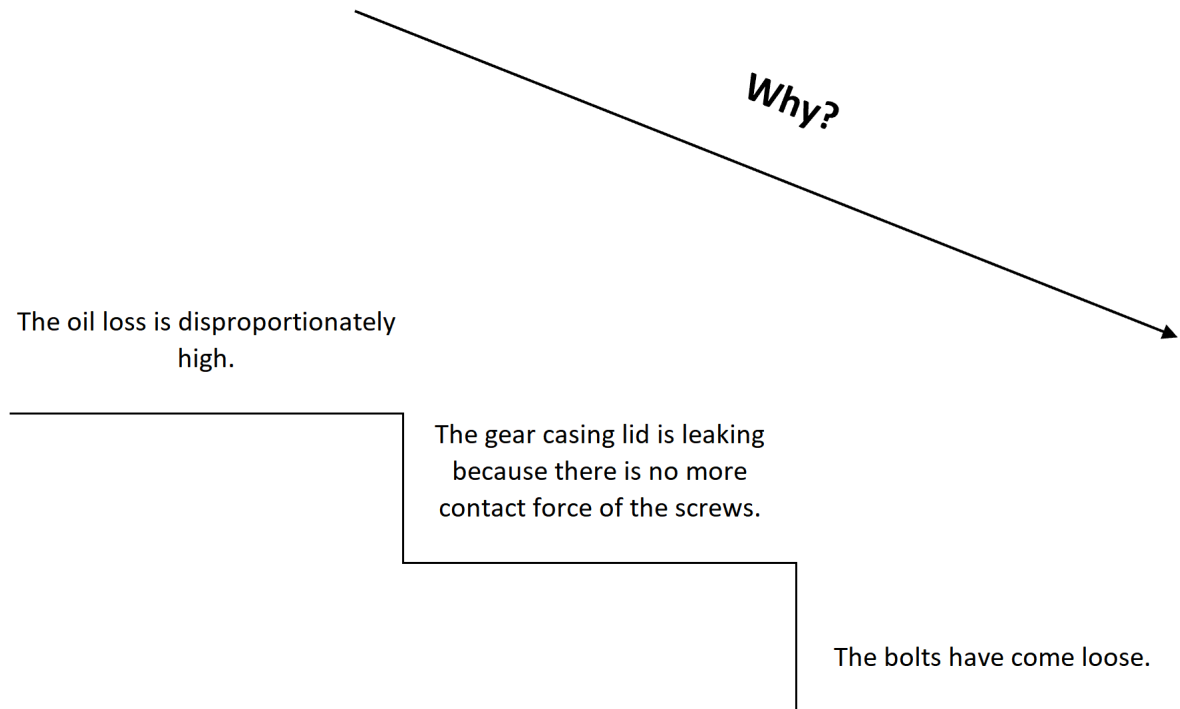


Abb. 3.16: Why-Step Bolt TGB

3.2.4.2 FMECA Bolt

FMEA														
Part name	Potential Failure	Potential Effect	SEV	Potential Cause	OCC	Current Controls	DET	RPN	Recommended Actions	SEV	OCC	DET	RPN	Qualitative FMECA
Bolts	Wrong assembly	Lifespan reduction	5	Wrong tightening torque Unclean assembly	8 7	Torque wrench Visual inspection	5 5	200 175	>Use torque wrench >Ensure assembly cleanliness	5 5	4 5	5 5	100 125	IV
	Loosening screws	Oil loss with subsequent failure of the gearbox	7	Wrong tightening torque Vibrations	8 7	Torque wrench Vibration control	5 5	280 245	>Use torque wrench >Secure against loosening >Reduce vibrations >Use dampers >Secure against loosening	7 6	4 5	5 5	140 150	II
	Corrosion	Lifespan reduction	5	Strong temperature fluctuations (condensation) Humidity, oxygen	10 9	Temperature control Visual inspection	4 4	200 180	>Use galvanized bolts >Use high quality bolts >Use galvanized bolts >Use high quality bolts	4 4	10 5	4 4	160 80	III
	Bolt breakage	Oil loss with subsequent failure of the gearbox	7	Improper storage in the warehouse Too high tightening torque Fatigue cracks Wrong strength category Strong impact Too high loads Shear	5 8 6 5 2	Visual inspection Torque wrench Visual inspection Visual inspection Visual inspection	4 5 6 5 4	100 280 252 175 70	>Suitable storage according to the regulations of the bolt's >Use torque wrench >Renew bolts in a shorter period >Recalculate bolt connection >Prevent against shocks >Use bolts with higher tear strength >Recalculate bolt connection	5 5 5 6 5	3 4 4 6 4	4 5 6 6 1	60 100 150 120 25	E

Abb. 3.17: FMECA Bolt TGB 1/1

3.2.5 O-Ring

With the help of the fault tree analysis potential failures and their causes are revealed. Incorrect assembly of an O-ring can cause significant failures, which must be considered more closely.

3.2.5.1 Fault-Tree-Analysis

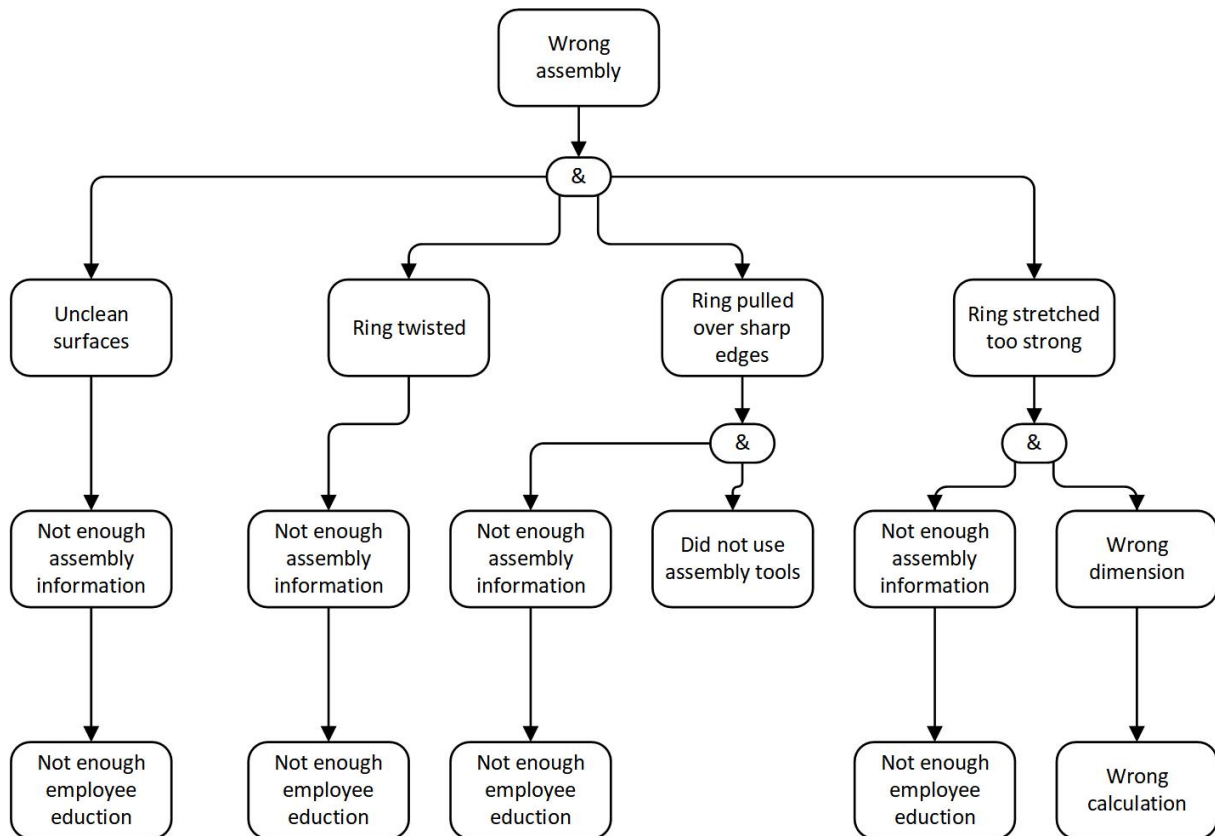


Abb. 3.18: Fault-Tree-Analysis O-Ring TGB

3.2.5.2 FMECA O-Ring

Part name O-Ring	FMEA										Qualitative FMECA				
	Potential Failure Oil not compatible with O-Ring	Potential Effect Failure of the O-ring with subsequent loss of seal function	SEV	Potential Cause Wrong oil compatibility	OCC	Current Controls Visual inspection	DET	RPN	Recommended Actions -Ensure oil compatibility	SEV	OCC	DET	RPN	Severity of the potential effects of failure	Likelihood of occurrence of failure
		Failure of the O-ring with subsequent loss of seal function	5	Wrong oil compatibility	4	Visual inspection	5	100	-Ensure oil compatibility	4	3	5	60	IV	D
		Failure of the O-ring with subsequent loss of seal function	5	Urethan surfaces Ring twisted and pulled over sharp edges Forgot about assembly lubricant	8	Visual inspection	5	200	-Ensure cleanliness on surfaces and allow the assembly -Using an assembly plastic cap -Use assembly lubricant	4	6	5	120	III	C
		Failure of the O-ring with subsequent loss of seal function	5	Ring stretched too strong (wrong dimensioning)	7	Visual inspection	4	120	-Ensure tight O-Ring dimension for desired conditions	3	3	4	36		
		Failure of the O-ring with subsequent loss of seal function	5	Crackling	5	Visual inspection	4	100	-Change O-Ring in shorter interval	4	4	4	64		
		Failure of the O-ring with subsequent loss of seal function	5	Embrittlement	4	Visual inspection	5	100	-Change O-Ring in shorter interval	4	3	5	60	III	D
		Failure of the O-ring with subsequent loss of seal function	5	Wrong operating temperature	4	Temperature control	4	80	-Use right O-Ring for desired operating temperature	4	3	4	48		
		Failure of the O-ring with subsequent loss of seal function	5	Too high permanent pressure forces	3	Visual inspection	6	90	-Use suitable O-Ring -Bigger gaps for O-Ring	4	2	6	48	III	D
		Failure of the O-ring with subsequent loss of seal function	5	The gas absorbed by the O-ring expands as the pressure drops	3	Visual inspection	7	105	-Use suitable O-Ring	4	2	7	56	III	D
		Failure of the O-ring with subsequent loss of seal function	5	The pressure difference presses exposed parts of the O-ring through the sealing gap	3	Visual inspection	7	105	-Use suitable O-Ring -Smaller gaps for O-Ring	4	2	7	56	III	D
		Failure of the O-ring with subsequent loss of seal function	5	Extern temperature cycles	10	Temperature control	4	200	-Protect against temperature cycles	4	8	4	128	III	A
		Failure of the O-ring with subsequent loss of seal function	5	Frictional heat at high-frequency vibrations	4	Vibration control	4	80	-Reduce vibrations -Use dampers	4	3	4	48		

Abb. 3.19: FMECA O-Ring TGB 1/1

3.2.6 Radial Shaft Seal

3.2.6.1 Failure-Consequences-Matrix

In order to be able to find all potential errors and failures, a structured procedure is indispensable. The failure-consequences matrix, which is divided into 6 different failure sources and in which all potential failures are entered, is used to support the analysis of the radial shaft seal.

Radial Shaft Seal		Possilbe failures		
		High leakage rate	Damaged sealing lip	High friction
Possible consequences	Actual component	Seal function not fulfilled	High friction	High temperature and loss of seal material
	Higher level assembly	Loss of oil	Loss of oil / damage of shaft	Loss of oil / damage of shaft
	System	Gearbox runs dry	Gearbox runs dry	Gearbox runs dry
	End product	Potential helicopter crash	Potential helicopter crash	Potential helicopter crash
	Customer	Potential loss of life	Potential loss of life	Potential loss of life
	Legal regulations	Safety Standards	Safety Standards	Safety Standards

Abb. 3.20: Failure-Consequences-Matrix Radial Shaft Seal TGB

3.2.6.2 FMECA Radial Shaft Seal

FMEA										Qualitative FMECA							
Part name	Potential Failure	Potential Effect	SEV	Potential Cause	OCC	Current Controls	DET	RPN	Recommended Actions	SEV	OCC	DET	RPN	Severity of the potential effects of failure	Likelihood of occurrence of failure		
Radial Shaft Seal	High leakage rate	Radial shaft seal failure with subsequent oil loss and malfunction of the gearbox	6	Pressing force of the sealing lip too low	5	Visual Inspection	6	180	>Check position of the pressure spring >Check force of the pressure spring	5	4	6	120				
			6	Damaged sealing lip	6	Visual Inspection	5	180	>Replace the seal	5	5	5	125				
			6	Overheating due to dry running of the sealing ring	4	Visual Inspection	4	Visual Inspection	6	144	>Check position of the pressure spring >Check force of the pressure spring >Use other radial shaft seal >Checking the seal installation direction >Check if oil mark is visible	4	3	6	72	II	B
			6	Incorrect installation of the radial shaft seal	5	Visual Inspection	4	Visual Inspection	4	120	>Checking the seal installation direction	4	3	4	48		
			6	Incorrect material of the sealing lip	3	Visual Inspection	6	Visual Inspection	6	108	>Use other radial shaft seal	5	2	6	60		
			6	Pressure drop too high	4	Oil pressure control	4	Oil pressure control	4	96	>Replace the seal	5	3	4	60		
	Damaged sealing	Radial shaft seal failure with subsequent oil loss and malfunction of the gearbox	6	Too rough sliding surface	3	Visual Inspection	5	90	>Polish the shaft surface	5	2	5	50				
			6	After replacement arranged in the same sealing lip running mark	5	Visual Inspection	3	90	>Do not arrange in the same running mark >Use bushing	4	4	3	48				
			6	Cracking in the sealing lip	4	Visual Inspection	6	Visual Inspection	6	144	>Replace the seal	5	3	6	90		
	High friction	Radial shaft seal failure with subsequent oil loss and malfunction of the gearbox	6	Wear of the sealing lip or change of the profile of the sealing lip	5	Visual Inspection	4	120	>Check position of the pressure spring >Check force of the pressure spring >Check for eccentricity >Check for abrasive particles in oil >Check for dry running >Lubricate the sealing lip during assembly	5	3	4	60	II	C		
			6	Aged or hardened sealing lip	4	Visual Inspection	4	96	>Replace the seal	5	3	4	60				
	Joule Effect	Radial shaft seal failure with subsequent oil loss and malfunction of the gearbox	6	Stick-slip-Effect	3	Visual Inspection	7	126	>Use correct sealing dimensions and material	5	2	126					
			6	Insufficient lubricating film	4	Visual Inspection	5	120	>Check quality of shaft surface >Check force of pressure spring	5	3	5	75	III	D		
	Damaged sealing lip	Radial shaft seal failure with subsequent oil loss and malfunction of the gearbox	6	Sealing ring installed with too high preload	5	Visual Inspection	6	180	>Use slightly bigger dimensions of the radial shaft seal	5	4	6	120	III	D		
			6	Wrong assembly	6	Visual Inspection	5	180	>Use assembly oil >Use assembly bushing	5	6	5	150	II	C		
6			Insufficient storage	6	Visual Inspection	5	180	>Ensure sufficient storage	5	5	5	125					

Abb. 3.21: FMECA Radial Shaft Seal TGB 1/1

3.2.7 Retaining Ring

Brainstorming can be used to identify and write down potential failure modes and their related causes. For this purpose every member of the team should write down their thoughts for themselves and then the results should be compared and discussed in a group. Subsequently, brainstorming is used for the failure detection of a retaining ring and afterwards the FMECA is presented.

3.2.7.1 Brainstorming

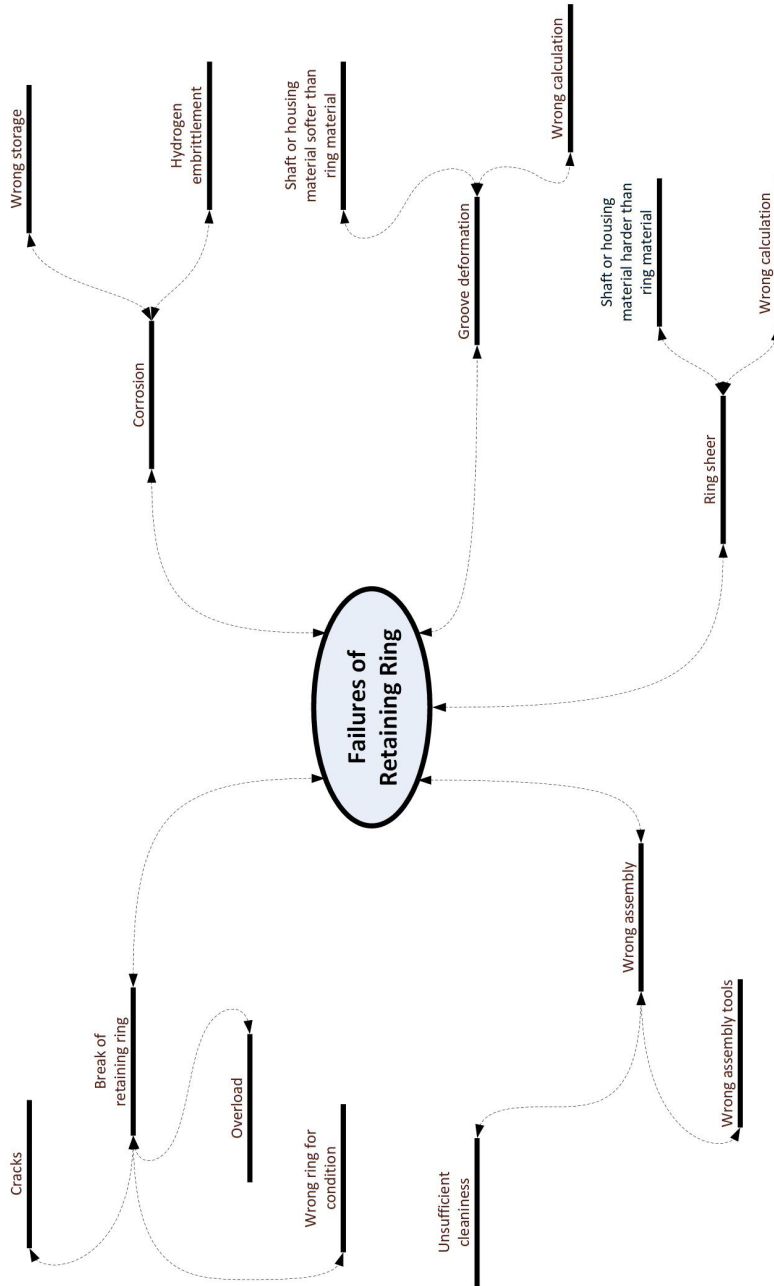


Abb. 3.22: Brainstorming Retaining Ring TGB

3.2.7.2 FMECA Retaining Ring

Part name	FMEA										Qualitative FMECA				
	Potential Failure	Potential Effect	SEV	Potential Cause	OCC	Current Controls	DET	RPN	Recommended Actions	SEV	OCC	DET	RPN	Severity of the potential effects of failure	Likelihood of occurrence of failure
Retaining Ring				Wrong assembly	7	Visual inspection	5	280	->Ensure right assembly	6	5	5	150		
				Cracks on retaining ring	4	Visual inspection	6	192	->Change retaining ring in shorter interval	7	2	6	84		
				Stress corrosion	4	Visual inspection	5	160	->Reduction of preload ->Prevent against oscillations	5	3	5	75		
				Fatigue breakage	5	Vibration control	4	160	->Use dampers ->Use right ring for desired conditions	6	4	4	96		
				Edge cracking	4	Visual inspection	5	160	->Too high axial load ->Check properties for desired conditions	7	3	5	105		
			8	Wrong retaining ring for condition	5	Visual inspection	4	160	->Check maximum rotation speed ->Recalculate groove deformation	7	4	4	112	II	D
				Groove deformation	4	Visual inspection	5	160	->Recalculate groove deformation	6	3	5	90		
				Ring shear	4	Visual inspection	5	160	->Recalculate ring shear	6	3	5	90		
				Overload breakage	4	Visual inspection	4	128	->Prevent against too high overloads ->Use right ring for desired conditions	7	3	4	84		
				Hydrogen embrittlement	3	Visual inspection	5	120	->Prevent water inlet	6	2	5	60		
				Wrong dimension	3	Visual inspection	3	72	->Use lubricants with additives ->Use right ring for desired conditions	6	2	3	36		
				Wrong storage	4	Visual inspection	4	96	->Suitable storage according to the manufacturer regulations ->Prevent water inlet	5	3	4	60	III	C
				Hydrogen embrittlement	3	Visual inspection	5	90	->Use lubricants with additives	6	2	5	60		
				Corrosion of the retaining ring	6	Lifespan reduction									
			Wrong assembly	6	Lifespan reduction										
			Groove deformation	8	Breakage with subsequent failure of the gearbox										
			Ring shear	6	Lifespan reduction										

Abb. 3.23: FMECA Retaining Ring TGB 1/1

3.2.8 Locknut

Finally, brainstorming is also used for the last component for failure finding. Afterwards the FMECA of the locknut can be obtained.

3.2.8.1 Brainstorming

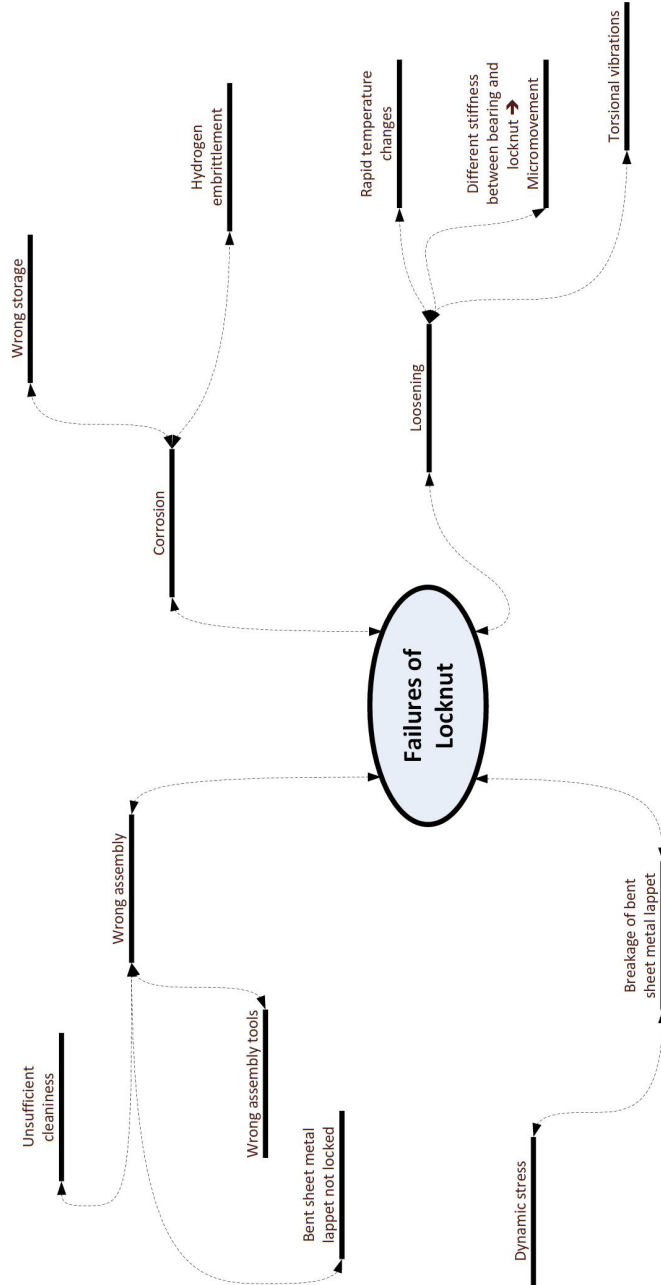


Abb. 3.24: Brainstorming Locknut TGB

3.2.8.2 FMECA Locknut

		FMEA										Qualitative FMECA				
Part name	Potential Failure	Potential Effect	SEV	Potential Cause	OCC	Current Controls	DET	RPN	Recommended Actions	SEV	OCC	DET	RPN	Severity of the potential effects of failure	Likelihood of occurrence of failure	
Locknut	Loosening locknut	Failure of the gearbox	8	Rapid temperature changes lead to a change in the tension	10	Temperature control	3	240	-Protect against rapid temperature changes -Reduce torsional vibrations -Use dampers	7	8	3	240	I	D	
	Breakage of the bent sheet metal lapped	Loosening locknut	7	Torsional vibrations on the shaft Heavily different stiffnesses between the bearing and the locknut enable micro-movements	5	Vibration inspection	5	200	-Use the same stiffnesses	6	4	5	120	I	D	
	Corrosion of the locknut	Lifespan reduction	6	Dynamic stress Hydrogen embrittlement Wrong storage	4	Visual inspection	4	128	-Use right locknut for desired conditions -Prevent water inlet	6	3	4	128	II	D	
	Wrong assembly	Lifespan reduction	Lifespan reduction	6	Uninsufficient cleanliness during assembly Wrong assembly tools Bent sheet metal lapped not locked	4	Visual inspection	5	120	-Suitable storage according to the manufacturer regulations -Ensure cleanliness all over the process and surfaces	4	3	5	60	III	C
						4	Visual inspection	5	120	-Use sufficient assembly tools according to the manufacturer -Ensure bent sheet metal lapped is locked	5	4	5	100	III	C
					4	Visual inspection	2	48		5	4	2	40			

Abb. 3.25: FMECA Locknut TGB 1/1

Kapitel 4

Analysis and Interpretation

4.1 Frequency Analysis

The frequency analysis evaluates the results of the performed FMECAs. For this purpose, the risk priority numbers (RPN) determined according to the recommended actions are classified and visualized with regards to frequency.

There is a clear tendency for the prevalence of lower risk priority numbers to predominate. Nevertheless, especially the higher risk quotient numbers are essential and must be observed with special consideration. These higher RPNs occur especially with the components Bearing, Shaft and Bevel Gear (Figure 4.1, 4.2, 4.3). The supposedly less important components such as Bolt, O-ring, Radial Shaft Seal, Retaining Ring and Locknut (Figure 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8), on the other hand, have lower risk priority numbers. Nevertheless, it should be noted that these components are also important and they should be given enough attention. The visualized evaluations are given below.

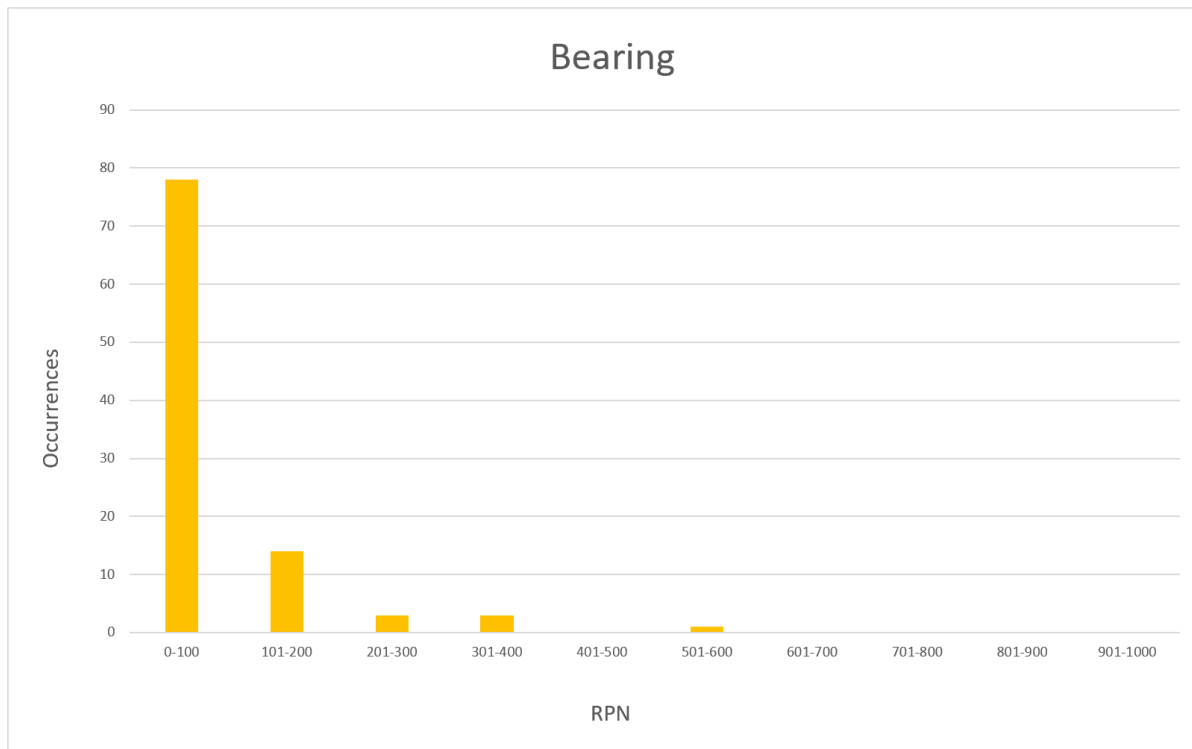


Abb. 4.1: Frequency Analysis Bearing TGB

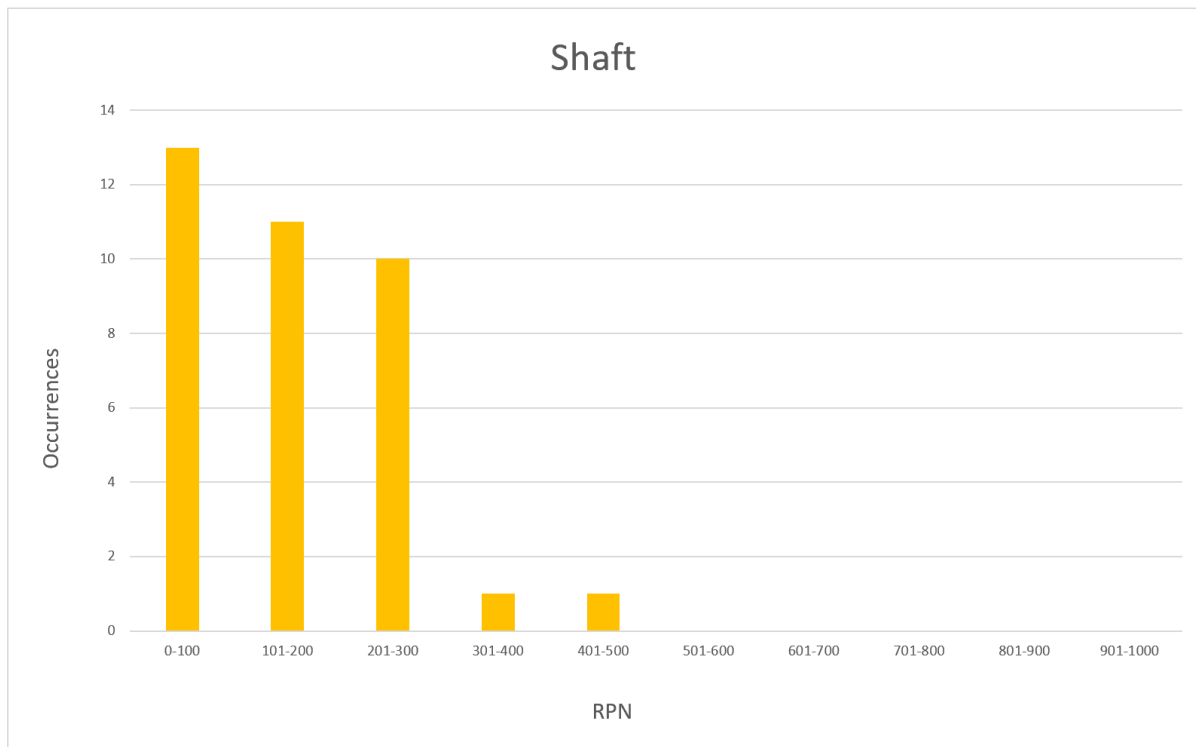


Abb. 4.2: Frequency Analysis Shaft TGB

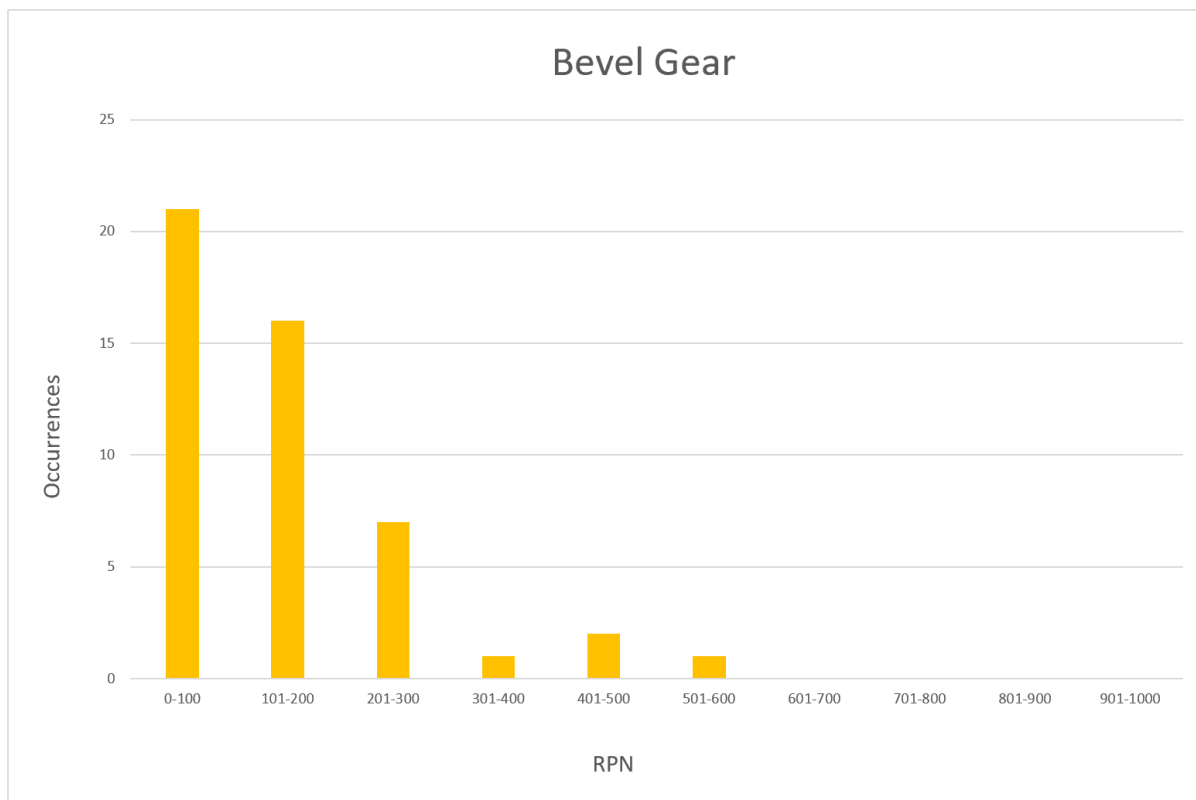


Abb. 4.3: Frequency Analysis Bevel Gear TGB

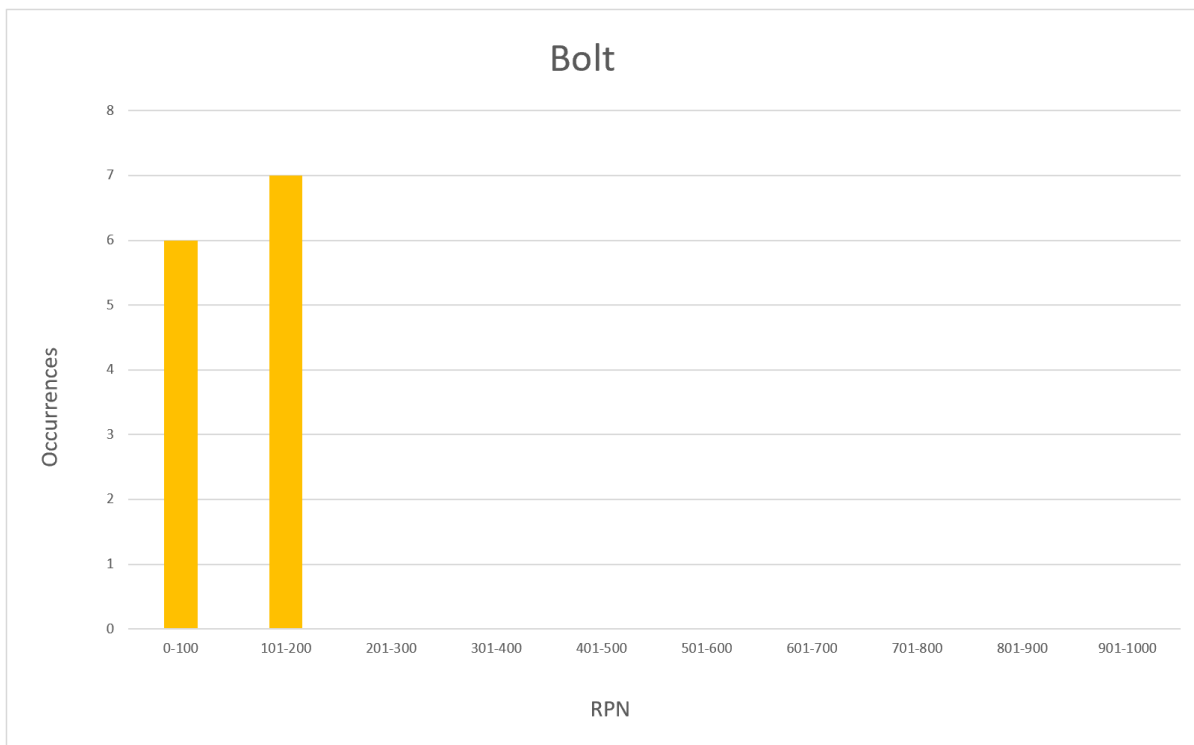


Abb. 4.4: Frequency Analysis Bolt TGB

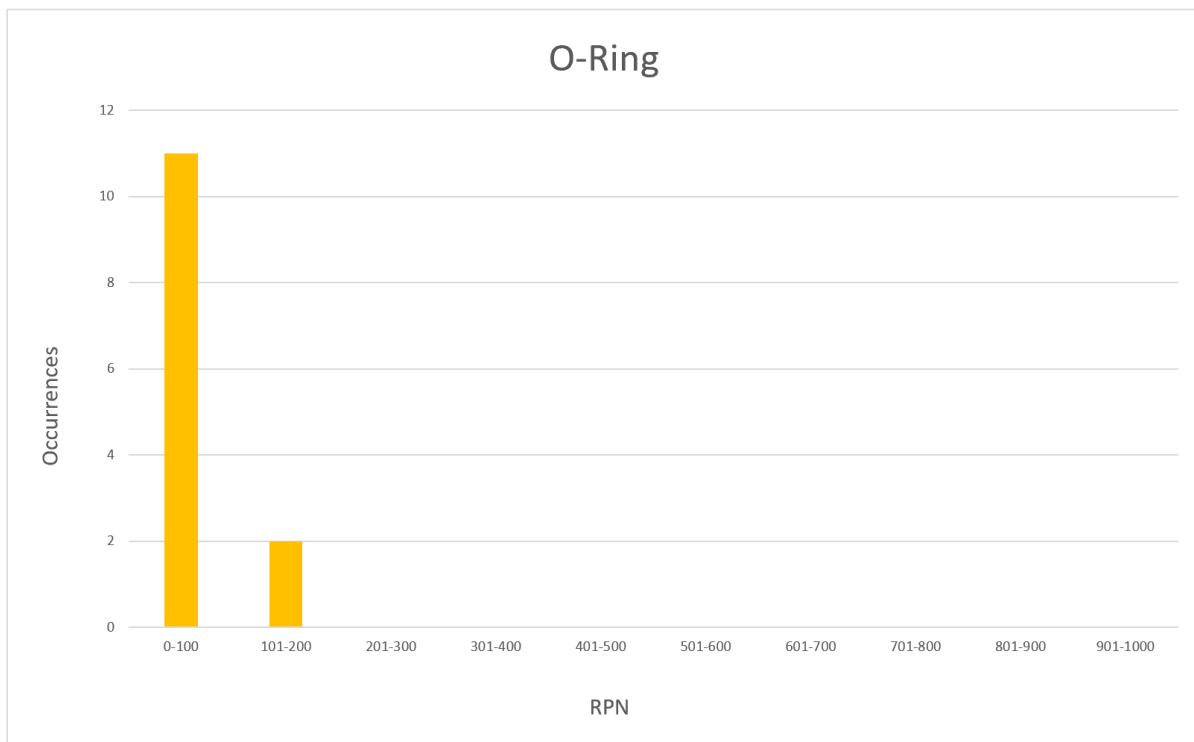


Abb. 4.5: Frequency Analysis O-Ring TGB

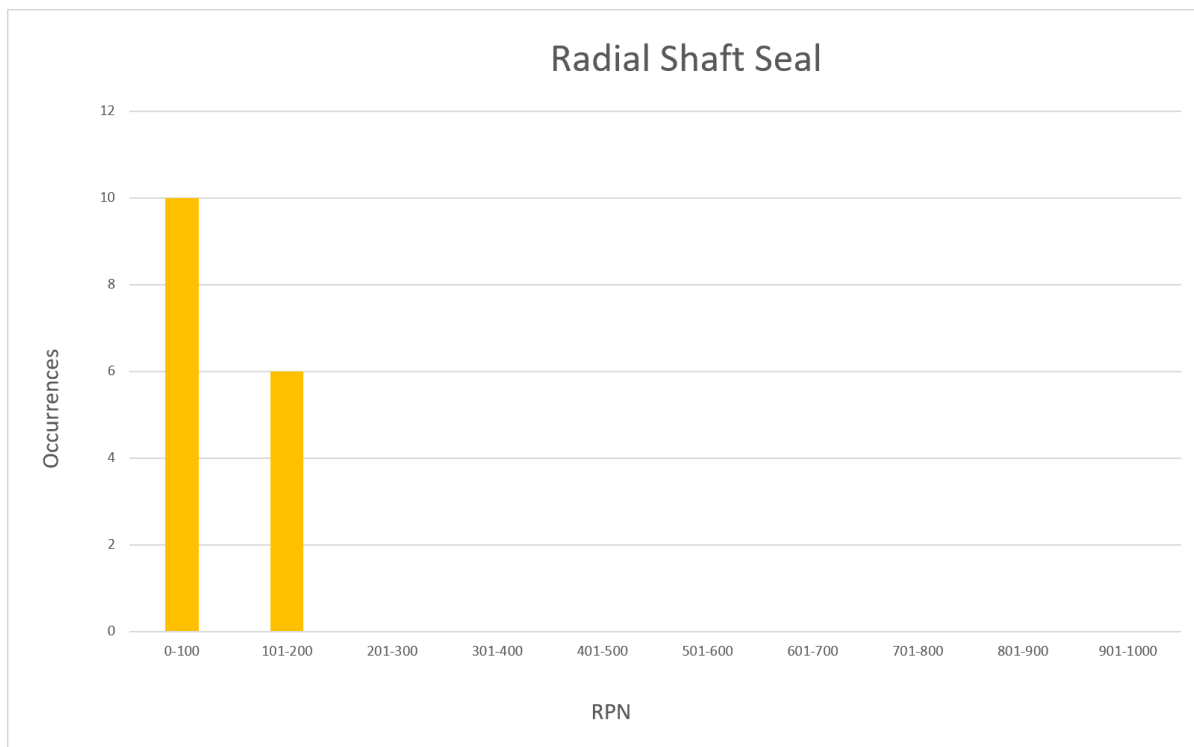


Abb. 4.6: Frequency Analysis Radial Shaft Seal TGB

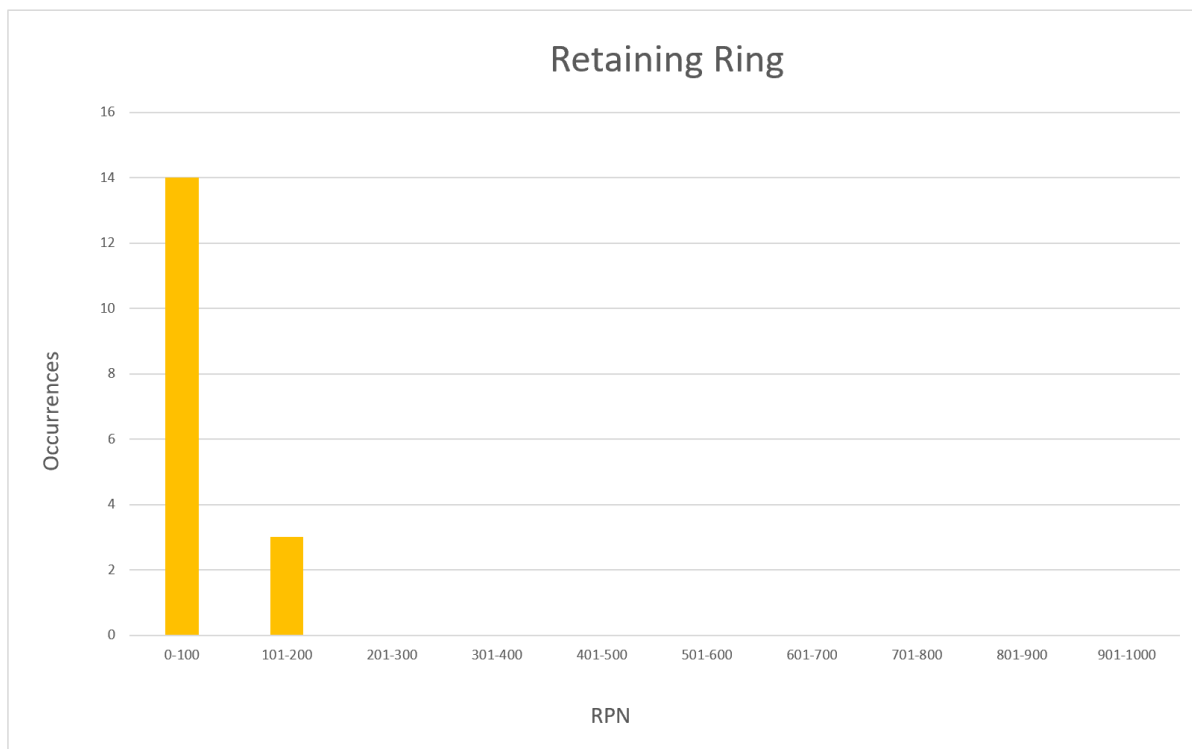


Abb. 4.7: Frequency Analysis Retaining Ring TGB

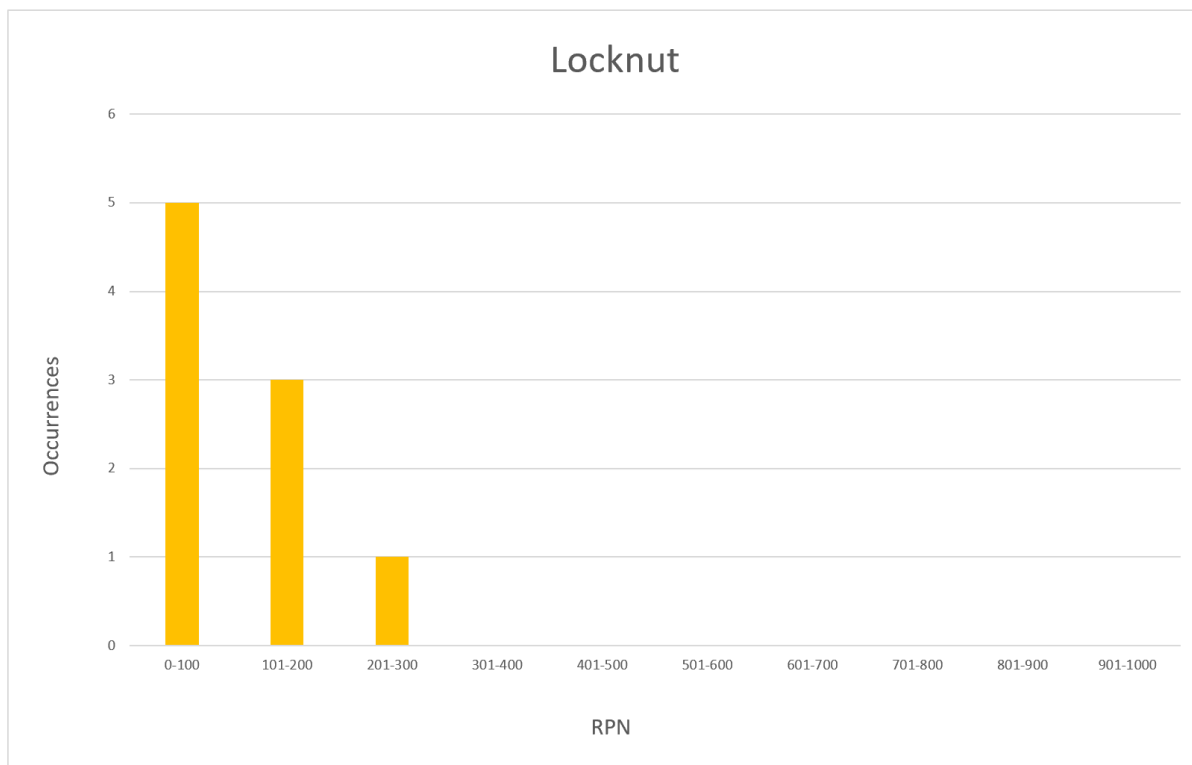


Abb. 4.8: Frequency Analysis Locknut TGB

4.2 Criticality Matrix

The Criticality Matrix helps to visualize the qualitative critical analysis of the FMECA and to support the relevant parties to recognized potential failures at a glance. The two factors *severity of potential effects* and *likelihood of occurrence of potential failure modes* are inserted in this 2-dimensional matrix. The assessment and procedure for finding these qualitative factors was described in chapter 2.2.4.

Special attention should be paid to the upper right corner of the Criticality Matrix. This area is described by a high severity of potential effects and a high likelihood of occurrence of potential failure modes. These failure modes are of the highest priority and must be promptly considered, evaluated or mitigated. In the short term, the goal must be to shift these errors through targeted actions to other areas of the criticality matrix. In the long term, an elimination of these potential failure modes has to be the aim.

Equally important is the lower right corner of the Criticality Matrix. This area is characterized by failure modes with a high severity of potential effects and comparatively low likelihood of occurrence. Although these modes of error are less common, they are nevertheless significant and should be treated with caution. Recommended actions, as described in the FMECA, must be carried out in order to transport the potential failure modes to other areas of the Criticality Matrix. For example, a short-term shift of these failures in the lower left corner and respectively long-term, if possible, an elimination should be the goal.

The upper left corner of the Criticality Matrix has a lower severity of potential effects but a high likelihood of occurrence. In this area, actions must be set which reduce the occurrence of potential failure modes to reach the lower left corner in the matrix, or at best eliminate the probability of failures altogether. Again, the goal must be to eliminate, or at least to mitigate, potential failure modes altogether.

Finally, the lower left part of the Criticality Matrix is described by a low severity of potential effects and a small likelihood of occurrence of potential failure modes. These failure modes must not be forgotten, but they do not have to be assigned the highest priority. In the long run, the goal must be to eliminate these failure modes.

The following illustrations show the Criticality Matrices of the individual components of the tail gearbox of the helicopter tail rotor configuration. It is noteworthy that the component Bearing (Figure 4.9), Shaft (Figure 4.10), Bevel Gear (Figure 4.11) and Locknut (Figure 4.16) have several potential failure modes of severity of potential effects classes II and I.

Furthermore, potential failure modes occur in all quadrants at the components Shaft and Bevel Gear, which also implies failure modes in the dangerous upper right corner.

The potential failure modes of the components Bolt (Figure 4.12) and O-ring (Figure 4.13) mostly reside in the upper and lower left quadrants.

Radial Shaft Seal (Figure 4.14) and Retaining Ring (Figure 4.15) have potential failure modes mostly in the middle of the criticality matrix.

Occurrence Level	A				
	B		- Friction corrosion / fretting corrosion - Fatigue due to insufficient lubrication	- Pitting - Fatigue due to foreign parts rollover	
	C	- Lateral rubbing marks	- Slippage tracks on rolling elements - Too high operating temperature	- Axial cracks or rupture of inner rings	
	D	- Uneven support of the bearing rings - Slippage marks	- Crater - Fatigue due to incorrect assembly / installation - Wear at rib contact	- Bearing cage damage - Bearing cage break - Break of rib	
	E		- Fatigue due to static overload		
		IV	III	II	I
		Severity Category			

Abb. 4.9: Criticality Matrix Bearing TGB

Occurrence Level	A				
	B	- Scuff marks or sliding wear	- Friction corrosion / fretting corrosion - Contamination of the gearbox	- Crack at a notch	
	C			- Too high vibrations - Too high operating temperature - Damages on shaft	
	D		- Corrosion due to moisture or aggressive fluids/gases	- Fatigue breakage - Overload breakage	
	E				
		IV	III	II	I

Severity Category

Abb. 4.10: Criticality Matrix Shaft TGB

Occurrence Level	A				
	B			- Adhesive wear - Abrasive wear	- Pitting - Cracks at tooth
	C			- Corrosive wear - Friction corrosion / fretting corrosion - Frosting	- Spalling - Fatigue tooth breakage - Overload tooth breakage
	D		- Current flashover	- Overheat - Cavitation	
	E			- Plastic deformation	
		IV	III	II	I

Severity Category

Abb. 4.11: Criticality Matrix Bevel Gear TGB

Occurrence Level	A				
	B	- Wrong assembly			
	C		- Corrosion		
	D				
	E			- Loosening screws - Bolt breakage	
		IV	III	II	I

Severity Category

Abb. 4.12: Criticality Matrix Bolt TGB

Occurrence Level	A		- Thermic damage		
	B				
	C		- Wrong assembly		
	D	- Oil not compatible with O-Ring	- Decomposition - Compressive strain - Explosive pressure drop		
	E				
		IV	III	II	I

Severity Category

Abb. 4.13: Criticality Matrix O-Ring TGB

Occurrence Level	A				
	B			- High leakage rate	
	C			- Damaged sealing - Damaged sealing lip	
	D		- High friction - Joule effect		
	E				
		IV	III	II	I

Severity Category

Abb. 4.14: Criticality Matrix Radial Shaft Seal TGB

Occurrence Level	A				
	B				
	C			- Corrosion of the ring - Wrong assembly - Groove deformation - Ring shear	
	D			- Break of retaining ring	
	E				
		IV	III	II	I

Severity Category

Abb. 4.15: Criticality Matrix Retaining Ring TGB

Occurrence Level

A				
B				
C			- Corrosion of the locknut - Wrong assembly	
D			- Breakage of the bent sheet metal lappet	- Loosening locknut
E				
	IV	III	II	I

Severity Category

Abb. 4.16: Criticality Matrix Locknut TGB

Kapitel 5

Discussion und Outlook

This diploma thesis emphasizes the importance of early failure detection with the support of FMECA which includes both the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) and the Criticality Analysis (CA). Only through a structured approach that the Failure Modes, Effects and Critical Analysis provides, can potential failures be detected, evaluated and categorized. Furthermore, recommended actions, risk priority numbers and criticality matrices help to implement ideas for a safer world.

The FMECAs were analyzed with the software program RAM-Commander. In general, this tool has a lot of options, which are extremely helpful to produce FMECAs in a professional way. Nevertheless, these features are mostly only available in the full version of this program. That's why it's recommended to procure the full version of RAM Commander in order to handle the FMECAs professionally.

The analyzed single-stage gearbox of a helicopter tail rotor should serve as the basis for further research. The identified FMECAs need to be constantly evolved to prevent failures, save costs, prevent deaths and save human lives. This goal is only achievable through a critical examination of all components with the help of FMECA.

The ultimate goal must be an analysis of all components of a helicopter using FMECA. This enormous effort can only be achieved by a large number of contributing persons. Precisely for this reason, public access to the already created FMECAs is essential.

To ensure a high level of product safety and a sophisticated construction and design process, it is essential to work and communicate with the European Union Aviation Safety Agency (EASA). The created FMECAs should be viewed, promoted and further communicated by this organization. The entire aviation industry should be aware of the importance of professional FMECAs and consider them in their planning as well as execution processes. The EASA can serve as a role model for other agencies in the world and thus contribute to a safer aviation.

Furthermore, a pilot project with a selected OEM (Original Equipment Manufacturer) is recommended. In this case, for example, a component can be further developed using an FMECA and thus improved. Again, this action contributes to a safer world. The selected OEM can attract attention and focus on improved reputation through targeted publications and public FMECAs. This factors should be considered for others as an incentive to further carry out different FMECAs.

This work should serve as motivation for others who have made it their goal to create a safer world. Only then it would be possible to convince Edward R. Murphy, who said his famous quote mentioned in the beginning, that not everything will go wrong.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Zusammenhang zwischen Design und Prozess FMEA & DFR	16
2.2	Fehlerentdeckung und Fehlerkosten	17
a	Fehlerentdeckung im Produktentwicklungsprozess	17
b	Fehlerkosten im Produktlebenszyklus	17
c	Factor of 10	17
2.3	FMEA Vorgehensweise	25
2.4	FMEA Worksheet Carlson	26
2.5	FMEA Worksheet	29
2.6	Systemstrukturierung	30
2.7	Funktionsbaum und Funktionsnetz	30
2.8	Blockdiagramm	31
2.9	Interface Matrix	32
2.10	FMEA Formblatt	33
2.11	Fehlerbaumanalyse	34
2.12	Warum-Treppe	36
2.13	Ishikawa-Diagramm Template	37
2.14	Ishikawa-Diagramm	38
2.15	Mind-Map	39
2.16	Fehler-Folgen-Matrix	40
2.17	Pareto-Diagramm mit ABC-Analyse	41
2.18	Häufigkeitsanalyse	42
2.19	FMEA Shortcomings	44
2.20	Vorgehensweise der traditionellen FMECA MIL-STD-1629A	47
2.21	Beispiel eines Worksheets einer quantitativen kritischen Analyse	50
2.22	Beispiel einer quantitativen kritischen Analyse	51
2.23	Kritikalitätsmatrix anhand einer Radbremse	54
2.24	Beispiel einer qualitativen kritischen Analyse	55
3.1	Systemstrukturierung	59
3.2	System Structure Helicopter	60
3.3	System Structure Helicopter	61
3.4	Interface Matrix TGB	62
3.5	FMEA Formsheet Bearing TGB	63
3.6	FMECA Bearing TGB 1/4	64
3.7	FMECA Bearing TGB 2/4	65
3.8	FMECA Bearing TGB 3/4	66
3.9	FMECA Bearing TGB 4/4	67
3.10	FMECA Shaft TGB 1/3	69
3.11	FMECA Shaft TGB 2/3	70
3.12	FMECA Shaft TGB 3/3	71
3.13	Ishikawa-Diagram Bevel Gear TGB	72
3.14	FMECA Shaft TGB 1/2	73

3.15 FMECA Shaft TGB 2/2	74
3.16 Why-Step Bolt TGB	75
3.17 FMECA Bolt TGB 1/1	76
3.18 Fault-Tree-Analysis O-Ring TGB	77
3.19 FMECA O-Ring TGB 1/1	78
3.20 Failure-Consequences-Matrix Radial Shaft Seal TGB	79
3.21 FMECA Radial Shaft Seal TGB 1/1	80
3.22 Brainstorming Retaining Ring TGB	81
3.23 FMECA Retaining Ring TGB 1/1	82
3.24 Brainstorming Locknut TGB	83
3.25 FMECA Locknut TGB 1/1	84
4.1 Frequency Analysis Bearing TGB	85
4.2 Frequency Analysis Shaft TGB	86
4.3 Frequency Analysis Bevel Gear TGB	86
4.4 Frequency Analysis Bolt TGB	87
4.5 Frequency Analysis O-Ring TGB	87
4.6 Frequency Analysis Radial Shaft Seal TGB	88
4.7 Frequency Analysis Retaining Ring TGB	88
4.8 Frequency Analysis Locknut TGB	89
4.9 Criticality Matrix Bearing TGB	90
4.10 Criticality Matrix Shaft TGB	91
4.11 Criticality Matrix Bevel Gear TGB	91
4.12 Criticality Matrix Bolt TGB	92
4.13 Criticality Matrix O-Ring TGB	92
4.14 Criticality Matrix Radial Shaft Seal TGB	93
4.15 Criticality Matrix Retaining Ring TGB	93
4.16 Criticality Matrix Locknut TGB	94

Tabellenverzeichnis

2.1	Rating - Auftretenswahrscheinlichkeit (Liu, 2016, S. 5)	21
2.2	Rating - Schweregrad (Liu, 2016, S. 5)	22
2.3	Rating - Entdeckungswahrscheinlichkeit (Liu, 2016, S. 6)	23
2.4	5 Whys (Carlson, 2012, S. 137f)	35
2.5	Beispiel Risikoprioritätszahl (Werdich, 2012, S. 52)	43
2.6	Probability of Loss (US Military, 1980, S. 102-3)	48
2.7	Severity Classification (Carlson, 2012, S. 291)	52
2.8	Failure Probability (Carlson, 2012, S. 291)	53
3.1	5 Whys Shaft TGB	68

Literaturverzeichnis

- [1] Aerokurier. *50 JAHRE BO105*. 2017. URL: <https://www.aerokurier.de/motorflug/erfolgsstory-50-jahre-bo105/> (Zugriff am 05.07.2019).
- [2] G. Aeronautics. *Helicopter Structures*. 2017. URL: <https://www.aircraftsystemstech.com/p/helicopter-structures.html> (Zugriff am 05.07.2019).
- [3] V. Anes, M. Henriques, M. Freitas und L. Reis. „A new risk prioritization model for failure mode and effects analysis“. In: *Quality and Reliability Engineering International* 34/4 (2017), S. 516–528.
- [4] C. W. Benjamin. „A Unified Approach to Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA)“. In: *PROCEEDINGS Annual RELIABILITY AND MAINTAINABILITY Symposium* (1991), S. 260–271.
- [5] A. Borowska, D. Matovac und R.-O. Aderemi. *Introduction to Paremiology: A Comprehensive Guide to Proverb Studies*. Warschau/Berlin: De Gruyter Open Ltd., 2014. ISBN: 978-3-11-041015-0.
- [6] J. B. Bowles. „The New SAE FMECA Standard“. In: *PROCEEDINGS Annual RELIABILITY AND MAINTAINABILITY Symposium* (1998), S. 48–53.
- [7] A. Braaksmas, A. Meesters, W. Klingenberg und C. Hicks. „A quantitative method for Failure Mode and Effects Analysis“. In: *International Journal of Production Research* 50/23 (2012), S. 6904–6917.
- [8] C. S. Carlson. *Effective FMEAs - Achieving Safe, Reliable, and Economical Products and Processes Using Failure Mode and Effects Analysis*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. ISBN: 978-1-118-00743-3.
- [9] C. S. Carlson. „Which FMEA Mistakes Are You Making?“ In: *Quality Progress* 47/9 (2014), S. 36–42.
- [10] Y. Chen, C. Ye, B. Liu und R. Kang. „Status of FMECA Research and Engineering Application“. In: *Prognostics & System Health Management Conference* (2012), S. 1–9.
- [11] D. Cotton. *The Smart Solution Book*. Harlow: Paerson, 2016. ISBN: 1-292-14231-6.
- [12] A. Daum, W. Greife und R. Przywara. *BWL für Ingenieure und Ingenieurinnen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010. ISBN: 978-3-8348-0790-8.
- [13] U. D. of Defense. „MIL-STD-1629A - Procedures for performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis“. In: *US Department of Defence, Washington D.C.* (1980), S. 1–54.
- [14] N. Falstein. „BRAINSTORMING“. In: *Game Developer* 11/8 (2004), S. 47.
- [15] W. Geiger und W. Kotte. *Handbuch Qualität - Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme – Perspektiven*. 5., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2008. ISBN: 978-3-8348-0273-6.
- [16] M. Happel, P. Lux und D. Schwarz. *Werkzeuge zur systematischen Durchführung einer Failure Modes Effects & Diagnostic Coverage Analysis (FMEDA)*. 2014. URL: https://ftp.informatik.uni-stuttgart.de/pub/library/medoc.ustuttgart_fi/FACH-0199/FACH-0199.pdf (Zugriff am 28.06.2019).

- [17] U. D. o. t. a. Headquarters. *FAILURE MODES, EFFECTS AND CRITICALITY ANALYSIS (FMECA) FOR COMMAND, CONTROL, COMMUNICATIONS, COMPUTER, INTELLIGENCE, SURVEILLANCE, AND RECONNAISSANCE (C4ISR) FACILITIES - Technical Manual No. 5-698-4*. Washington DC: Headquarters - Department of the army, 2006.
- [18] E. Hering und A. Schloske. *Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse - Methode zur vorbeugenden, systematischen Qualitätsplanung unter Risikogesichtspunkten*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2019. ISBN: 978-3-658-25762-0.
- [19] O. Illiashenko und E. Babeshko. „CHOOSING FMECA-BASED TECHNIQUES AND TOOLS FOR SAFETY ANALYSIS OF CRITICAL SYSTEMS“. In: *INFORMATION & SECURITY. An International Journal* 28/2 (2012), S. 275–285.
- [20] T. Jackson und B. Warren. „Standardizing the FMECA Format: A guideline for airforce contractors“. In: *PROCEEDINGS Annual RELIABILITY and MAINTAINABILITY Symposium* 95 (1995), S. 66–73.
- [21] K.-S. Lin und C.-C. Chiu. „Vague Set based FMEA Method for Risk Evaluation of Safety-Related Systems“. In: *The 2018 IEEE Conference on Dependable and Secure Computing* (2018), S. 1–8.
- [22] X. Liqing, Z. Cheng, W. Huiyun, L. Xingwang, S. Yong und H. Zhaohua. „A Method of Health Monitoring on Helicopter Speed Reducer Based on FMECA“. In: *Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chengdu)* (2016), S. 1–6.
- [23] H.-C. Liu. *FMEA Using Uncertainty Theories and MCDM Methods*. Singapore: Springer, 2016. ISBN: 978-981-10-1465-9.
- [24] H.-C. Liu, L. Long und N. Liu. „Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review“. In: *Expert Systems with Applications* 40 (2013), S. 828–838.
- [25] H.-C. Liu, J.-X. You, S. Chen und Y.-Z. Chen. „An integrated failure mode and effect analysis approach for accurate risk assessment under uncertainty“. In: *INFORMATION & SECURITY. An International Journal* 48/11 (2016), S. 1027–1042.
- [26] A. Ltd. *A.L.D. Company Profile*. 2019. URL: https://aldservice.com/images/ALD_Profile_detail.pdf (Zugriff am 28.06.2019).
- [27] P. Luthra. „FMECA: An Integrated Approach“. In: *PROCEEDINGS Annual RELIABILITY AND MAINTAINABILITY Symposium* (1991), S. 235–241.
- [28] R. Mock. „Risiko, Sicherheit und Zuverlässigkeit“. In: *Informatik Spektrum* (2003), S. 167–172.
- [29] H.-G. Nollau und M. Neumeier. *Logistikfallstudien und Risikomanagement*. 1. Auflage. Köln: Josef EUL Verlag, 2010. ISBN: 978-3-89936-903-8.
- [30] L. Oprea. *Entwicklungsmanagement - Methoden in der Produktentwicklung*. Berlin: Springer Verlag, 2005. ISBN: 3-540-20652-3.
- [31] A. Pillay und J. Wang. „Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning“. In: *Reliability Engineering and System Safety* 79 (2003), S. 69–85.
- [32] D. Raheja und L. J. Gullo. *Design for Reliability*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. ISBN: 978-0-470-48675-7.
- [33] S. S. Sonigra. „A Case Study of Connecting Rod Manufacturing Industries to Control Big End Bore Diameter Variation“. In: *IUP Journal of Operations Management* 16 (2017), S. 61–73.

- [34] C. Spreafico, D. Russo und C. Rizzi. „A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents“. In: *Computer Science Review* 25 (2016), S. 19–28.
- [35] P. Teoh und C. Keith. „Failure modes and effects analysis through knowledge modelling“. In: *Journal of Materials Processing Technology* 153-154 (2004), S. 253–260.
- [36] M. Werdich. *FMEA – Einführung und Moderation*. 2., überarbeitete und verbesserte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012. ISBN: 978-3-8348-1787-7.
- [37] S. Yu, Q. Yang, J. Liu und M. Pan. „A Comparison of FMEA, AFMEA and FTA“. In: *The Proceedings of 2011 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety* (2011), S. 954–960.
- [38] L. Yun-Seong, K. Dong-Jin, K. Jin-O., S. Member, IEEE und K. Hyungchul. „New FMECA Methodology Using Structural Importance and Fuzzy Theory“. In: *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS* 26/4 (2011), S. 2364–2370.
- [39] X. Zhou und Y. Tang. „Modeling and Fusing the Uncertainty of FMEA Experts Using an Entropy-Like Measure with an Application in Fault Evaluation of Aircraft Turbine Rotor Blades“. In: *Entropy* 20 (2018), S. 1–13.