

Diplomarbeit

Zuverlässigkeitswachstum im Schie- nenfahrzeugbau

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl. Ing oder DI)
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissen-
schaften
von

Matthias Alfred SCHURZ

Mat.Nr.: 01225814

unter der Leitung von
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Detlef Gerhard
Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik

und

Dipl.-Ing. Dr. Norbert Spörk
Siemens Mobility GmbH

Wien, Februar 2019

Kurzfassung

Die nachfolgende Diplomarbeit beschäftigt sich mit dem Wachstum von inhärenter Zuverlässigkeit in Schienenfahrzeugen. Dabei sollen geeignete Methoden und Modelle zur Beschreibung und Prognose von Zuverlässigkeitswachstum erarbeitet werden. Ausgehend von einer fundierten Literaturrecherche werden relevante Normenwerke, Definitionen rund um die Begriffe Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Instandhaltung, sowie notwendige statistische Verfahren zur Darstellung von Ausfallverhalten von technischen Systemen erläutert. Um das gesammelte Wissen umsetzen zu können, wird in dem praktischen Teil zuerst ein anonymisiertes Projekt herangezogen. Aus einer Datenbank von Störungen wird mit geeigneten Werkzeugen eine umfangreiche Zuverlässigkeitsanalyse erstellt und anschließend hinsichtlich Zuverlässigkeitswachstum untersucht. In weiterer Folge werden zwei zuvor recherchierte Modelle zur Prognose von Zuverlässigkeitszielen herangezogen und anhand eines zuvor definierten Use – Case erprobt. Nach Diskussion der Ergebnisse wird noch ein Konzept für die Einbindung eines Zuverlässigkeitswachstumsprogramms in den Entwicklungsprozess von Schienenfahrzeugen beschrieben.

Abstract

The following diploma thesis deals with the growth of inherent reliability in rail vehicles. Suitable methods and models for describing and predicting reliability growth are to be developed. Based on a well-founded literature search, relevant sets of standards, definitions around the terms reliability, availability and maintenance, as well as necessary statistical procedures for the representation of failure behaviour of technical systems are explained. In order to be able to implement the collected knowledge, an anonymous project will first be used in a practical part. A comprehensive reliability analysis is created from a database of faults using suitable tools and then examined with regard to reliability growth. Subsequently, two previously researched models are used to predict reliability targets and tested based on a previously defined use case. After discussion of the results, a concept for the integration of a reliability growth program into the development process of rail vehicles is described.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Darüber hinaus möchte ich ein paar wenige Namen nennen, ohne die diese Arbeit nicht in dieser Form möglich gewesen wäre.

Ich bedanke mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. Norbert Spörk und Herrn Ing. Mag. Daniel Bruckmiller aus der RAMSML – Gruppe bei Siemens Mobility GmbH in Wien für Ihre fachliche und konstruktive Kritik, sowie tatkräftige Unterstützung. Des Weiteren will ich in diesem Zusammenhang auch das Felddatenmanagement – Team rund um Herrn Dipl.-Ing. Alexander Ondrejkovics nennen, welche mir den Zugang zu Felddaten ermöglichten.

Bedanken möchte ich mich auch bei meiner Freundin und meinem Freundes – und Familienkreis, die mich stets wärmstens unterstützt und mir den Rücken während dieser Zeit freigehalten haben.

Herzlichen Dank!

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde.

Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen sind als solche entsprechend kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, Februar 2019

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract.....	III
Danksagung.....	V
Eidesstattliche Erklärung.....	VII
Inhaltsverzeichnis	1
1 Einleitung.....	5
1.1 Ausgangssituation.....	5
1.2 Zielstellung	5
1.3 Vorgehensweise und Methodik.....	6
2 Relevante Standards & Normen.....	8
2.1 Generischer RAMS – Prozess	9
2.2 Zuverlässigkeitsmanagement	12
2.3 Betriebssichererer Zustand.....	14
2.4 Zuverlässigkeitswachstum	15
2.5 Statistische Prüf – und Schätzverfahren	17
2.6 Risikomanagement	18
2.7 Qualitätsmanagement.....	20
2.8 Umweltmanagement.....	21
2.9 Sicherheit und Gesundheit.....	22
3 Zuverlässigkeit & Definitionen	24
3.1 Zuverlässigkeit (Überlebenswahrscheinlichkeit).....	24
3.2 Verfügbarkeit	25
3.3 Instandhaltung & Instandhaltbarkeit	25
3.4 Ausfallwahrscheinlichkeit, Ausfalldichte & Ausfallrate	27
3.5 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (Ausfalldichten)	28
3.5.1 Exponentielle Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	29
3.5.2 Normalverteilte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion.....	30
3.5.3 Lognormale Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion.....	30
3.5.4 Gumbel Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	31
3.5.5 Weibull Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion.....	32
3.6 Zuverlässigkeitskennwerte.....	33
3.7 Die Begriffe Risiko & Unsicherheit	35
3.8 Arten von Fehlern	36

3.9	Lebenszykluskosten.....	37
3.10	Badewannenkurve	38
3.11	Abgrenzung zu Safety.....	40
4	RAM/LCC Management.....	41
4.1	RAM/LCC – Prozess.....	41
4.2	RAM – Plan.....	43
4.3	Qualitative & Quantitative RAM – Analysen	44
4.3.1	Failure Mode Effects and Criticality Analysis – FME(C)A.....	44
4.3.2	Fault Tree Analysis – FTA.....	45
4.3.3	Root Cause Analysis – RCA	45
4.4	Qualitative & Quantitative RAM – Tests	46
4.4.1	High Accelerated Life Test – HALT	46
4.4.2	High Accelerated Stress Screen – HASS.....	48
4.4.3	Quantitative Accelerated Life Test – QALT	48
5	Zuverlässigkeitswachstum – Reliability Growth.....	50
5.1	Reliability – Growth – Modelle.....	50
5.1.1	Modifiziertes Potenzgesetzmodell nach Krasich	51
5.1.2	Modifiziertes Bayes'sches IBM – Rosner – Modell.....	53
5.1.3	Kontinuierliche Zuverlässigkeitsmodelle	54
5.1.4	Diskretes Zuverlässigkeitswachstumsmodell nach Crow	56
5.2	Prüf – und Schätzverfahren für das kontinuierliche Potenzgesetzmodell	57
5.2.1	Wachstumsprüfung und Schätzung der Parameter	58
5.2.2	Anpassungsprüfung	60
5.2.3	Vertrauensbereich des Formparameters.....	61
5.2.4	Vertrauensbereiche des <i>MTBF</i>	62
5.3	Zuverlässigkeit von Software	62
5.3.1	Jelinski & Moranga – Modell	65
5.3.2	Inflection S – Shaped Modell	66
5.4	Lifetime Data Analysis (LDA)	67
5.5	Human Reliability Analysis (HRA).....	68
6	Analyse eines Projekts und Zuverlässigkeitswachstumsmodellierung.....	71
6.1	Anforderung an die Auswertung der Felddaten	72
6.2	Beschreibung der Datensätze.....	72
6.3	Data Cleaning der Felddaten	75
6.4	Ausleitung der Fehlerkurven	76
6.4.1	Auswertung Zuverlässigkeit aller Fehlerklassen (ABCD)	77

6.4.2	Auswertung Zuverlässigkeit betriebsrelevanter Fehlerklassen (ABC)	79
6.4.3	Trennung der seriellen von den inhärenten Fehlern	81
6.5	Analyse der Baugruppen.....	83
6.6	Annahmen für den Use – Case	85
6.7	Use – Case: Modell Krasich.....	86
6.7.1	Rückblick: Modell nach DUANE	90
6.8	Use – Case: Modell IBM – Rosner	90
6.9	Auswertung der Zuverlässigkeitsparameter	94
7	Zuverlässigkeitswachstumsprogramm	96
8	Diskussion der Ergebnisse.....	99
8.1	Ausblick auf weitere Themen im Zusammenhang mit Zuverlässigkeitswachstum	101
	Literaturverzeichnis	102
	Abbildungsverzeichnis	104
	Formelverzeichnis	106
	Tabellenverzeichnis	108
	Abkürzungsverzeichnis	109

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Siemens Mobility GmbH (Business Unit: Rolling Stock) ist ein weltweit agierendes Unternehmen, welches Schienenfahrzeuge konzeptioniert, entwickelt und produziert. Dabei handelt es sich um Metros, Light Rails, Passenger Coaches und Véhicules automatique léger (VALs). Nach der Auslieferung der Produkte muss ein reibungsloses Funktionieren der Systeme im Passagierbetrieb sichergestellt werden. Dies kann durch geplante, präventive Wartungsschritte der Fahrzeuge, entweder durch den Hersteller oder den Betreiber, zusätzlich zur Berücksichtigung der Zuverlässigkeitsziele im Engineering, in der Fertigung, im Testing und bei der Inbetriebsetzung gewährleistet werden.

Fest steht jedenfalls, dass die Betreiber von Schienenfahrzeugen sichere und vor allem zuverlässige Systeme kaufen wollen. Sie stellen deshalb nicht nur hohe Anforderungen, um die Einhaltung der Fahrpläne zu sichern, sondern wollen auch ein Wachstum von Zuverlässigkeitswerten der Fahrzeuge in der Anfangsphase des Betriebs (MTBF, MDBF...) sichergestellt haben. Solche Anforderungen werden nach Entwicklungen am Markt immer häufiger an Schienenfahrzeughersteller gestellt. Deren Erfüllung ist somit eine essentielle Voraussetzung, um im weltweiten Markt auch in Zukunft unter hohem Konkurrenzdruck wettbewerbsfähig bleiben zu können. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden müssen hohe Anstrengungen getroffen werden. Dazu zählen unter anderem intensive Analysen der Ausfallverhalten von verbauten Komponenten oder aufwändige Zuverlässigkeitstests von Subsystemen.

Ein Erreichen von Zuverlässigkeitswachstum über das Produktleben hinweg, im Speziellen jedoch in der Anfangsphase, ist ein kein triviales Vorhaben und betrifft nicht nur eine optimale Wartung der Züge, sondern sämtliche vorgelagerten und angrenzenden Prozesse. Diese ziehen sich durch Herstellung, wie die Entwicklung, Produktion, Testphase, als auch den operativen Betrieb der Produkte. Gerade in der Anfangsphase ist es so, dass es aufgrund vieler „Kinderkrankheiten“ zu massiven Einbußen der Zuverlässigkeit kommt. Angriffspunkte für eine wachsende Zuverlässigkeit können also technische, betriebswirtschaftliche und organisatorische Tätigkeiten sein und erfordern genaue Kenntnisse über eine Vielzahl an Parametern. Solch ein benötigtes, interdisziplinäres Wissen betrifft etwa die Fahrzeugstruktur, technische Details über verbaute Komponenten, Lieferantendaten(-systeme), Umwelteinflüsse, Betriebsanforderungen, Gesetzes- und Normenlage und viele andere.

In den obigen, groben Skizzierungen spiegelt sich also eine komplexe Ausgangslage wider, die anhand dieser wissenschaftlichen Abhandlung genau beschrieben wird. Mögliche Lösungsansätze für die Beschreibung des Zuverlässigkeitswachstums von Schienenfahrzeugen werden dabei dargelegt.

1.2 Zielstellung

Aus der oben beschriebenen Ausgangssituation ergibt sich die folgende Zielstellung:

Es soll ein grundlegendes Zuverlässigkeitswachstumsmodell mit möglichen, zeitlich passenden (Verbesserungs-) Ansätzen zur Erreichung von Zuverlässigkeitszielen von Schienenfahrzeugen ausgearbeitet und beschrieben werden. Dieses soll sich am internen

Entwicklungsprozess der Siemens Mobility GmbH, beziehungsweise am Lebenszyklus der Fahrzeuge orientieren.

Zuvor soll jedoch Klarheit darüber gegeben werden, welche Methoden und Hilfsmittel zum Erreichen von Zuverlässigkeitswachstum (im Schienenfahrzeugbau) in der Fachliteratur beschrieben sind und eingesetzt werden. Im Zuge dessen sollen auch grundlegende Definitionen zur Zuverlässigkeit, sowie weitere notwendige Begriffe und Normen erläutert werden. Dies soll vor allem ein verständliches und anwendbares Konzept ermöglichen und den Bogen zwischen praktischer Anwendbarkeit und wissenschaftlicher Theorie spannen. Zusätzlich soll ein Modell anhand eines „neutralisierten“ spezifischen Projektes dargestellt werden, das unmittelbaren Eingang in die laufende Projektarbeit des Fachbereiches finden soll. Dabei muss von vornherein klar sein, dass in dieser Arbeit nur die inhärente Zuverlässigkeit, ohne die im Anfangsstadium massiv auftretenden Serienfehlern, betrachtet werden sollen.

Um einen ganzheitlichen Blick auf den Sachverhalt geben zu können, soll diese Diplomarbeit auf möglichst alle technischen, betriebswirtschaftlichen und organisatorischen Aspekte firmenweit Rücksicht nehmen. Dies ist notwendig, um mögliche Verbesserungen oder Anpassungen in den Prozessen zu einem späteren Zeitpunkt tatsächlich umsetzen zu können.

1.3 Vorgehensweise und Methodik

Die vorliegende Diplomarbeit gliedert sich grundlegend in drei Hauptteile.

Den **ersten Teil** bildet eine fundierte, wissenschaftliche Recherche zur Einführung in die Thematik *Reliability, Availability, Maintainability & LCC (RAM/LCC)* von technischen Systemen und in weiterer Folge *Zuverlässigkeitswachstum* (engl.: *Reliability Growth*). Dabei wird der Effekt des Reliability Growth ausgearbeitet um eine wissenschaftlich – theoretische Basis für weitere Betrachtungen zu schaffen. Dazu zählt zu allererst die Anführung relevanter Normenwerke, die eine Grundlage für sämtliche anfallenden Definitionen und Betrachtungen darstellen. Anschließend wird eine grundsätzliche Abhandlung aller relevanten Begriffe, quantitativer & qualitativer Engineering – Methoden und statistischer Prognosen und Analysen rund um Zuverlässigkeit durchgeführt. Auch eine allgemeine Beschreibung des RAM – Prozesses mit samt seinen notwendigen Schnittstellen und Parametern wird hier angegeben.

Im **zweiten Teil** wird ein bei Siemens bereits durchgeführtes, abgeschlossenes Projekt hinsichtlich Zuverlässigkeitswachstum untersucht. Wie sehen solche Reliability – Kurven aus, tritt dabei Reliability Growth auf und welche Erkenntnisse kann man daraus für künftige Projekte ableiten? Außerdem wird die Modellierung und Simulation eines Zuverlässigkeitswachstumsmodells anhand eines Use – Case angestrebt. Dieser soll ein Gefühl dafür vermitteln, wie Zuverlässigkeitswachstum in der Realität aussieht. Die zuvor ausgewählten Zuverlässigkeitswachstumsmodelle werden mathematisch beschrieben und die nötigen Eingangsparameter für Projekte, welche Zuverlässigkeitswachstum nachweisen müssen, definiert. Anschließend wird anhand dieser Parameter und zuvor definierten Umgebungsbedingungen für ein fiktives Projekt ein Zuverlässigkeitswachstumsverlauf simuliert. Anhand dieses Use – Case werden dann Erkenntnisse und Maßnahmen für die Erstellung des Konzepts für ein Zuverlässigkeitswachstumsprogramm abgeleitet.

Die Eingangsparameter und Bedingungen für den Use – Case werden ähnlich dem zuvor analysierten Projekt aus der Vergangenheit angenommen, um genau dieses Verhalten wider spiegeln zu können und zu bestätigen, dass Zuverlässigkeitswachstum vorhersagbar ist. Es

werden möglichst reale Annahmen getroffen, um klare Aussagen zu erhalten. Konkret geht es dabei um ein Metroprojekt, welches innerhalb einer Laufzeit von 36 Monaten ein Zuverlässigkeitsziel erreichen soll. Die Annahmen sind in folgender Tabelle 6-4 dargestellt. Die detaillierte Beschreibung der Annahmen für diesen Anwendungsfall sind in Abschnitt 6.6 zu finden.

Annahmen für Use Case					
Zuverlässigkeit zum Startzeitpunkt			Zuverlässigkeitsziel		
MDBF_0 (T) [km]	FIT_0 (T) [1E-9/h]	MTBF_0 (T) [h]	MDBF_G (T) [km]	FIT_G (T) [1E-9/h]	MTBF_G (T) [h]
900	462 962 963	2,16	8 000	52 083 333	19,20

Entwurfsverbesserungszeit	Wachstumsrate	Gesamtbetriebsdauer	Gesamtanzahl der verwirklichten Verbesserungen (n.r.)	Laufleistung pro Monat [km] (Annahme)	Tägliche Einschaltdauer [h]
t_D [Monat]	alpha_D	T [Zeitpunkt in Monaten]	D	L [km]	t_active
36	modellspezifisch	36	-	200 000	16

Aus Tabelle 6-4: Annahmen für den Use – Case

Abschließend, im **dritten Teil**, wird ein Konzept ausgearbeitet, das Siemens Mobility GmbH hilft, Zuverlässigkeitswachstum über die Phasen Design, Produktion, Montage und Betrieb zu erreichen und seine Kunden im hohen Wettbewerbsdruck zufrieden zu stellen. Dieser orientiert sich an bereits gegebenen Prozessen und stellt in einfachster Weise dar, wie der Vorgang für die Erreichung von Zuverlässigkeitswachstumszielen aussieht. Abschließend werden die neu gewonnenen Erkenntnisse interpretiert und diskutiert.

2 Relevante Standards & Normen

In diesem Kapitel werden relevante Standards und Normenwerke für den RAM/LCC – Prozess, beziehungsweise für das Verständnis des Lesers dieser Diplomarbeit erläutert und zusammengefasst. Begriffliche Definitionen werden im darauffolgenden Kapitel 3 aufgelistet.

Die folgend genannten Normen bewegen sich auf unterschiedlicher Granularität. Zum Teil werden Normen auf Ebene der entwickelnden Ingenieure benötigt, zum anderen werden diese Schriften von übergeordneten Organisationsebenen umgesetzt. Um den Überblick dabei zu bewahren, gibt Abbildung 2-1 einen kurzen Überblick darüber.



Abbildung 2-1: Ebenen der Normen

Grundsätzlich geht es bei RAM/LCC um angewandtes Risikomanagement auf technischer Ebene, welches in vielen Normen festgelegt wird. Die wichtigste Norm dafür ist aber die **EN 50126-1:2017 – Generischer RAMS Prozess** [1] (Abschnitt 2.1), welche eine essentielle Grundlage und Vorgehensweise für den RAM/LCC – Prozess darstellt. Sie gibt einen generischen RAM – Prozess über den gesamten Lebenszyklus eines Schienenfahrzeugs vor.

Einen weitere Grundpfeiler stellt die Norm **DIN EN 60300-1:2015 – Zuverlässigkeitsmanagement** [2] (Abschnitt 2.2) dar. Sie beschäftigt sich ebenfalls mit Zuverlässigkeit im Allgemeinen und ist dabei nicht branchenspezifisch.

Eine andere, sehr bedeutungsvolle Normenreihe ist die **DIN 27200:2011 – Betriebssicherer Zustand** [3] (Abschnitt 2.3). Sie beschäftigt sich mit dem Fachgebiet der Instandhaltung für Schienenfahrzeuge. In dem Dokument wird eine Vielzahl an Begriffen und Definitionen bezüglich der Instandhaltung von solchen Systemen angegeben. Darüber hinaus beinhaltet die Normenreihe *DIN 27200 ff.* weitere Schriften, die technische Festlegungen für sicherheits- und überwachungsrelevanten Funktionen normieren.

Zwei weitere wichtige Normen stellen die **DIN EN 61014:2004 – Zuverlässigkeitswachstum** [4] (Abschnitt 2.4), beziehungsweise die **DIN EN 61164:2004 – Statistische Prüf – und Schätzverfahren** [5] (Abschnitt 2.5) dar. Sie geben zum einen Programme an, um Zuverlässigkeitswachstum zu planen, zum anderen statistische Verfahren, um diese zu beschreiben und zu erreichen.

Zu guter Letzt sollen auch essentielle nicht-technische Normen, die sich mehr auf Managementaspekte konzentrieren, angegeben werden (Abbildung 2-2). Ein optimal funktionierendes Risikomanagementsystem lebt nicht nur von technischen Methoden und Analysen, sondern auch von anderen eingebetteten Managementpaketen. Dazu zählen ein unternehmensweites Risikomanagement (**ISO 31000:2018 – Risikomanagement** [6], Abschnitt 2.6), generelle

Anforderungen hinsichtlich Qualität (**ISO 9001:2015 – Qualitätsmanagementsysteme** [7], Abschnitt 2.7), ein schonender und nachhaltiger Umgang mit der Umwelt (**DIN EN ISO 14001:2015 – Umweltmanagementsysteme** [8], Abschnitt 2.8) und zu guter Letzt Gesundheitsaspekte am Arbeitsplatz (**ISO 45001:2018 – Sicherheit und Gesundheit** [9], Abschnitt 2.9).



Abbildung 2-2: Managementaspekte

Es gibt viele weitere Normen, die mit dem Thema Zuverlässigkeit in Zusammenhang stehen. Bei Themengebieten, die einer Norm zugrunde liegen, ist dies im jeweiligen Abschnitt vermerkt (siehe zum Beispiel *FMECA* Abschnitt 4.3.1).

2.1 Generischer RAMS – Prozess

Der Titel der Norm *EN 50126-1:2017* lautet ***Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) - Part 1: Generic RAMS Process.***

Das Gesamtwerk (*EN 50126:2017*) ist in zwei Dokumente unterteilt, wobei der erste einen generischen RAMS – Prozess und der zweite den Leitfaden und Methoden für den Safety – Teil des RAMS – Prozesses beinhaltet. Da sich diese Diplomarbeit nur auf den RAM/LCC – Teil fokussiert, wird im Folgenden nur der Teil *EN 50126-1:2017* beschrieben.

Die Norm definiert zu Beginn den Begriff RAMS (Tabelle 2-1) und deren Wechselwirkung untereinander.

Reliability	=	Zuverlässigkeit	<i>Ein Maß dafür, wie oft ein Zug im Betrieb ausfällt</i>
Availability		Verfügbarkeit	<i>Ein Maß dafür, wie gut ein Zug den Fahrplan einhält</i>
Maintainability		Instandhaltbarkeit	<i>Ein Maß dafür, wie viel Zeit für die Instandhaltung eines Zuges benötigt wird</i>
Safety		Sicherheit	<i>Beschreibt, wie sicher ein Zug im Betrieb Passagiere befördern kann</i>

Tabelle 2-1: Begriff RAMS (deutsch/englisch)

Im ersten Teil der Norm werden noch viele weitere Begriffe definiert und erwähnt, die in dem Zusammenhang relevant sind. Dabei verweist er auf zahlreiche weitere Normen. Das Dokument stellt einen grundlegenden Standard für das gesamte RAMS – Management über den gesamten Lebenszyklus von Schienenfahrzeugen dar. Es handelt sich um einen sehr methodischen Ansatz auf Systemebene und ist dabei unabhängig von der verbauten Technologie in den Fahrzeugen. In dem Dokument werden keine spezifischen Ziele, Quantitäten oder Lösungen angegeben. Es handelt sich also um ein allgemeingültigen RAMS – Prozess, der sich zusätzlich mit den allgemeinen Inhalten der Norm ISO 9001:2015 (Abschnitt 2.7) deckt. Die Erstausgabe des Dokuments ist 1995 erschienen und hat sich in den letzten Jahren stets weiterentwickelt.

In der Norm werden mögliche Einflussfaktoren für die Verfügbarkeit (Availability) und Sicherheit (Safety) strukturiert dargestellt (Abbildung 2-3). Diese teilen sich in

- Systembedingungen (System Conditions),
- Betriebsbedingungen (Operating Conditions) und
- Instandhaltungsbedingungen (Maintenance Conditions).

Man erkennt also, dass eine Vielzahl an Faktoren die Zuverlässigkeit und auch die Verfügbarkeit beeinflussen können. Auch eine Abhängigkeit dieser Faktoren untereinander ist ersichtlich. Somit ist eindeutig, dass das Erreichen von hoher Zuverlässigkeit eines Schienenfahrzeuges eine komplex zu lösende Aufgabe ist.

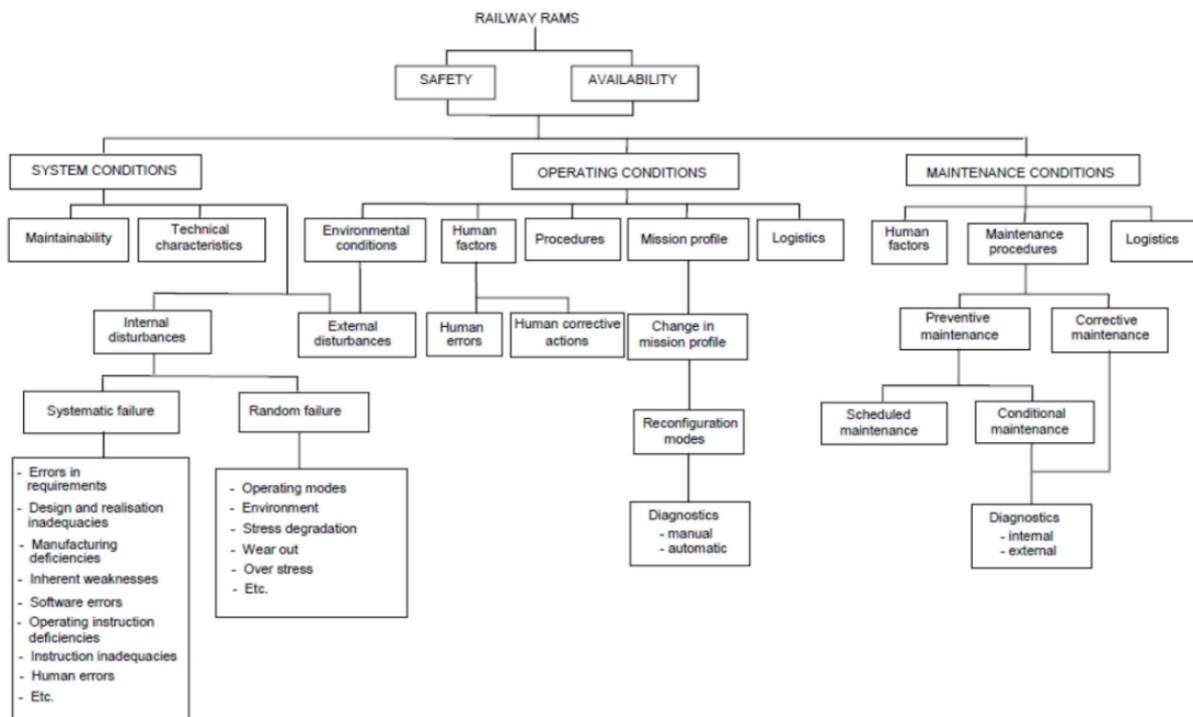


Abbildung 2-3: Einflussfaktoren von RAMS [1, S. 29]

Die Norm gibt jedenfalls eine Strukturierung dieser Einflüsse an, um Übersicht zu schaffen. Die *Betriebsbedingungen (Operating Conditions)* sind vom Hersteller nicht zu beeinflussen, aber dafür die *Instandhaltungsbedingungen (Maintenance Conditions)* und

Systembedingungen (System Conditions). Interessant ist, dass der *menschliche Faktor (Human Factor)*, neben logistischen Einflüssen stets eine wichtige Rolle einnimmt.

Wesentlich bei den Systembedingungen ist auf jeden Fall die Unterscheidung zwischen

- **Zufälligen Fehlern (Random Failure):** Spontan auftretende Fehler, die nur statistisch beschreibbar sind, und
- **Systematischen Fehlern (Systematic Failure):** Fehler, die aus menschlichem Fehlverhalten resultieren und unter bestimmten Bedingungen auftreten und deshalb stimulierbar sind.

Eine detailliertere Beschreibung zu den Fehlerarten befindet sich dazu in Abschnitt 3.8. Die Definitionen von Instandhaltungstätigkeiten und Fehlerarten werden im Kapitel 3 näher erläutert.

Herzstück der *EN 50126-1:2017* ist die Darstellung des RAMS – Management – Prozesses, angelehnt an das V – Modell für die Entwicklung von technischen Produkten. Startend von links oben werden folgende Phasen durchlaufen (Abbildung 2-4):

- 1 Konzept (Concept)
- 2 Systemdefinition & Betriebsbedingungen (System definition and operational context)
- 3 Risikoanalyse und Evaluation (Risk analysis and evaluation)
- 4 Spezifikation der Systemanforderungen (Specification of system requirements)
- 5 Architektur & Zuteilung der Systemanforderungen (Architecture & apportionment of system requirements)
- 6 Design und Implementierung (Design and implementation)
- 7 Produktion (Manufacture)
- 8 Integration (Integration)
- 9 Systemvalidierung (System validation)
- 10 Systemakzeptanz (System acceptance)
- 11 Betrieb, Wartung und Monitoring (Operation, maintenance, performance monitoring)
- 12 Entsorgung (Decommissioning)

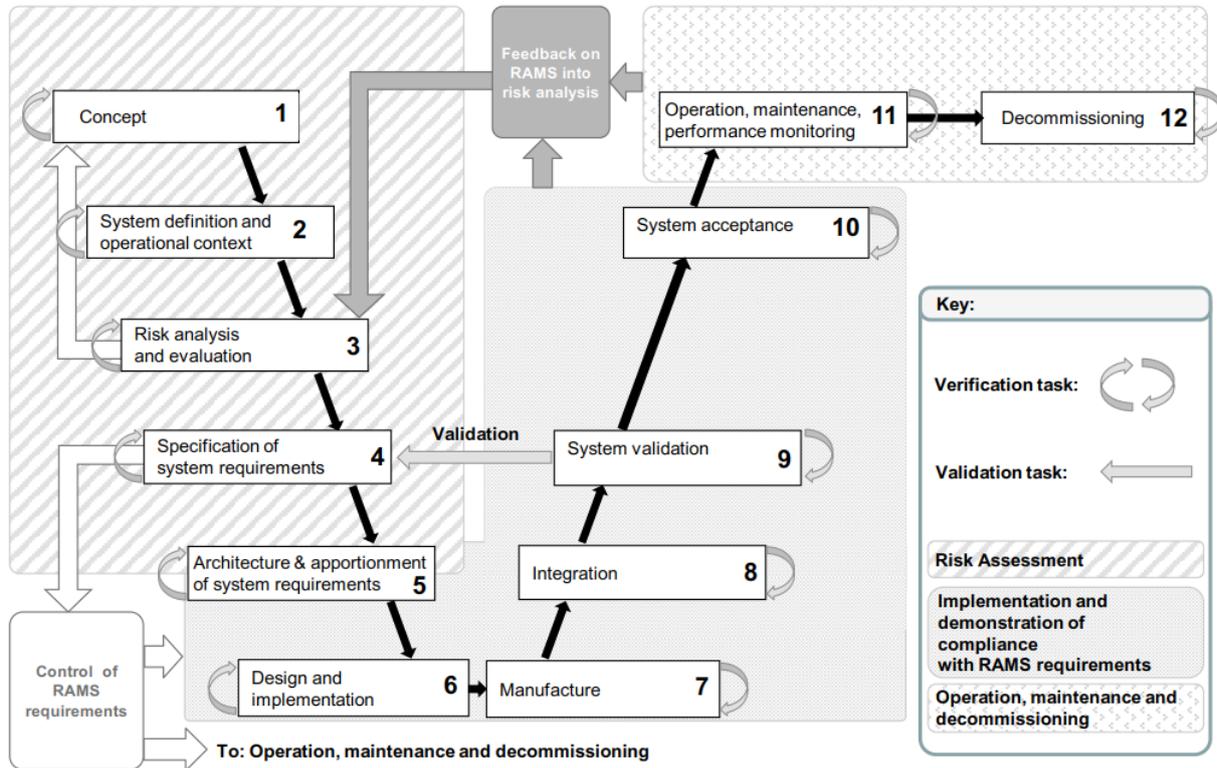


Abbildung 2-4: RAMS - Management V – Zyklus [1, S. 39]

Aus der Risikoanalyse folgen dann technische Spezifikationen für das Gesamtsystem, welche im Schritt 5 dann auf die jeweilige (Zug-)Architektur und die Subsysteme aufgeteilt werden. Das kann anhand von den Komponenten zugeordneten erlaubten Ausfallwahrscheinlichkeiten oder Fehlerraten geschehen. Nach dem Design, Produktion und der Integration (Schritte 6 – 8), wird validiert (Schritt 9), ob das System auch wirklich die Anforderungen der Spezifikationen aus Schritt 4 erfüllt.

Um Fehler vorzubeugen und zu überprüfen, ob in den einzelnen 12 Schritten das Richtige gemacht wurde, wird nach jedem einzelnen Schritt eine Verifizierung durchgeführt. Dieser bezieht sich jedoch nur auf die jetzige Phase. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, Feedback aus den späteren Schritten wieder in die Risikoanalyse miteinfließen zu lassen. Somit ist dieses V – Modell nicht als ausschließlich starr und unidirektional zu sehen, sondern als dynamisches, lebendes Modell.

Die Norm ist die Grundlage für den internen Siemens – RAM/LCC – Prozess und die Erfüllung dieser Norm wird zusätzlich vom Großteil der Kunden gefordert. Sie gibt dem Hersteller vor, wie er seinen RAM – Prozess zu gestalten hat, denn der Kunde verlässt sich auf eine korrekte Implementierung der in der Norm beschriebenen Methodik und Vorgehensweise und kann dies auch durch einen Gutachter prüfen lassen. Somit ist sie essentiell für die Abwicklung des gesamten RAM/LCC – Prozesses beim Hersteller und muss eingehalten werden.

2.2 Zuverlässigkeitsmanagement

Der Titel der Norm *DIN EN 60300-1:2015* lautet **Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 1: Leitfaden für Management und Anwendung**.

In dieser Norm geht es grundsätzlich um Zuverlässigkeitsmanagement. Es werden also Rahmenbedingungen für das Erreichen von Zuverlässigkeitszielen angegeben. Diese Bedingungen umfassen sämtliche notwendigen Prozesse, die hinsichtlich Zuverlässigkeit durchlaufen werden.

Der Begriff der Zuverlässigkeit wird in dieser Norm als übergeordneter Begriff dargestellt. Im Englischen wird dieser Begriff auch *Dependability* genannt. Dabei geht es nicht nur um die in Zahlen ausdrückbare Zuverlässigkeit eines Systems, wie in der *DIN EN 50126-1:2017* (siehe Abschnitt 2.1) beschrieben wird, sondern viel mehr um die „Fähigkeit einer Einheit, sich bei und nach Aufforderung wie gefordert zu verhalten“. Die Zuverlässigkeit wird hier also als eine Art Qualitätskriterium betrachtet und umfasst dabei Merkmale wie Verfügbarkeit, Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Unterstützbarkeit unter gegebenen Bedingungen. Es wird weiters als „Maß, zu dem man Vertrauen in eine Sache haben kann, sich wie erwartet zu verhalten“ beschrieben. Hier werden noch Gefährdungen (engl.: *Threats*) genannt, die auch später in dieser Arbeit noch behandelt werden (siehe Abschnitt 5.3). Die vier Mittel (engl.: *means*) werden eingesetzt um die Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Um diese Beschreibung bildlich darzustellen, wird der *Dependability Tree* erwähnt, der sich in der Literatur wiederfindet (siehe Abbildung 2-5).

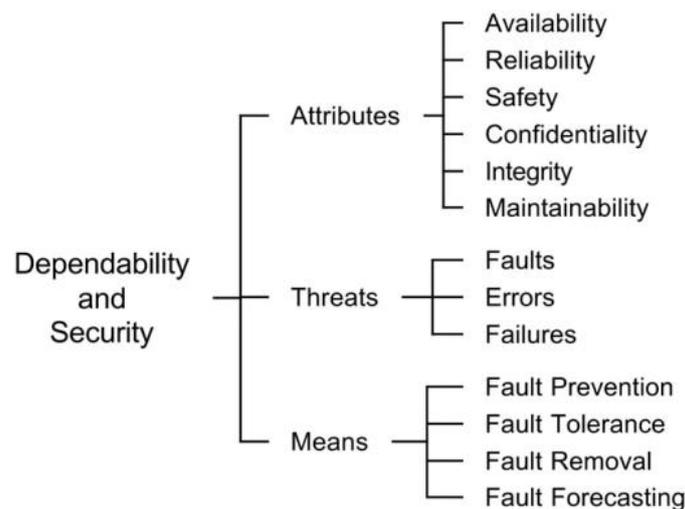


Abbildung 2-5: *Dependability Tree* [10, S. 4]

Zuverlässigkeit hat eine starke Wirkung darauf, wie ein Nutzer den Wert einer Organisation oder eines Systems empfindet. Es kann sich demnach also auch nachteilig auf die herstellende Organisation auswirken und deren Ruf schädigen.

Das in dieser Norm beschriebene *Zuverlässigkeitsmanagement* ist eine systematische Vorgehensweise der Behandlung zuverlässigkeitsbezogener und anderen zugehörigen Themen aus unternehmerischer Sicht. Das Zuverlässigkeitsmanagement wird als ein Schlüsselement von vielen anderen Managementsystemen einer Organisation beschrieben, welches hinsichtlich vieler angrenzender Themen (Anlagewerte, Finanzen, Qualität...) eine wesentliche Rolle spielt. Durch ein systematisches Vorgehen und durch Klarstellung der Beziehungen der Prozesse untereinander soll ein Erreichen der Zuverlässigkeitsziele gewährleistet werden.

Die Abbildung 2-6 gibt die Beziehungen der Zuverlässigkeit zu den Interessen der Stakeholder und den Anforderungen an das System (oder auch: Einheit) an. Die Anforderungen leiten sich aus den gewünschten Aufgaben der Einheit ab. Diese können unterteilt werden in funktionale Vorgaben, sonstige Vorgaben (zum Beispiel: Umweltverträglichkeit, Wirksamkeit...), aber auch Zuverlässigkeitsanforderungen. Die Anforderungen stehen in Wechselwirkungen untereinander. Hier fungieren die Zuverlässigkeitsanforderungen auch als wesentliche Taktgeber für die funktionalen und sonstigen Vorgaben an die Einheit. Ohne funktionale oder andere Vorgaben gibt es auch keine Zuverlässigkeitsanforderungen.

Die beschriebene Norm ist wesentlich für Zuverlässigkeitsmanagement, denn sie gibt das systematische Gerüst für Zuverlässigkeitsbetrachtungen vor und beschreibt die Wechselwirkung zwischen Funktion und Fehler von Systemen und deren Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit.

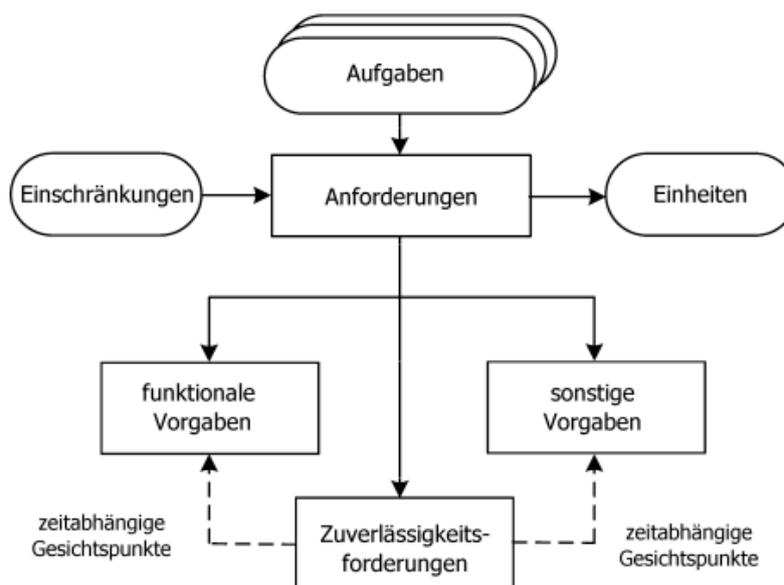


Abbildung 2-6: Bedürfnisse und Anforderungen an eine Einheit [2, S. 11]

2.3 Betriebssichererer Zustand

Der Titel der Norm *DIN 27200:2011* lautet **Zustand der Eisenbahnfahrzeuge – Grundsätze und Begriffe für den betriebssicheren Zustand**.

Die gesamte Normenreihe *DIN 27200 ff.* beinhaltet die Definition des Zustands für das sichere Betreiben von Eisenbahnfahrzeugen. Technische Sollzustände von den relevanten Komponenten werden in einer Vielzahl an Dokumenten angegeben. Zusätzlich dazu werden auch Mindestanforderungen an Instandhaltung und Prüfverfahren beschrieben, um stets den Sollzustand erreichen zu können.

Diese Normenreihe stellt also eine unumgängliche Standardliteratur für Schienenfahrzeughersteller dar. Hier eine Übersicht (Tabelle 2-2), welche dem *Beiblatt 1* [11] zur *DIN 27200:2011* entnommen wurde. Jede der Dokumente gliedert sich wiederum in mehrere Teile. Dabei ist deutlich zu erkennen, wie wichtig sicherheitsrelevante Bauteile, wie zum Beispiel die Bremse, oder die Leittechnik sind. Das Normenwerk ist auch eine Grundlage für die Zulassung der Fahrzeuge in den verschiedenen europäischen Ländern.

DIN – Nummer	Titel		Teile
DIN 27200	Zustand der Eisenbahnfahrzeuge	Grundsätze und Begriffe für den betriebssicheren Zustand	1
DIN 27201		Grundlagen und Fertigungstechnologien	13
DIN 27202		Fahrzeugaufbau und Sondereinrichtungen	10
DIN 27203		Fahrgastraum	14
DIN 27204		Fahrwerk	9
DIN 27205		Bremse	12
DIN VDE 0119-206		Elektro-Traktionsanlagen, Zulelektrik	7
DIN VDE 0119-207		Leittechnik	16

Tabella 2-2: Gesamtwerk DIN 27200:2011 [11]

2.4 Zuverlässigkeitswachstum

Der Titel der Norm *DIN EN 61014:2004* lautet **Programme für das Zuverlässigkeitswachstum (IEC 61014:2003)**.

Die Norm stellt eine Übersicht über die Thematik *Zuverlässigkeitswachstum* dar. Im Speziellen sollen Hardware- oder Software – Schwachstellen beseitigt werden, die diesen Effekt hemmen. Dabei werden auch Vorgehensweisen für eine Einbettung eines Zuverlässigkeitswachstumsprogramms in den „regulären“ Entwicklungs- und Prüfprozess eines Produktherstellers angegeben. Zuverlässigkeitswachstum soll dann durch ein integral eingerichtetes Managementsystem erreicht werden. Dabei können verschiedene mathematische Modelle angewandt werden. Je früher Schwachstellen erkannt und beseitigt werden, desto kosteneffizienter stellt sich das Vorhaben dar.

Die Norm unterscheidet systematische und nicht – systematische Schwachstellen. Laut ihr können nur systematische Schwachstellen beseitigt werden, da diese deterministisch nachvollziehbar sind und deshalb berücksichtigt werden können. Sie sind ausschließlich menschlichen Ursprungs und entstehen häufig bei Neuentwicklungen, hoher Komplexität, knappen Finanzmitteln oder anderen ähnlichen Einflüssen. Nicht – systematische Schwachstellen hingegen können an einem zufälligen Zeitpunkt auftreten und sind oft nicht reproduzierbar oder stimulierbar. Es handelt sich dabei um eine unkontrollierte Zufallsabweichung. Sie treten per definition nur an Hardwarekomponenten auf. Softwarefehler sind immer systematisch und können immer vorausgesagt werden.

Grundsätzlich gibt die Norm an, dass Zuverlässigkeitswachstum entweder in der Entwurfsphase eines Projekts oder durch Prüfmaßnahmen erreicht werden kann. Anhand mathematischer Modelle (Abschnitt 5.1) kann prognostiziert werden, wie eine solche erreichbare Zuverlässigkeit aussehen könnte. Eine solche Modellerstellung basiert auf Verbesserungen, die in den Entwürfen oder in der Prüfungsphase noch eingearbeitet werden. So kann schrittweise über die Zeit hinweg Zuverlässigkeitswachstum entstehen.

Die Analogie beim Prüfen besteht darin, dass Ausfälle, die am wahrscheinlichsten sind, am frühesten vorkommen und auch am ehesten vermindert werden können. So ergeben sich laut Norm ähnliche mathematische Prognosen, die sich im verwendeten Potenzgesetzmodell widerspiegeln (Abbildung 2-7). Wichtig beim Prüfen ist jedoch, dass die Prüfumgebungen möglichst gleich den tatsächlichen Bedingungen eingestellt sein sollten. Je sorgfältiger man prüft, desto näher ist man an der Realität dran.

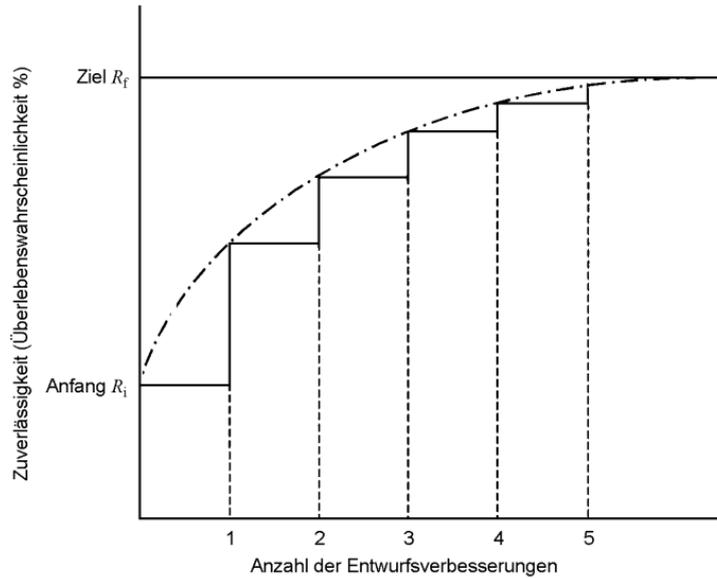


Abbildung 2-7: Zuverlässigkeitswachstum durch schrittweise Verbesserung [4, S. 19]

Egal ob das Zuverlässigkeitswachstum in der Entwurfsphase oder später erreicht werden soll, unabdingbar ist dabei ein systematisches Vorgehen. Da kein Projekt dem anderen gleicht, soll ein Zuverlässigkeitswachstumsprogramm im Entwicklungsprozess umgesetzt werden, welches sämtliche Maßnahmen, Prüfungen und Dokumentationen kontrolliert und steuert (Abbildung 2-8). Die Norm teilt das grundsätzliche Vorgehen in drei Schritte: Vorbereiten – Prüfen – Berichten. Dabei werden Mitarbeiter aus verschiedenen Positionen und Kompetenzen mit-eingebunden.

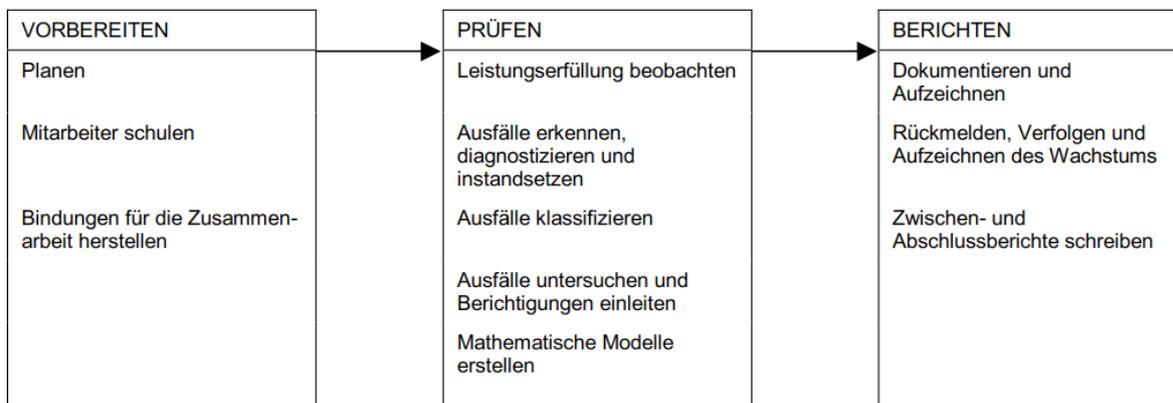


Abbildung 2-8: Managementaspekte Zuverlässigkeitsprogramm [4, S. 21]

Die *DIN EN 61014:2004* stellt also eine sehr allgemeingültige, verständliche und leicht nachvollziehbare Beschreibung von Zuverlässigkeitswachstum, beziehungsweise einer Implementierung eines Zuverlässigkeitswachstumsprogramms dar. Sie ist integraler Bestandteil dieser Arbeit, denn sie gibt das logische Vorgehen hinsichtlich Zuverlässigkeitswachstumsprogrammen vor und gibt somit die Richtung für die Erstellung eines optimalen Zuverlässigkeitswachstumsmodells vor.

2.5 Statistische Prüf – und Schätzverfahren

Der Titel der Norm *DIN EN 61164:2004* lautet **Zuverlässigkeitswachstum – Statistische Prüf- und Schätzverfahren**.

Nach der Auflistung wichtiger Begriffe hinsichtlich Zuverlässigkeitswachstum und deren statistischer Beschreibung werden Zuverlässigkeitsmodelle in Entwicklung und Prüfung beschrieben. Die Norm enthält Einzelheiten zu Modellen, die verwendet werden um Zuverlässigkeitswachstum zu messen. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um mathematische Modelle, die in drei Kategorien unterschieden werden können (Tabelle 2-3).

Grundsätzlich wird zwischen Modellen für die **Entwicklungsphase** und Modellen für die **Prüfungsphase** eines Systems unterschieden. Für die Entwicklungsphase können so Anzahl und Größenordnung der notwendigen Änderungen am technischen System geschätzt werden. In der Prüfungsphase kann ein passendes Modell etwa die Prüfdauer von Bauteilen voraussagen, um ein Zuverlässigkeitsziel zu erreichen.

Eine wichtige Definition sind auch *Typ – I* und *Typ – II* Tests. Bei den ersteren handelt es sich um durch einen Zeitablauf beendete Prüfung. Beim zweiten handelt es sich hingegen um einen durch eine bestimmte Ausfallzahl beendete Prüfung.

Weiters wird zwischen **kontinuierlicher** und **diskreter** Kategorie unterschieden. Die kontinuierliche Einteilung bezieht sich auf instandsetzbare Einheiten, also Einheiten im Dauerbetrieb. Im Gegensatz dazu beschreibt die diskrete Kategorie einen Erfolg oder Ausfall, zum Beispiel Bauteile zur einmaligen Verwendung. Des Weiteren kann noch ein klassischer Ansatz gewählt werden, der sich nur auf tatsächlich beobachtete Daten bezieht, oder aber ein Bayes-scher Ansatz, der zusätzlich empirische Daten aus dem Ingenieurwesen hinzuzieht.

Modellart		Zeit	
		kontinuierlich (Zeit)	diskret (Anzahl Versuche)
Entwicklung	klassisch	Modifiziertes Potenzgesetzmodell	-
	nach Bayes	Modifiziertes Bayes'sches IBM – Rosner – Modell	-
Prüfung	klassisch	Kontinuierliches Zuverlässigkeitswachstumsmodell	Diskretes Zuverlässigkeitswachstumsmodell
	nach Bayes	-	-

Tabelle 2-3: *DIN EN 61164:2004 Kategorien Wachstumsmodelle [5, S. 12]*

Die Norm besagt, dass es wenige geprüfte Berichte über verwendete Zuverlässigkeitswachstumsmodelle gäbe. Es sei immer ein Kompromiss aus Realität und Einfachheit. Nach Beschreibung der vier Modelle werden umfangreiche Beispiele im Anhang des Dokuments angegeben, die Aufschluss über die konkrete Verwendung der Modelle liefern. Zusätzlich sind in der Norm Wachstumsprüfungen und Schätzungsverfahren von Parametern angegeben, um von aktuellen Ausfalldaten auf die zu erreichenden Werte zu schließen. Dies ist essentiell, um kontrollieren zu können, ob die im Zuverlässigkeitswachstumsprogramm definierten Ziele auch eingehalten werden. Des Weiteren gibt die Norm noch Verfahren für die Anpassungsprüfung und Ermittlung von Vertrauensbereichen für die diversen Parameter an. Somit bildet die Normen einen integralen Bestandteil für die vorliegende Arbeit.

Diese Norm gibt die Zuverlässigkeitswachstumsmodelle inklusive Schätzverfahren an und fließt somit direkt in die Modellerstellung und den Use – Case dieser Arbeit ein. Die mathematischen Modelle werden detailliert in Abschnitt 5.1 beschrieben.

2.6 Risikomanagement

Der Titel der Norm *ISO 31000:2018* lautet **Risikomanagement - Leitfaden**.

Da bei sämtlichen firmeninternen Prozessen und menschlichen Handlungen das Risiko besteht, dass Fehler auftreten, muss ein Managementsystem eingeführt werden, dass nicht nur auf technischer Ebene agiert, sondern auch ein übergeordnetes, unternehmensweites Tool darstellt. Nach der *ISO 31000:2018* ist Risiko der „Effekt von Unsicherheit bei der (Erreichung) von Zielen“. Bei der Verfolgung von gewissen Zielen (Beispiel: „0-Fehler“) können also immer Unsicherheiten (Fehler) auftreten, welche sich in einem vom definierten Ziel abweichenden Resultat zeigen. Die *ISO 31000:2018* soll dies durch geeignete Maßnahmen und Kontrolle verhindern (Abbildung 2-9).

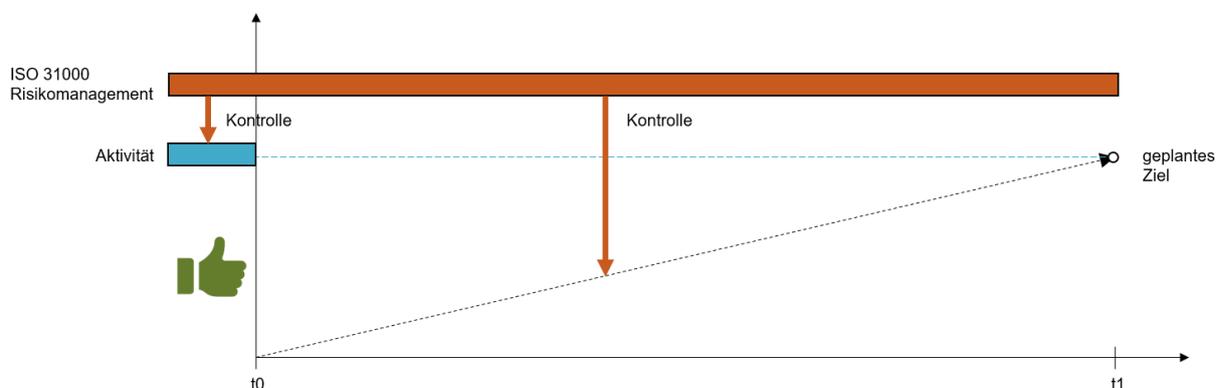


Abbildung 2-9: ISO 31000:2018 Kontrollfunktion

Die Norm gliedert sich dabei in drei Teile, die zusammen ein Risikomanagementsystem bilden (Abbildung 2-10).

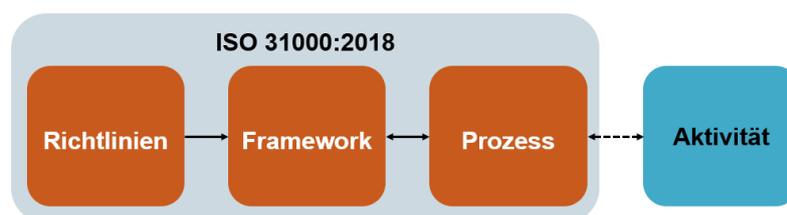


Abbildung 2-10: Teile der ISO 31000:2018

- Der Risikomanagement – **Prozess** stellt dabei die eigentliche „Kontrolle“ der zu beobachtenden Aktivität dar. Er bildet also das Kernstück der *ISO 31000:2018* und gliedert sich im Wesentlichen in drei Teile (Abbildung 2-11). Zu allererst sind der Kontext und die Kriterien zu definieren, für die das Risikoassessment durchgeführt werden soll. Dieses besteht dann aus der Risikoidentifikation (Risiken erkennen und beschreiben), Risikoanalyse (Ermittlung der Auswirkungen und eventuelle Gegenmechanismen), sowie der Risikoevaluierung (Kategorisierung der Risikofolgen).

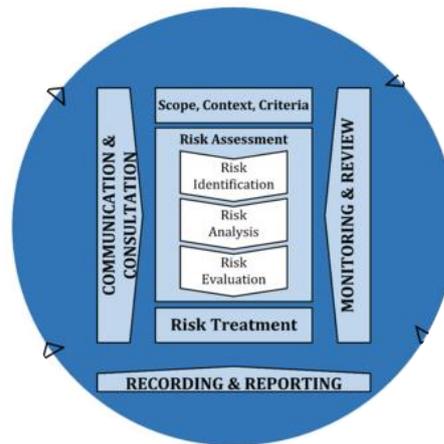


Abbildung 2-11: ISO 31000:2018 Prozess [6]

- Das **Framework** gibt Hilfestellung für die Implementierung des Risikomanagementprozesses und ein unternehmensweites Risikomanagement (Abbildung 2-12). Die Ziele dabei sind eine ständige Weiterentwicklung und Verbesserung des Risikomanagementprozesses, sowie eine optimale Einbettung in die firmenweiten Organisationsstrukturen. Risikomanagement soll also „gelebt“ werden. Das Framework ist ein Deming – Zyklus [12, S. 41], der auch PDCA (Plan – Do – Check – Act) genannt wird und nach kontinuierlicher Verbesserung strebt.



Abbildung 2-12: ISO 31000:2018 Framework [6]

- Die **Richtlinien** geben allgemein gültige Ansätze für ein firmenweites Risikomanagement an (Abbildung 2-13). Sie können stets bedacht und angewandt werden und stellen eine sehr wertvolle Hilfestellung dar. Sie sollen die Qualität und die Wertschöpfung des Risikomanagementsystems steigern.

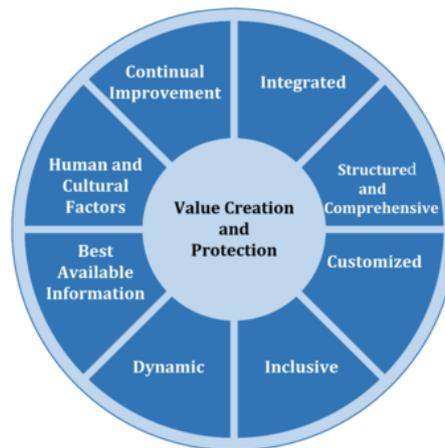


Abbildung 2-13: ISO 31000:2018 Richtlinien [6]

Die ISO 31000:2018 stellt ein sehr effizientes und gut ausformuliertes Dokument dar, welches eine Einbettung eines firmenweiten Risikomanagementsystems beinhaltet. Die drei Pfeiler *Prozess*, *Framework* und *Richtlinien* liefern die Werkzeuge für eine Implementierung, ständige Weiterentwicklung und Verbesserung. Die Norm kann zusätzlich wesentlich dazu beitragen, den Erfolg eines Unternehmens zu steigern.

Sie findet Eingang in diese Diplomarbeit, da sie, wie in Abbildung 2-9 gezeigt, jegliche Risiken, welche bei Aktivitäten in einem Unternehmen überwacht und kontrolliert. Dies trifft auch für den RAM – LCC Prozess zu.

2.7 Qualitätsmanagement

Der Titel der Norm ISO 9001:2015 lautet **Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen**.

Kernanliegen der Norm ist, Qualität messbar und vergleichbar zu machen. Sie legt die Anforderungen an ein Qualitätsmanagementsystem (Begriffdefinitionen in DIN EN ISO 9000) und zählt zu den Verfahrensnormen. Sie übt wie viele andere Normen einen (freiwilligen) Zwang aus und wirkt „stärker als Gesetze: Wer sie nicht befolgt, den bestraft der Markt.“ [13, S. 1]

Die Norm richtet sich nachfolgenden Zielen aus [14]:

- Durch ein effektives Qualitätsmanagement (QM) – System mit effizienten Prozessen und dessen ständiger Bewertung eine nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit zu schaffen und aufrecht zu erhalten.
- Verbesserungen am QM – System ständig und systematisch zu planen, umzusetzen, zu bewerten und zu verbessern.
- Dass sich die Organisation immer wieder mit eigenen Fehlern, Schwachstellen und Verschwendung auseinandersetzt, um Ursachen nachhaltig abzustellen.

Das Dokument bleibt weitestgehend unspezifisch in seinen Forderungen. Es gibt keine klaren Prozessvorgaben oder Tools, welche beschrieben werden. Wichtig zu erwähnen ist, dass nicht das Produkt oder die Dienstleistung eines Unternehmens hinsichtlich ihrer Qualität beurteilt wird, sondern der Ablauf, beziehungsweise die Aufbauorganisation eines Unternehmens.

Der QM – Kernzyklus ist ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess. Die Geschäftsleitung gibt die Festlegung der Qualitätspolitik und Qualitätsziele vor. Dabei handelt es sich um übergeordnete Absichten und Ausrichtungen einer Organisation.

Im nächsten Schritt, der Qualitätsplanung, werden Schritte festgelegt, die zum Erreichen der Qualitätsziele notwendig sind. Dazu gehört auch eine Ressourcenzuordnung, Auswählen der Qualitätsmerkmale und Konkretisierung der Qualitätsforderungen.

Die Qualitätslenkung (Betrieb) ist das Controlling der Maßnahmen zur Erreichung der Qualitätsziele. Sie ist das Überwachungsglied, welches IST – Zustände mit den geplanten SOLL – Zuständen vergleicht und bei Fehlern oder Abweichungen weitere Maßnahmen einleitet. Anschließend können Verbesserungen der Prozesse vorgenommen werden. Wenn ein Output nicht den Qualitätszielen entspricht, können hier Vorgänge und Abläufe angepasst werden. Somit soll eine ständige Steigerung der Verbesserung erreicht werden [15, S. 123]

Die Norm ist insofern für diese Arbeit relevant, als dass sie übergeordnete Qualitätsgedanken vertritt und festlegt. Zuverlässigkeitsmanagement steht sehr stark in Wechselwirkung mit Qualitätsmanagement, denn ein ausgereiftes und funktionierendes Qualitätsmanagement verbessert auch die Zuverlässigkeit von Produkten.

2.8 Umweltmanagement

Der Titel der Norm *DIN EN ISO 14001:2015* lautet **Umweltmanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung**.

Ziel der Einbettung eines Umweltmanagementsystems ist eine Verbesserung der Umweltleistung eines Betriebs. Dabei sollen relevante Gesetze, Auflagen und betriebliche Vorschriften eingehalten werden. Staaten und Regionen geben meist solche Schriften heraus und sorgen so für gewissen Rahmenbedingungen, in dem Betriebe wirtschaften. Um Verbesserungsziele hinsichtlich Umweltaspekten überhaupt erst einmal formulieren zu können, ist es notwendig, dass Tätigkeiten, Leistungen und Prozesse in einem Betrieb analysiert und systematisch bewertet werden.

Die vorliegende Norm *DIN EN ISO 14001:2015* fordert eine qualitative Verbesserung, anstatt einer quantitativen Verbesserung hinsichtlich der Umweltleistung eines Betriebs. Dieser Umstand wird in der Literatur als Mangel gesehen [16, S. 88]. Dennoch wird die Norm herangezogen, um Verbesserung zu erreichen. Anhand eines Deming – Zyklus, der eine kontinuierliche Steigerung vorgibt, können Umweltziele festgelegt, geplant und verfolgt werden. In jedem Fall kann also eine Optimierung erreicht werden.

Das Dokument beinhaltet fünf wesentliche Grundsätze, die im Zyklus (Abbildung 2-14) enthalten sind [16].

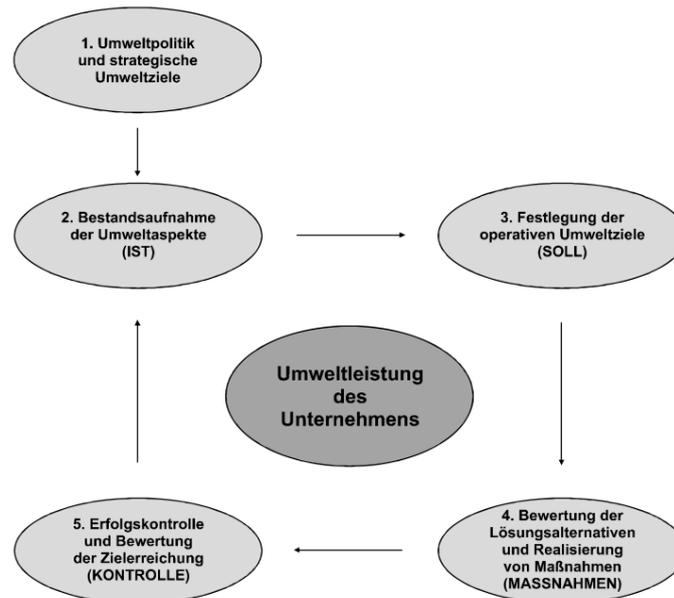


Abbildung 2-14: Deming – Zyklus ISO 14001:2015 [16, S. 89]

Grundlegend für ein optimales Umweltmanagementverfahren ist die strategische und politische Ausrichtung eines Unternehmens. Die strategischen Ziele und Ausrichtung des Unternehmens stellen den Grundstein für ein erfolgreiches und nachhaltiges Programm dar. Sie bestimmt den eigentlichen Grund und die Motivation für ein solches System.

Nach Implementierung und Umsetzung der Maßnahmen kann nach einem geeigneten Zeitraum an eine Kontrolle der Erreichung der Ziele gedacht werden. Dabei können Audits oder interne Überprüfungen herangezogen werden. Wenn sich Verbesserungen eingestellt haben, hat man das Ziel vorerst erreicht.

Das Umweltmanagementsystem ist relevant für den RAM/LCC – Prozess. Durch Zuverlässigkeitseinbußen kann auch die Umwelt gefährdet werden. Schädigende Schmiermittel etwa, die durch technische Fehler nach außen gelangen können und Umwelt oder Tiere beeinträchtigen, stellen ein Risiko dar. Auch solche Szenarien sollten von den Ingenieuren mit in Betracht gezogen werden.

2.9 Sicherheit und Gesundheit

Der Titel der Norm **Managementsysteme für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung**.

Die Norm hat das Ziel, Mitarbeiter, Besucher und Leiter von Unternehmen hinsichtlich ihrer Gesundheit und Sicherheit zu schützen. Keine Person soll zu Schaden kommen. Dafür gibt es den Ansatz eines Arbeitsschutzmanagementsystems (AMS). Dieses soll einen systematischen Ansatz für Unternehmen liefern. Dabei werden sämtliche Bedingungen und Faktoren betrachtet, die die Sicherheit und Gesundheit von Menschen am Arbeitsplatz beeinflussen kann. In der Norm werden die Anforderungen an solch ein System angegeben.



Abbildung 2-15: ISO 45000:2018 Zyklus [17]

Prinzipiell handelt es sich dabei wieder um einen Deming – Zyklus. Er soll eine kontinuierliche Verbesserung von Prozessen und Vorgängen erreichen. Die Norm gibt hierfür eine Grundlage an (Abbildung 2-15). Nach der Identifikation (1) der Prozesse und Vorgänge wird ermittelt, welche Aktivitäten für die Mitarbeiter und Personen an den Arbeitsplätzen Risiken bergen (2). Anschließend werden Maßnahmen getroffen, die diese Risiken mindern und den Arbeiter davor schützen (3). In der Ausführungsphase (4) wird ständig beobachtet und kontrolliert, ob sämtliche Maßnahmen zum Schutz der Personen korrekt ausgeführt werden und ob Fehler oder andere Abweichungen auftreten. Diese Erkenntnisse werden dann in einem Verbesserungsschritt (5) umgesetzt, um den Kreis zu schließen [17].

Die Norm steht im engen Zusammenhang mit Zuverlässigkeitsbetrachtungen, da bei Wartung oder Instandhaltungstätigkeiten Menschen an großen Maschinen arbeiten und stets gewährleistet sein muss, dass Komponenten leicht zugänglich für die Arbeiter sein müssen. Die Mitarbeiter sollen bei Wartungsarbeiten nie in gefährliche oder gesundheitsgefährdende Situationen gelangen. Das muss im Zuge der Zuverlässigkeitsanalysen überprüft und sichergestellt werden.

3 Zuverlässigkeit & Definitionen

In diesem Kapitel sollen grundlegende Definitionen, allgemeingültige Vorgehensweisen und Praktiken definiert und festgehalten werden. Dies ist wichtig, um eine Basis für die nachfolgenden Betrachtungen in den später folgenden Kapiteln zu haben.

3.1 Zuverlässigkeit (Überlebenswahrscheinlichkeit)

Die *Zuverlässigkeit* (auch: *Überlebenswahrscheinlichkeit*) gibt die *Wahrscheinlichkeit* an, mit der ein Produkt

- die geforderte Funktion,
- unter gegebenen Bedingungen,
- über einen betrachteten Zeitraum erfüllt [18, S. 2].

Somit kann die Zuverlässigkeit einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen. Als mathematisches Symbol wird $R(t)$ angegeben. Das „R“ steht in diesem Zusammenhang für den englischen Begriff *Reliability*. Allgemein definiert wird die *Überlebenswahrscheinlichkeit* $R(t)$ als

$$R(t) = \frac{n(t)}{n_0} \quad (3-1)$$

mit $n(t)$ als ausfallfreie Einheiten zum Zeitpunkt t und dem Anfangsbestand $n_0(t_0)$ definiert.

Voraussetzung für diese Betrachtung ist, dass sich zum Zeitpunkt t_0 sämtliche Einheiten in einem funktionsfähigen Zustand befinden [19, S. 52]. Es gibt verschiedene Lebensdauererwartungen, anhand denen die Charakteristik der *Überlebenswahrscheinlichkeit* beschrieben werden kann.

Um ein Beispiel angeben zu können, wurde die *Überlebenswahrscheinlichkeit* des Menschen (Abbildung 3-1) gewählt. Die Kurve zeigt, dass $R(t)$ von 1 zunehmend gegen 0 strebt. Für ein Individuum ist die Wahrscheinlichkeit 76 Jahre alt zu werden, 50 %.

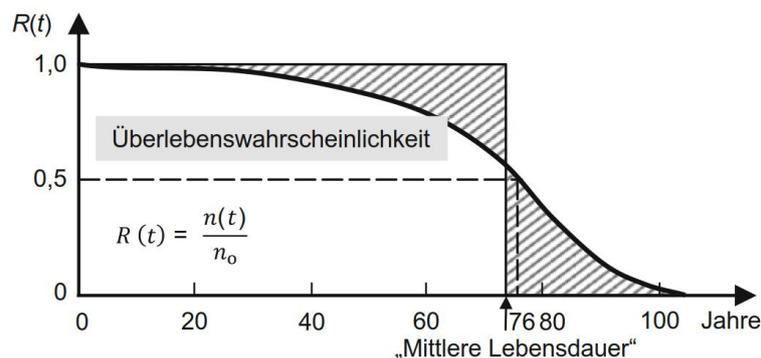


Abbildung 3-1: Überlebenswahrscheinlichkeit [19, S. 53]

Zusätzlich kann noch ein *Mittelwert* m der Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ angegeben werden. Er kann als „mittlere Lebensdauer“ eines Bauteils gesehen werden und wird im Ingenieurwesen auch als *MTBF* (*Mean Time Between Failures*) oder *MTTF* (*Mean Time To Failures*) bezeichnet (siehe Abschnitt 3.6).

$$m = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad (3-2)$$

In dem oben betrachteten Beispiel wäre m gleich 73 Jahre, dabei wäre die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ gleich 55 %. Viele Umwelt- und Betriebsbedingungen können die Zuverlässigkeit beeinflussen. Bei einem Ausfall oder Schaden eines Systems muss die Funktion wiederhergestellt werden [19, S. 53].

3.2 Verfügbarkeit

Die *Verfügbarkeit* (engl.: *Availability*) ist die Eigenschaft eines Produktes, welche die Wahrscheinlichkeit angibt, mit der das System

- zu einem betrachteten Zeitpunkt,
- unter gegebenen Bedingungen,
- eine geforderte Funktion erfüllt [19, S. 68].

$$A = \frac{\text{Gesamtzeit} - \text{Gesamtausfallzeit}}{\text{Gesamtzeit}} \quad (3-3)$$

Sie kann aber auch als das Verhältnis zwischen tatsächlicher und gewünschter Funktion beschrieben werden [18, S. 9]. Die *Verfügbarkeit* kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen.

$$A(t) = \frac{n_t(t)}{n_0} \quad (3-4)$$

$A(t)$ ist also das Verhältnis zwischen der im betrachteten Zeitpunkt t nicht ausgefallenen Einheiten $n_t(t)$ und dem Gesamtumfang der Einheiten n_0 .

Die *Verfügbarkeit* kann als *Dauerverfügbarkeit* auch folgend angegeben werden.

$$A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3-5)$$

Dabei ist *MTBF* (*Mean Time Between Failures*) die durchschnittliche Zeit zwischen auftretenden Fehlern im System und *MTTR* (*Mean Time To Recover/Repair*) die durchschnittliche Reparaturzeit (siehe Abschnitt 3.6).

3.3 Instandhaltung & Instandhaltbarkeit

Die *Instandhaltbarkeit* (engl.: *Maintainability*) ist eine Eigenschaft eines Systems, welche die Wahrscheinlichkeit angibt,

- dass dieses in einem bestimmten Zeitintervall,
- unter gegebenen Bedingungen,
- gewartet oder repariert wird [18, S. 8].

Instandhaltung (engl.: *Maintenance*) sind sämtliche Aktivitäten, die ausgeführt werden können, um ein System wieder in einen (definierten) Zustand zurückzubringen [*Korrektive Instandhaltung*] oder im Sollzustand zu bewahren [*Präventive Maintenance*]. [18, S. 8].

Um ein System also wiederherzustellen werden verschiedene Maßnahmen im Rahmen der Instandhaltung (IH) getroffen. Diese können in folgende Kategorien (Abbildung 3-2) unterteilt werden.

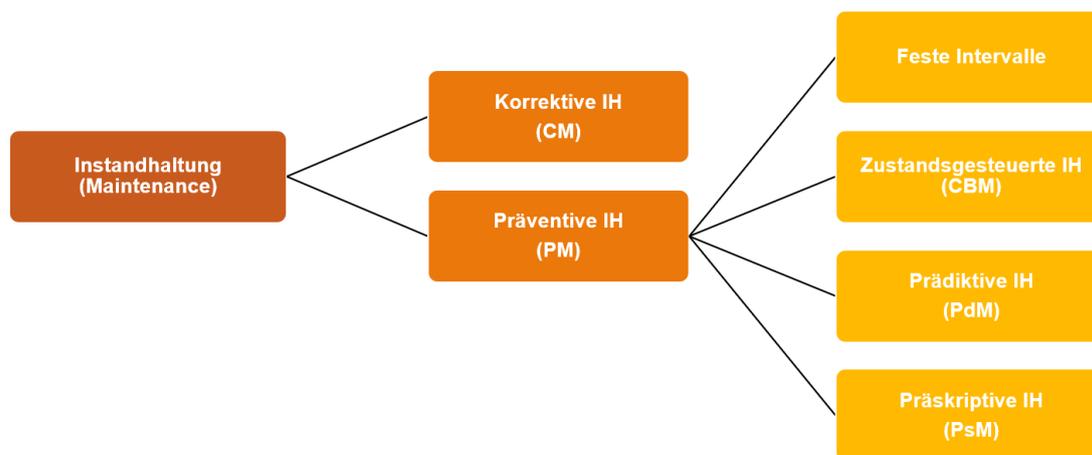


Abbildung 3-2: Instandhaltungsmaßnahmen [20, S. 145]

Korrektive Instandhaltung (engl.: *Corrective Maintenance (CM)*) wird grundsätzlich immer nach Auftreten eines Fehlers im System angewandt. Es gleicht einer Reparatur eines Systems. Üblicherweise wird *CM* für unkritische Bauteile „Run-to-failure“ – Bauteile (Abschnitt 3.8) eingesetzt (z.B. Glühbirne im Fahrgastraum).

Präventive Instandhaltung (engl.: *Preventive Maintenance (PM)*) bezieht sich immer auf Maßnahmen, die vorbeugend vor dem (möglichen) Auftreten eines Fehlers getroffen werden. Das ist im Allgemeinen eine *Inspektion* oder *Wartung* einer Komponente. Dabei ist *PM* in Bezug auf die *Lebenszykluskosten* kostspieliger als *CM*.

Die *präventive Instandhaltung* unterscheidet sich in weiteren Aspekten. Hier wird zwischen

- *festen Intervallen* (etwa nach Zeit oder zurückgelegter Strecke),
- *Zustandsgesteuerter Instandhaltung* (engl.: *Condition-based Maintenance (CBM)*),
- *Prädiktiver Instandhaltung* (engl.: *Predictive Maintenance (PdM)*),
- *Präskriptiver Instandhaltung* (engl.: *Prescriptive Maintenance (PsM)*) unterschieden [21].

In der folgenden Darstellung sind die vier Kategorien von *präventiver Instandhaltung* aufgeführt und dargestellt, wie sich die Zeitpunkte für die geplanten Maßnahmen finden (Tabelle 3-1).

Präventive IH	Findung der Zeitpunkte für Maßnahmen
Feste Intervalle	Definierte Zeit- oder Streckenintervalle
Zustandsgesteuerte IH (CBM)	Erkennung von Funktionsanomalien & Zustandsänderungen der Komponenten durch Sensoren und Maßnahme vor dem Ausfall
Prädiktive IH (PdM)	Erweiterung der Zustandsgesteuerten IH durch statistische Methoden & Real – time – Analysen
Präskriptive IH (PsM)	Systeme diagnostizieren sich selbst und erstellen einen vollautomatisierten und optimierten Wartungsplan

Tabelle 3-1: Präventive IH – Kategorien [21]

3.4 Ausfallwahrscheinlichkeit, Ausfalldichte & Ausfallrate

Die *Ausfallwahrscheinlichkeit* (engl.: *Failure distribution*) ist die Gegenwahrscheinlichkeit zur Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$. Sie wird mit $F(t)$ bezeichnet und berechnet sich wie folgt [19, S. 53].

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (3-6)$$

Die *Ausfalldichte* (engl.: *Failure density function*) $f(t)$ ist die Ableitung der *Ausfallwahrscheinlichkeit* $F(t)$ und gibt also an, wie sich die *Ausfallwahrscheinlichkeit* über die Zeit ändert [19, S. 54].

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (3-7)$$

Für das im vorigen Abschnitt genannte Beispiel der *Überlebenswahrscheinlichkeit* $R(t)$ kann also folgende *Ausfalldichte* $f(t)$ angegeben werden (Abbildung 3-3).

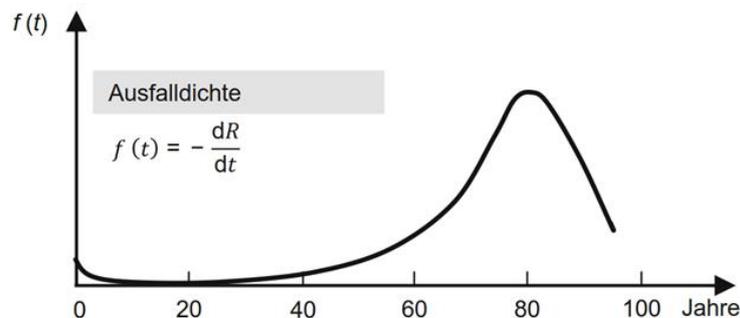


Abbildung 3-3: Ausfalldichte [19, S. 53]

Die *Ausfallrate* (engl.: *Failure rate*) $\lambda(t)$ ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauteil bis zum (nächsten) Zeitpunkt $t + dt$ ausfällt. Die Einheit der *Ausfallrate* wird immer pro Zeiteinheit gemessen (z.B.: h^{-1}) [19, S. 54].

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \quad (3-8)$$

Für das im oben genannte Beispiel der *Überlebenswahrscheinlichkeit* $R(t)$ und der *Ausfalldichte* $f(t)$ kann folgende *Ausfallrate* $\lambda(t)$ skizziert werden (Abbildung 3-4).

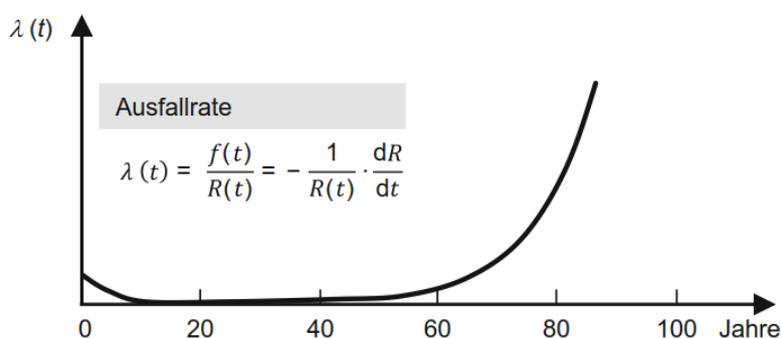


Abbildung 3-4: Ausfallrate [19, S. 53]

Wird die *Ausfallrate* über den Lebenszyklus eines Systems aufgetragen, erhält man meist die sogenannte *Badewannenkurve*, die später noch näher behandelt wird (Abschnitt 3.10).

3.5 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (Ausfalldichten)

Die *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion* (engl.: *Probability Density Function (PDF)*) gibt die Charakteristik der Ausfälle eines Bauteils oder eines Systems über die Zeit an. Sie werden auch *Ausfalldichten* genannt. Im Schienenfahrzeugbau ist es üblich, das Verhalten nicht über die Zeit, sondern über die Laufleistung in *km* anzugeben. Diese Angabe ist im Schienenfahrzeugbau von hoher Bedeutung.

Hier muss jedoch erwähnt werden, dass in dieser Arbeit von einer exponentiellen Verteilung der inhärenten Fehler ausgegangen wird. Das betrifft das gesamte mechatronische System. Die *WDFs* sollen nur angegeben werden, um darzustellen, dass es wesentlich mehr Beschreibungsmodelle gibt, die auf Komponentenebene definitiv anzuwenden wären. Dies soll in dieser Diplomarbeit jedoch nicht Bestandteil sein.

Für die Beschreibung von solchen Ausfallverhalten gibt es also verschiedene *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (WDF)*, die eingesetzt werden können (Abbildung 3-5).

- Exponentielle WDF (Abschnitt 3.5.1)
- Normalverteilte WDF (Abschnitt 3.5.2)
- Lognormale WDF (Abschnitt 3.5.3)
- Gumbel WDF (Abschnitt 3.5.4)
- Weibull WDF (Abschnitt 3.5.5)

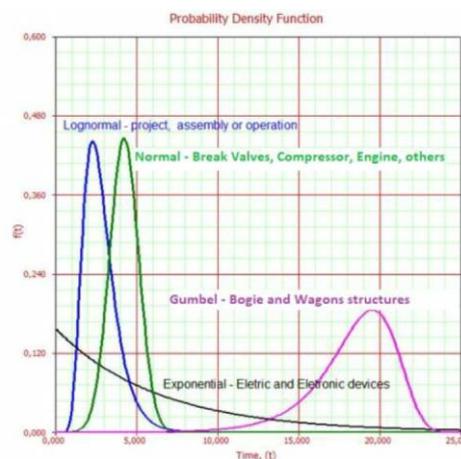


Abbildung 3-5: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen im Vergleich [20, S. 213]

Am Anfang eines Lebenszyklus von Komponenten, wo Aspekte wie menschliche Fehler, Konstruktionsfehler oder etwa Installationsschwierigkeiten auftreten, wird es gehäuft Ausfälle geben, als in einer späteren Phase des Lebenszyklus. Diese Charakteristik wird von der *Lognormalen WDF* (blau) beschrieben. Für eher zufällige Ausfallverhalten bei elektronischen oder elektrischen Bauteilen bietet sich die *Exponentielle WDF* (schwarz) an. Die *Normalverteilte WDF* (grün) kann verwendet werden, um mechanische Bauteile zu beschreiben. Diese fallen eher später in ihrem Lebenszyklus aus. Steigende Fehlerraten sind typisch für solche Komponenten. Auch für Bauteilermüdung oder etwa Korrosionsverhalten sind solche Darstellungen ideal. Am besten hierfür ist jedoch die *Gumbel WDF* (violett) geeignet. Zu allerletzt soll

hier die *Weibull WDF* angeführt werden. Sie kann alle erwähnten Verteilungen kombinieren und mit Hilfe von mehreren Parametern darstellen [20, S. 212]. Die gezeigten Verhalten der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen werden in den folgenden Abschnitten gezeigt. Sie stellen nur einen Bruchteil der tatsächlich zur Verfügung stehenden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen dar, diese werden in der vorliegenden Arbeit aber nicht erläutert oder angeführt.

3.5.1 Exponentielle Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

Die *Exponentielle WDF* $f_E(t)$ ist die einfachste der beschriebenen Funktionen, da sie nur einen Parameter λ benötigt. Die Funktion repräsentiert zufällige Fehler über die Zeit, wie sie speziell bei elektronischen oder elektrischen Teilen auftreten [20, S. 221ff.].

$$f_E(t) = \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda t}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (3-9)$$

Die *Überlebenswahrscheinlichkeit* $R_E(t)$ ergibt sich wie folgt (siehe Formel (3-6)).

$$R_E(t) = 1 - F_E(t)$$

$$F_E(t) = \int_0^t f_E(t) \cdot dt = \int_0^t \lambda \cdot e^{-\lambda t} \cdot dt = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3-10)$$

$$R_E(t) = 1 - F_E(t) = e^{-\lambda t}$$

Daraus ergibt sich folgende *Ausfallrate* $\lambda_E(t)$ (siehe Formel (3-8)).

$$\lambda_E(t) = \frac{f_E(t)}{R_E(t)} = -\frac{dR_E(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R_E(t)}$$

$$\lambda_E(t) = -\frac{d(e^{-\lambda t})}{dt} \cdot \frac{1}{e^{-\lambda t}} = -\frac{-\lambda \cdot e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda_E \quad (3-11)$$

$$\lambda_E = const.$$

Man erkennt also, dass die *Ausfallrate* λ_E nicht von der Zeit abhängig ist und eine Konstante bildet. Die *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion* $f_E(t)$ zeigt einen exponentiellen Verlauf am Beispiel eines Backengehäuses (Abbildung 3-6). Wie bereits erwähnt eignet sich die *Exponentielle WDF* nicht für mechanische oder alterungsbedingte Ausfallverhalten von Komponenten.

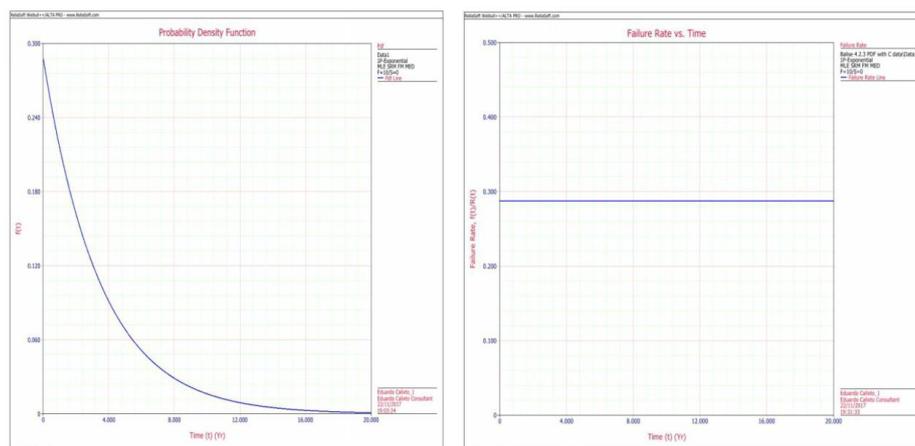


Abbildung 3-6: Exponentielle WDF (links) und Ausfallrate (rechts) [20, S. 224]

3.5.2 Normalverteilte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

Die *Normalverteilte WDF* $f_N(t)$ wird von vielen Industrien und Anwendern für verschiedenste Aufgaben eingesetzt. Dies kann im Ingenieurwesen, Management oder dem Finanzsektor sein. Im Bereich der Technik kann es für mechanische Schäden, Brüche, Ermüdungsschäden und weitere Eigenschaften von vielen Systemen verwendet werden. In weiterer Folge lässt die *Normalverteilte WDF* eine Voraussage von Wartungszeitpunkten zu. Dies kann typischerweise der Mittelwert der Verteilung angeben. Die *Normalverteilte WDF* kann über zwei Parameter eingestellt werden. Zum einen ist das der Mittelwert μ und zum anderen die Standardabweichung σ [20, S. 226ff.].

$$f_N(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (3-12)$$

Für die *Überlebenswahrscheinlichkeit* $R_N(t)$, *Ausfallrate* $\lambda_N(t)$ und *Ausfallwahrscheinlichkeit* $F_N(t)$ sei auf geeignete Literatur verwiesen ([18, S. 406]).

Die *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion* $f_N(t)$ zeigt einen normalverteilten Verlauf am Beispiel eines Pantographen (Abbildung 3-7).

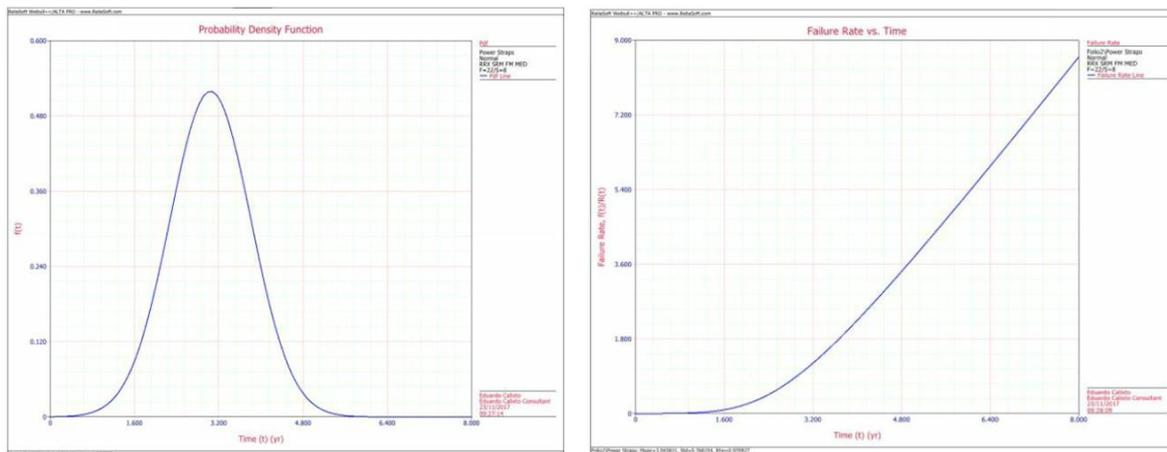


Abbildung 3-7: Normalverteilte WDF (links) und Ausfallrate (rechts) [20, S. 230]

3.5.3 Lognormale Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

Die *Lognormale WDF* $f_L(t)$ kann die Charakteristik von Ausfallverhalten in frühen Produktstadien darstellen. Diese können aufgrund von Fehlern im Gesamtprojekt, Fertigungskomplikationen oder in Installationsphasen auftreten. Auch die *Lognormale Normalverteilte WDF* kann über zwei Parameter eingestellt werden. Zum einen ist das der Mittelwert μ_L und zum anderen die Standardabweichung σ_L [20, S. 231ff.]. Wenn die Standardabweichung σ_L kleiner wird, wird die Kurve höher und schmaler, ansonsten verhält es sich umgekehrt. Grundsätzlich ist die Kurve nach links ausgerichtet, was eben die höhere Ausfallwahrscheinlichkeit in frühen Lebenszyklusphasen widerspiegelt (siehe Abbildung 3-8).

$$f_L(t) = \frac{1}{t \cdot \sigma_L \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - \mu_L}{\sigma_L} \right)^2} \quad (3-13)$$

Für die *Überlebenswahrscheinlichkeit* $R_L(t)$, *Ausfallrate* $\lambda_L(t)$ und *Ausfallwahrscheinlichkeit* $F_L(t)$ sei auf geeignete Literatur verwiesen ([18, S. 425]).

Die *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion* $f_L(t)$ zeigt einen exponentiellen Verlauf am Beispiel einer Bremse (Abbildung 3-8).

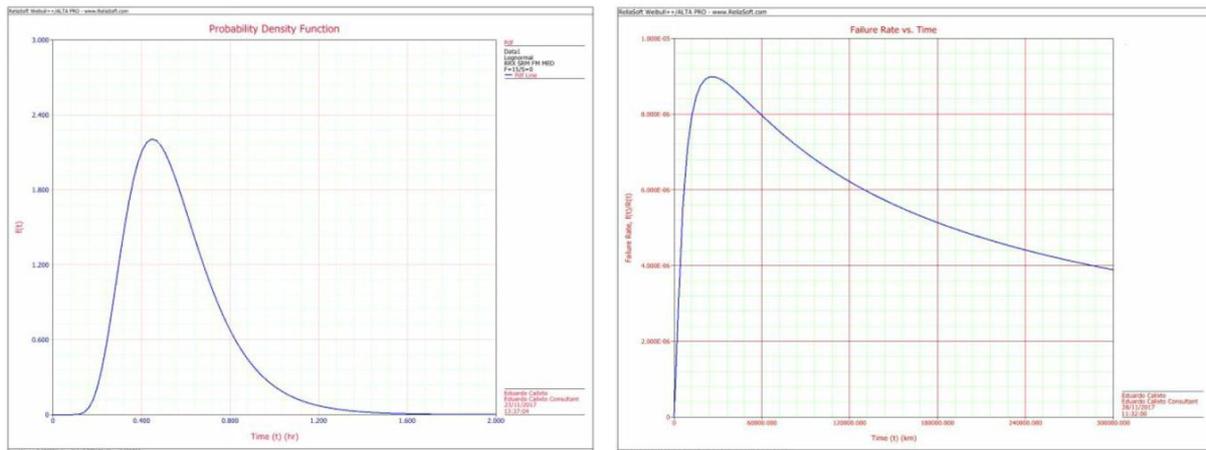


Abbildung 3-8: Lognormalverteilte WDF (links) und Ausfallrate (rechts) [20, S. 234]

Die *Lognormale Verteilung* darf nicht für ein neues Projekt eingesetzt werden, denn es soll angenommen werden, dass Anfangsfehler vermieden werden können. Eine *Lifetime Data Analysis (LDA)* (siehe Abschnitt 5.4) würde erst lognormales Verhalten zeigen. Das bedeutet, dass Felddatenbeobachtungen in einer lognormalen Kurve resultieren würden. Solche Fehler sind in Anfangsphasen der Entwicklung auszubessern.

3.5.4 Gumbel Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

Die *Gumbel WDF* $f_G(t)$ ähnelt vom Aussehen her der *Normalen WDF*, das Auftreten von Fehlern häuft sich aber am Ende des Lebenszyklus. Die *Gumbel WDF* kann, wie die *Normale WDF* über zwei Parameter gesteuert werden. Zum einen ist das der Mittelwert μ_G , zum anderen die Abweichung σ_G . Wird σ_G kleiner, wird die Kurve größer und schmaler. Grundsätzlich ist die *Gumbel WDF* nach rechts ausgerichtet, das bedeutet, dass Systeme beschrieben werden können, die am Ende ihres Lebens eher dazu neigen, auszufallen. Dies könnte ein Bogie oder ein Wagenkasten sein, welcher durch Korrosion oder Ermüdung beeinflusst wird [20, S. 235].

$$f_G(t) = \frac{1}{\sigma_G} \cdot e^{z-e^z} \quad (3-14)$$

$$z = \frac{t - \mu_G}{\sigma_G}$$

Für die *Überlebenswahrscheinlichkeit* $R_G(t)$ und *Ausfallrate* $\lambda_G(t)$ sei auf geeignete Literatur verwiesen.

Die *Gumbel WDF* eignet sich also für mechanische Komponenten, die einen immer schlechteren Zustand einnehmen. Deshalb ist es wichtig, präventive Maßnahmen bereits während des frühen Lebenszyklus zu starten, um die Schwachstellen in den späteren Lebensphasen im Griff zu haben. Optimal wären prädiktive Maßnahmen, um stets im Bilde über den Zustand zu sein. Theoretisch kann man so einen Komplettausfall nach hinten hinauszögern. Die folgenden Kurven zeigen ein *Gumbel* – Verhalten anhand eines Bogies (Abbildung 3-9).

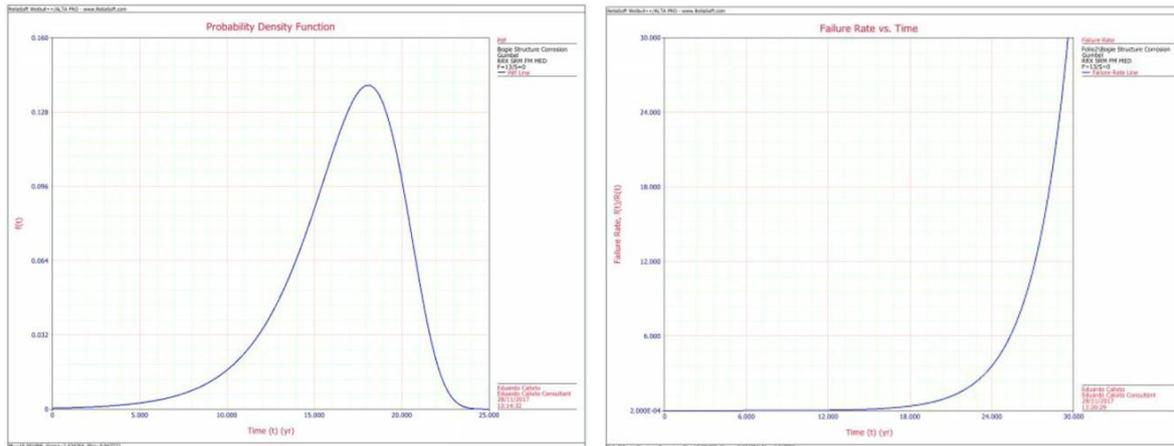


Abbildung 3-9: Gumbel WDF (links) und Ausfallrate (rechts) [20, S. 237]

3.5.5 Weibull Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

Die *Weibull WDF* $f_W(t)$ ist die prominenteste unter den *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen*. Sie kann sämtliche oben erwähnten (*Exponentielle, Normale, Lognormale & Gumbel WDF*) vereinen. Dazu gibt es 3 Parameter (*3-Parameter Weibull*),

- die *Charakteristische Lebensdauer* η ,
- den *Formparameter* β und
- den *Positionsparameter* γ .

Der *Formparameter* β gibt das Aussehen und den Typ der Kurve wieder. Wird β größer, so wechselt er von frühen Ausfällen zu Spätausfällen. Die *charakteristische Lebensdauer* η gibt den Wert an, bis zu dem 63.2 % aller Fehler auftreten. Der *Positionsparameter* γ gibt an, bis zu welchem Zeitpunkt kein Fehler passiert [20, S. 239].

$$f_W(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (3-15)$$

Für die *Überlebenswahrscheinlichkeit* $R_W(t)$ und *Ausfallrate* $\lambda_W(t)$ sei auf geeignete Literatur verwiesen.

Die *Weibull WDF* kann also für sämtliche Szenarien eingesetzt werden, egal ob steigende oder fallende Fehlerrate über den Lebenszyklus. Ein wesentlicher Vorteil der *Weibull WDF* ist auf jeden Fall eine einfache Erkennung der Form anhand der drei Parameter.

Zusätzlich zu der *3-Parameter-Weibull Funktion* gibt es noch die *gemischten Weibullfunktionen* ($f_{MW}(t)$). Sie hat die Eigenschaft, Auskunft über Subkomponenten zu geben. Wenn zum Beispiel eine Ereigniszeitanalyse (LDA) gemacht wird, kann man erkennen, welche Komponentenfehler aufgetreten sind. Es gibt eine Anzahl K von Subsystemen. N_K gibt die Anzahl der fehlerhaften Bauteile pro Subsystem an. N ist also die Gesamtausfallszahl [20, S. 243].

$$f_{MW1,\dots,K}(t) = \sum_{i=1}^K \frac{N_i \cdot \beta_i}{N \cdot \eta_i} \cdot \left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{\beta_i-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{\beta_i}} \quad (3-16)$$

Anhand eines Beispiels kann die Bedeutung der *Gemischten Weibull WDF (Mixed Weibull)* herausgehoben werden. Für ein Bremssystem wurde eine Ereigniszeitanalyse (LDA) durchgeführt (Abbildung 3-10).

Man erkennt also, dass mithilfe der *Gemischten WDF* Subpopulationen in Systemen erkannt und Fehlverhalten beschrieben werden können. Dies kann hilfreich sein, wenn keine anderen Mechanismen oder Analysemethoden vorliegen. Hier sei auf *FRACAS* verwiesen [20, S. 247].

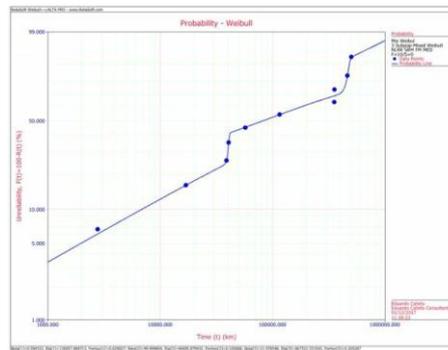


Abbildung 3-10: Mixed Weibull Ausfallwahrscheinlichkeit [20, S. 246]

3.6 Zuverlässigkeitskennwerte

Im Zuverlässigkeitsmanagement und der Instandhaltung werden spezielle Ausdrücke und Parameter zur Messung von relevanten Eigenschaften von Systemen herangezogen. Diese sollen im Folgenden beschrieben werden. Die folgende Tabelle gibt die wichtigsten Werte an. Diese sind in den Normen beschrieben und für den Schienenfahrzeugbau von großer Bedeutung (zum Beispiel *EN 50126-1:2017* [1]).

Parameter	Symbol	Dimension
Ausfallwahrscheinlichkeit	$F(t)$	dimensionslos
Fehlerrate	$\lambda(t)$	1/Zeit
FIT (Failure In Time)	FIT	$1/10^9 h^{-1}$
Mean Down Time	MDT	Zeit, Distanz
Mean operating Time Between Failure (für: reparierbare Systeme)	$MTBF$	Zeit, Distanz
Mean operating Time Between Maintenance (preventive/corrective)	$MTBM$ $MTBM(c)$ $MTBM(p)$	Zeit, Distanz
Mean operating Time To Failure (für: nicht – reparierbare Systeme)	$MTTF$	Zeit, Distanz
Mean Repair Time	MRT	Zeit
Mean Time To Maintain (preventive/corrective)	$MTTM$	Zeit
Mean Time To Restore	$MTTR$	Zeit
Mean Up Time	MUT	Zeit, Distanz
Überlebenswahrscheinlichkeit	$R(t)$	dimensionslos
Verfügbarkeit (inhärent/operativ)	A_i A_o	dimensionslos

Tabelle 3-2: Zuverlässigkeitskennwerte [1, S. 86]

Um die genannten Zuverlässigkeits- und Instandhaltungskennwerte (Tabelle 3-2) berechnen können, soll zuerst ihr Zusammenhang aufgezeigt werden (Abbildung 3-11).

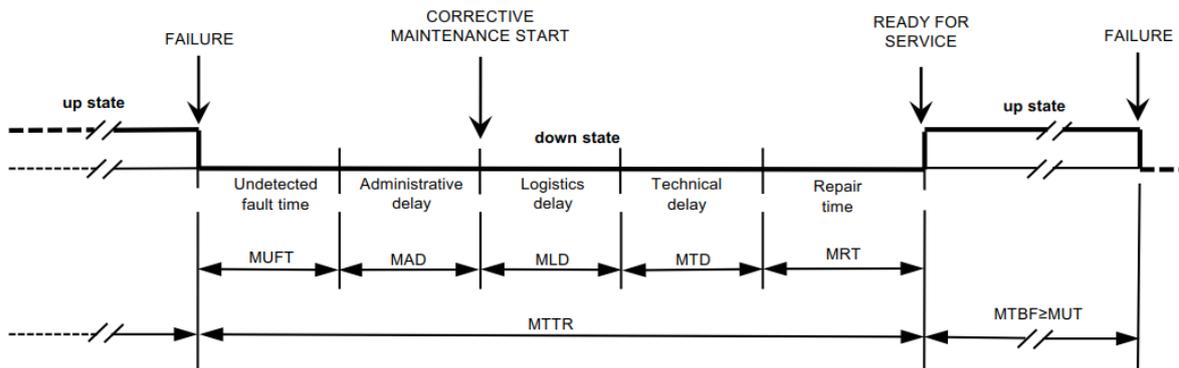


Abbildung 3-11: Zuverlässigkeitskennwerte Zusammenhang [1, S. 88]

Die Zeit ist an der Abszisse aufgetragen. Bevor ein Fehler passiert, ist das System im *up-state*, also in einem funktionsfähigen Zustand. Sobald ein Fehler eintritt, geht das System in einen *down-state*, ist also nicht mehr funktionsfähig.

Die Gesamtdauer *MTTR* gibt die Zeitspanne an, die benötigt wird, bis das System wieder einsatzfähig ist. *MTTR* kann in mehrere Komponenten unterteilt werden. Das sind die Zeitspannen um die Fehler zu entdecken (*MUFT*, *MAD*), bis die Korrektive Instandhaltung startet. Dann kommt neben der Reparaturzeit *MRT* auch noch Verzögerungen in Logistik oder bei der technischen Abhandlung zum Tragen (*MLD*, *MTD*).

Nach der Reparatur ist das System wieder funktionsfähig. Bis zum nächsten Ausfall wird der Parameter *MTBF* angegeben. Er misst die Zeitspanne bis zum nächsten Ausfall.

MTBF – Mean Distance Between Failure

Die *mittlere Zeit zwischen oder zum Fehler (MTBF, MTTF)* wird allgemein folgend berechnet [22, S. 53]. Er stellt eine der wichtigsten Kenngrößen in der Zuverlässigkeitstechnik dar.

$$MTBF = MTTF = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad (3-17)$$

Wenn keine präventive Instandhaltung am System vorgesehen ist, dann ist $MTTR = MDT$. Die *MDT (Mean Down Time)* ist die Zeit, die das System nicht funktionsfähig ist. Im Gegensatz dazu gibt die *MUT (Mean Up Time)* die Zeit an, in der das System funktioniert.

MTBF kann auch folgend verallgemeinert werden [22, S. 40].

$$MTBF = MUT + MDT \quad (3-18)$$

Die Werte *MTBM (Mean Time Between Maintenance)* und *MTTM (Mean Time To Maintain)* geben ganz allgemein die mittlere Zeit zwischen den Instandhaltungen und die mittlere Zeit für die Instandhaltung an.

A - Verfügbarkeit

Allgemein kann die *Verfügbarkeit A* folgendermaßen ausgedrückt werden [1, S. 87].

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3-19)$$

Bei der *Verfügbarkeit* kann noch zwischen *inhärenter* und *operativer Verfügbarkeit* unterschieden werden. *Inhärente Verfügbarkeit* A_i betrachtet nur die *korrektiven Maßnahmen*, die am System durchgeführt wurden. *Operative Verfügbarkeit* A_o inkludiert zudem noch alle zusätzlichen zeitlichen Quellen, die dazu führen, dass das System in einem nicht – funktionsfähigen Zustand befindetet, wie zum Beispiel logistische oder administrative Verzögerungen im Betrieb.

FIT (Failure In Time)

Die Kenngröße *FIT (Failure In Time)* gibt an, wie viele Fehler pro $10^9 h$ für eine Komponente auftreten. *1 FIT* entspricht also *1 Fehler pro 10^9 Stunden* [23].

Dies ist eine sehr häufige Angabe in Diagrammen und Analysen und sollte deshalb nicht unbetont bleiben. Die Umrechnung zwischen *FIT* und *MDBF* ist in folgender Gleichung angegeben.

$$FIT = \frac{\text{Laufleistung pro Monat [km]} \cdot 10^9}{MDBF \text{ [km]} \cdot 30 \text{ Tage} \cdot \text{Tägliche Einschaltdauer [h]}} \quad (3-20)$$

3.7 Die Begriffe Risiko & Unsicherheit

Da es im Zuverlässigkeitsmanagement grundsätzlich um technische *Risiken* und deren Bewertung und Reduzierungsmaßnahmen geht, ist der Begriff *Risiko* hier unbedingt zu erläutern und definieren.

Später wird noch die *Unsicherheit* genannt und erklärt; in der Praxis kommt es häufig zu Verwechslungen zwischen den beiden Begriffen *Risiko* und *Unsicherheit*.

In der Norm ist **Risiko** die „*Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Schadens und seines Schadensausmaßes.*“ [24, S. 8]

Beispiel: Ich benutze mein Auto um in die Arbeit zu fahren. Ich gehe ein *Risiko* ein.

Eine **Gefährdung** ist eine „*potentielle Schadensquelle.*“ [24, S. 7] Wenn das *Schutzgut* (Tier, Mensch oder ein technisches System) mit der Gefahrenquelle „aufeinandertreff“ entsteht dabei eine unmittelbare **Gefahr**.

Beispiel: Ich überhole an einer unübersichtlichen Stelle und *gefährde* mich und meine Umwelt. Ich verschätze mich bei der Entfernung zum entgegenkommenden Fahrzeug und bevor ich mich wieder einreihe, stelle ich eine *Gefahr* dar.

Ein **Schaden** ist eine „*physische Verletzung oder Gesundheitsschädigung.*“ [24, S. 8]

Ein **Ausfall** ist die „*Beendigung der Fähigkeit einer Einheit, eine geforderte Funktion zu erfüllen.*“ [24, S. 13]

Folgend (Tabelle 3-3) sind noch die englischen Übersetzungen für die genannten Begriffe angegeben, da diese oft auch im deutschen Sprachraum verwendet werden.

Begriff	Englische Übersetzung
Gefahr	danger
Gefährdung	hazard
Risiko	risk
Schaden	harm

Tabelle 3-3: Englische Risikobegriffe

Das *Risiko* R kann in der Technik auch als mathematisches Produkt von *Wahrscheinlichkeit/Häufigkeit des Eintritts* F und des *Schadensausmaßes* S beschrieben werden.

$$R = F \times S \quad (3-21)$$

Dabei ist es nicht vordergründig, welche Einheit für F oder S verwendet wird. Dies kann je nach Anwendung selbst gewählt werden. Zusätzlich wird manchmal ein zusätzlicher Koeffizient *Entdeckungswahrscheinlichkeit* mit angegeben.

Da es in der Praxis oft zu Verwechslungen zwischen den Begriffen *Risiko* und *Unsicherheit* kommt, soll hier die *Unsicherheit* noch kurz genannt werden.

Anders als beim *Risiko*, bei dem unterschiedlichen Zuständen objektive Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden können, charakterisiert sich die **Unsicherheit** dahingehend, dass bei ihr keine Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Situationen bekannt sind. Bei einmaligen Ereignissen, bei denen keine Wahrscheinlichkeiten zu messen sind, spricht man von *Unsicherheit*. Glücksspiele spiegeln hingegen typischerweise *Risiken* wider, da die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmter Kombinationen bekannt ist.

3.8 Arten von Fehlern

Es gibt grundsätzlich zwei Arten von Fehlern, die während des Gesamtlebenszyklus eines technischen Systems auftreten können. Hier wird im Allgemeinen zwischen

- **Zufälligen Fehlern** und
- **Systematischen Fehlern** unterschieden.

Zufällige Fehler zeichnen sich dadurch aus, dass sie nur statistisch beschrieben werden können. Sie resultieren aus Ereignissen, die nur „zufällig“ auftreten und die Zeitpunkte deshalb nur geschätzt werden können. Meistens ist Hardware davon betroffen. Zufällige Fehler folgen einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (siehe Abschnitt 3.5), mithilfe der die Fehlerraten bestimmt werden können, wenn keine weiteren Daten vorliegen [1, S. 27].

Systematische Fehler sind immer reproduzierbar und stimulierbar. Ein System fällt dann aus, wenn genau die Bedingungen vorherrschen, die einen gewissen systematischen Fehler provozieren. Systematische Fehler sind immer durch einen menschlichen Fehler im Gesamtlebenszyklus hervorgerufen. Ursachen dafür können schlechte Prozesse, Methoden oder die Organisation selbst sein. Beim Testing können diese Fehler gefunden werden und Maßnahmen zur Vermeidung angestoßen werden. Viele Maßnahmen zur Risikoreduzierung beziehen sich nur auf Systematische Fehler [1, S. 27].

In dieser Arbeit sollen nur die **inhärenten Fehler** betrachtet werden. Diese sind alle Fehler ohne Softwarefehler und Serienfehler und beinhalten also hauptsächlich zufällige Fehler. Diese Festlegung wurde vom Autor getroffen.

In der Literatur [25] werden weiters noch folgende Fehlerarten beschrieben.

Common – Mode – Fehler: Das sind Fehler von mehreren Bauteilen, die alle vom selben Verursacher ausgelöst werden. Gibt es etwa ein Problem mit einer Spannungsleitung, an der mehrere Komponenten hängen und diese daher nicht funktionsfähig sind, spricht man von einem Common – Mode – Fehler.

Versteckte Fehler: Von dieser Fehlerart spricht man, wenn die Auswirkungen des Fehlers im normalen Betrieb nicht sichtbar, messbar oder wahrnehmbar sind. Werden sie nicht entdeckt, kann es zu einem späteren Zeitpunkt zu einem Gesamtausfall kommen. Etwa bei Betriebsänderung oder wenn Bedingungen eintreten, die zusammen mit dem versteckten Fehler zu einem Ausfall führen. Beispielsweise könnte hier der Ausfall eines Sicherheitsventils eines Druckkessels genannt werden, bevor der Druck übermäßig ansteigt.

Potentieller Fehler: Durch prädiaktive Maßnahmen (siehe Abschnitt 3.3) kann ein unmittelbar bevorstehender, „potentieller“ Fehler entdeckt werden. Durch Vibrations-, oder Schwingungsmessungen können bevorstehende Ausfälle von mechanischen Komponenten gefunden werden. Werden potentielle Fehler missachtet, kann es zu einem Systemausfall kommen.

Phantomfehler: Dieser Begriff stammt ursprünglich aus der Informatik. Da er aber, wie später zu sehen ist, eine wesentliche Bedeutung in dieser Arbeit findet, soll er hier auch erwähnt werden. Phantomfehler sind Fehler, die in Wirklichkeit gar nicht aufgetreten sind, sondern durch andere Ursachen oder Fehler getriggert werden [26, S. 23]. Dies sind zum Beispiel Softwarefehler, die nach einem Neustart eines Systems auftreten.

Run-to-failure (RTF) Fehler: Fehler, die keine sicherheitsrelevanten, betrieblichen oder finanziellen Auswirkungen mit sich bringen. Sie müssen dem Wartungspersonal trotzdem bekannt sein. Als Beispiel könnte eine Glühbirne im Fahrgastraum genannt werden. Sie wird nach ihrem Ausfall ausgetauscht.

3.9 Lebenszykluskosten

Bei den *Lebenszykluskosten* (engl.: *Life Cycle Costs (LCC)*) handelt es sich um die kumulierten Kosten eines Produkts über seinen Lebenszyklus [27, S. 6]. Der *Lebenszyklus* (Abbildung 3-12) ist das Zeitintervall zwischen der Konzipierung und der Außerbetriebnahme (Entsorgung) eines Produkts [27, S. 6].



Abbildung 3-12: Lebenszyklus [27, S. 8]

Es sollen also die Kosten (Abbildung 3-13) des gesamten Systems beschrieben werden. Dazu zählen *Akquisitionskosten*, *Betriebskosten* und mögliche *Entsorgungskosten* [20, S. 505].

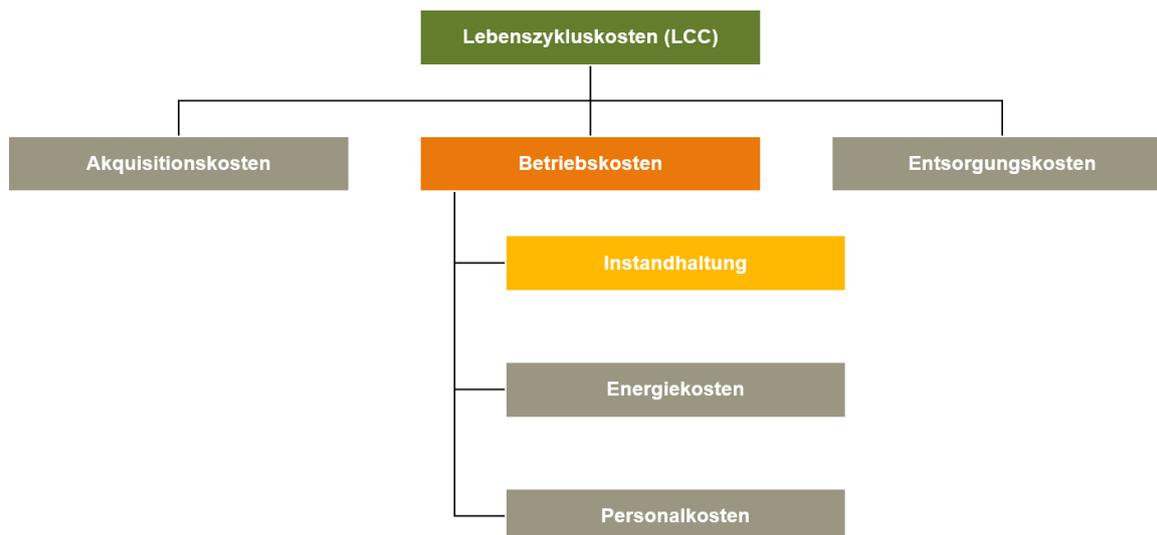


Abbildung 3-13: Lebenszykluskosten

Da die *Akquisitionskosten* im Regelfall bei den verschiedenen Herstellern sowie *Energiekosten* oder *Trassenbenutzungskosten* sehr ähnlich sind, bildet die Thematik *Instandhaltung* eine wesentliche Stellschraube für eine möglichst hohe wirtschaftliche Effizienz. Sie kann bis zu 20 % der gesamten Lebenszykluskosten ausmachen. Es geht darum, die Instandhaltung auf die tatsächliche Beanspruchung der Schienenfahrzeuge abzustimmen, ohne dass Einbußen bei Sicherheit oder Zuverlässigkeit entstehen [28, S. 534].

3.10 Badewannenkurve

Die sogenannte *Badewannenkurve* zeigt die Summe der Fehlertypen für die Gesamtbetriebsdauer einer Komponente oder eines Systems. Reiht man diese zeitabhängigen Funktionen aneinander, entsteht typischerweise ein Verlauf der einer „Badewanne“ ähnelt (siehe Abbildung 3-14). Üblicherweise gliedert sich der Verlauf in drei Teile. In der ersten Phase treten Frühausfälle auf, die etwa durch Probleme bei der Montage, Installation oder anderen ersten Schritten im Lebenszyklus hervorgerufen werden. Am Ende des Produktlebens treten dann Alterungserscheinungen auf, die zu Ausfällen führen können. Beispielsweise ermüden Materialien oder bringen einfach keine ausreichende Funktion mehr mit sich. In der „Normalbetriebszeit“ also dem größten, mittleren Teil eines Produktlebens stellt sich eine konstante Ausfallrate ein. In diesem Bereich werden gezielt Instandhaltungstätigkeiten angewandt, um dieses Verhalten kontrollieren zu können.

Wichtig zu erwähnen ist hierbei jedenfalls, dass es sich bei Alterungserscheinungen und Frühausfällen zum Großteil um *systematische Fehler* handelt. Diese könnten gezielt mit geeigneten Programmen und Tests (siehe Abschnitte 4.3 & 4.4) gefunden und ausgebessert werden (größtenteils: Rollkuren). Bei dem konstanten, mittleren Teil der Badewannenkurve stellen sich hauptsächlich zufällige Fehler ein, die dann mithilfe von geeigneten Kennwerten und Verfahren beschrieben werden. Natürlich treten auch in der ersten und dritten Phase des Produktlebenszyklus zufällige Fehler auf. Die systematischen Fehler dominieren jedoch in diesen Bereichen und sind also verantwortlich für das Aussehen der Badewannenkurve [29, S. 12].

Mithilfe der *Weibull WDF* kann diese Badewannenkurve gezielt nachgebildet und beschrieben werden.

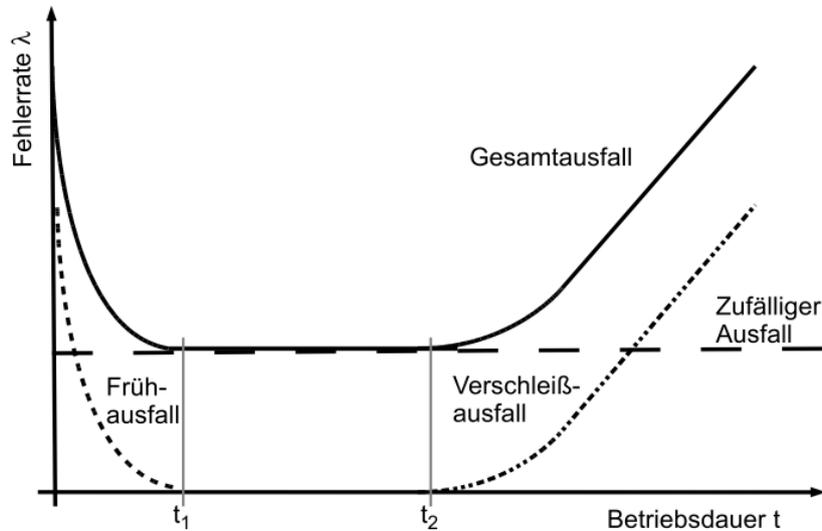


Abbildung 3-14: Badewannenkurve [29, S. 188]

In der Abbildung 3-15 erkennt man einen Ansatz für ein verbessertes Verhalten der Badewannenkurve. Die blaue „Badewanne“ stellt eine traditionelle Einbettung des Ausfallverhaltens in den Lebenszyklus dar; startend mit der *Start-up-Phase*. Wenn man nun aber die Initiative setzt, möglichst früh *systematische Fehler* zu finden und diese auszubessern, kann im besten Falle bereits in der *Design Phase* eine konstante Feherrate erreicht werden. Das könnte theoretisch bedeuten, dass ein Schienenfahrzeug keine Frühausfälle mehr aufweist, wenn es sich bereits im Passagierbetrieb befindet. Die Abbildung zeigt im Wesentlichen, dass ein umfangreiches, ausgeklügeltes und systematisches Zuverlässigkeitsprogramm zu niedrigeren Feherraten, besserem Ausfallverhalten und weniger Kosten führt. *OEE* (Overall equipment efficiency) beschreibt in der Abbildung die Verfügbarkeit.

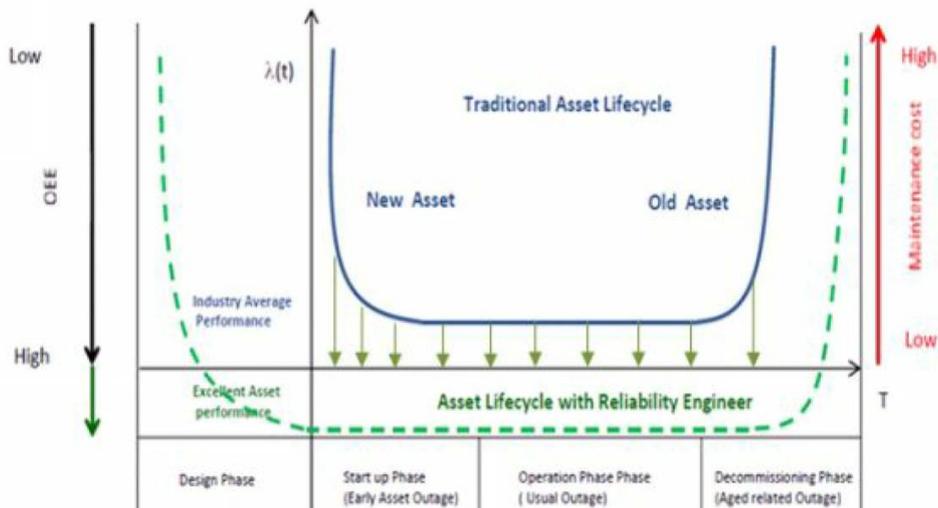


Abbildung 3-15: Verbesserte Badewannencharakteristik [20, S. 78]

Zusätzlich sei hier noch zu erwähnen, dass die Badewannenkurve in der Literatur sehr idealtypisch beschrieben wird, in der Praxis jedoch kaum zu beobachten ist. Durch Überlagerung von mehreren Komponenten und Systemen, wie es in einem mechatronischen System üblich

ist, tritt die Form der *Badewannenkurve* nicht wirklich auf. Trotzdem ist sie ein gutes Werkzeug, um allgemein über Fehlverhalten und Verbesserungen zu sprechen.

3.11 Abgrenzung zu Safety

Da der Begriff *RAM/LCC* eine untrennbare Einheit mit dem Überbegriff *RAMS* darstellt, wird hier noch auf den angrenzenden Bereich *Safety* eingegangen. In dieser Arbeit werden keine sicherheitsrelevanten Thematiken aufgegriffen, da sich Zuverlässigkeitswachstum nicht direkt mit *Safety* beschäftigt. Es soll klar sein, wo die Grenzen zwischen *RAM/LCC* und *Safety* sind.

Die Eisenbahnindustrie ist stets mit Gefahren konfrontiert. Diese betreffen die Gesundheit von Angestellten, Passagieren und auch Beschädigungen von Umwelt und Infrastruktur. Es gibt viele kleine Gefahren, die großen Gefahren betreffen jedoch jeden, der mit der Bahn unterwegs ist. Die Hauptgefahren sind im Wesentlichen *Zugkollision*, *Entgleisung*, *Stromschlag* und *Unfälle bei Bahnübergängen*. Um solchen Katastrophen vorzubeugen, werden spezifische Maßnahmen getroffen. Diese betreffen Hardware gleichermaßen wie Software, menschliche Fehler oder auch eine Kombination von den genannten Faktoren [20, S. 545].

In der Europäischen Union treten mehr als 2000 signifikante Unfälle jedes Jahr auf, in denen rund 1200 Personen getötet werden. Es ist also klar, dass hier strenge Gesetze und Richtlinien die Sicherheit von Personen und der Umwelt regeln müssen [20, S. 545]. Diese Schriften stellen die Basis für Sicherheitsbetrachtungen dar.

Grundsätzlich handelt es sich bei *Safety – Prozess*, ähnlich wie beim *RAM – Prozess* um ein Risikoassessment, welches den Fokus auf sicherheitsrelevante Komponenten, wie zum Beispiel Bremssysteme, Bogies und Signaltechnik setzt. Die oberste Priorität hat immer die *Sicherheit*. Hier soll aber nicht näher ins Detail gegangen werden, bei Interesse sei auf weiterführende Literatur verwiesen (siehe [20, S. 534ff.] oder [30, S. 63ff.]).

4 RAM/LCC Management

In den nachfolgenden Abschnitten wird der *RAM/LCC – Management Prozess* (Abschnitt 4.1), wie er bei Siemens Mobility GmbH eingesetzt wird, erklärt und beschrieben. Anschließend wird der dabei erstellte *RAM – Plan* (Abschnitt 4.2) definiert und die wichtigsten Inhalte umrissen. Zum Abschluss werden noch *qualitative & quantitative RAM – Analysen* (Abschnitt 4.3), sowie *Tests* (Abschnitt 4.4) aufgezählt und erklärt.

4.1 RAM/LCC – Prozess

Der *RAM/LCC – Prozess* orientiert sich grundsätzlich an der Norm *EN 50126-1:2017* (siehe Abschnitt 2.1). Sie ist der wesentliche Taktgeber des Prozesses und gibt die grundsätzliche Vorgehensweise vor. Maßgebend ist das *V – Modell*, das einen Produktentstehungsprozess darstellt und die einzelnen Phasen angibt.

Ähnlich wie beim generischen *RAMS – Prozess* aus der Norm, teilt sich der Lebenszyklus in die folgenden Phasen (siehe Abbildung 4-1).

- Angebotsphase
- Projektstart
- Konzeptphase
- Engineering und Umsetzung
- Validierung des Systems
- Betrieb, Wartung und Leistungsüberwachung

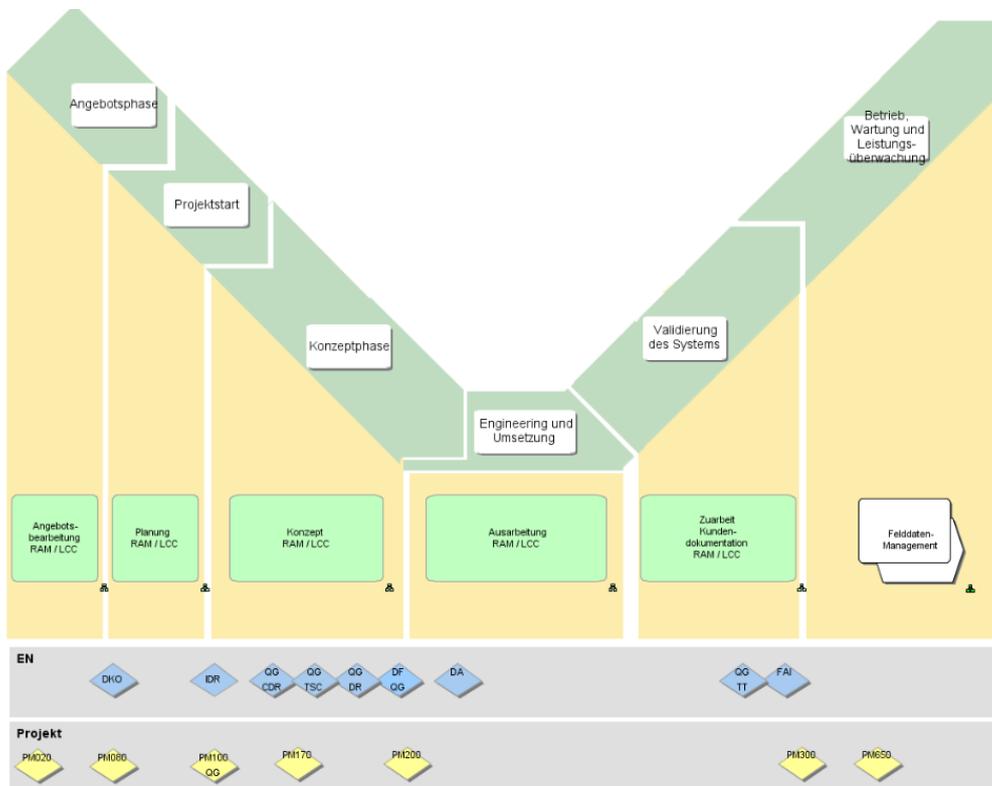


Abbildung 4-1: Siemens Produktentstehungszyklus [31]

Zusätzlich werden Meilensteine angegeben (siehe Abbildung 4-1). Zum einen gibt es *Engineering – Meilensteine* und zum anderen übergeordnete *Projekt – Meilensteine*.

Engineering – Meilensteine:

- **DKO** – Design Kick Off
- **IDR** – Initial Design Review
- **CDR** – Conceptual Design Review
- **DR** – Design Review
- **DF** – Design Freeze
- **DA** – Design Approval
- **TT** – Type Test
- **FAI** – First Article Inspection

Die oben genannten Engineering - Meilensteine sind speziell für Komponenten und Teilsysteme beziehungsweise das Gesamtfahrzeug relevant. Darüber hinaus gibt es noch weitere Meilensteine, die hier jedoch nicht weiter beleuchtet werden. Zusätzlich gibt es noch die Projekt – Meilensteine.

Projekt – Meilensteine:

- **PM20** – Angebotsentscheidung
- **PM80** – Ende der Projektübergabe
- **PM100** – Projektabwicklung gestartet
- **PM170** – Konzeptabschluss
- **PM200** – Freigabe Detailplanung
- **PM300** – Versandfreigabe
- **PM650** – Kundenübernahme

Die Projekt – Meilensteine sind hierarchisch die am höchsten stehenden Meilensteine und werden von Siemens weltweit vorgegeben. Die Engineering – Meilensteine bilden eine Voraussetzung für den Abschluss der PM – Meilensteine.

Der RAM – Prozess (siehe Abbildung 4-2) teilt sich in einen „linken“ und einen „rechten“ Teil. Im linken Ast des V – Modells sind die Phasen des Assessments der Anforderung, Produktkonzept bis hin zum detaillierten Produktdesign vorhanden. Im rechten Teil geht es um die Realisierung und Tests der spezifischen Subsysteme und Komponenten. Die Outputs der vorherigen Phasen sind jeweils die Inputs der darauffolgenden Phase.

Zuerst werden die Anforderungen auf Risiko und Machbarkeit überprüft. Wenn eine Anforderung zuverlässigkeitsmäßig nicht erfüllt werden kann, werden Maßnahmen angestoßen, die Abhilfe schaffen. In dieser Phase werden also die technischen Spezifikationen beleuchtet und die RAM – relevanten Anforderungen definiert. Im Anschluss werden diese Anforderungen auf die Subsysteme aufgeteilt, so, dass die Summe der Subsysteme (also das Schienenfahrzeug) den Anforderungen des Kunden entspricht. Des Weiteren wird ein RAM – Plan (siehe Abschnitt 4.2) erstellt.

In der Design – Phase sind die Engineering – Meilensteine relevant, die bereits oben behandelt wurden. Mithilfe von FTA (Abschnitt 4.3.2) und FMECA (Abschnitt 4.3.1) werden die

angestrebten Lösungen analysiert und Zuverlässigkeit ermittelt. Je nach Relevanz und Anforderungen können die Engineering – Meilensteine auch auf die Sublieferanten und andere Stakeholder angewandt werden. Diese werden dann beobachtet und müssen Berichte und andere Nachweise bringen, dass sie gewisse Qualitätsstandards erreichen. RAM bildet hier also eine querschnittsübergreifende Disziplin, die sich auf viele Prozesse auswirkt.

In der Manufacturing – Phase des Prozesses werden zum einen die Designs im eigenen Haus gefertigt, oder zu Sublieferanten gebracht, die diese dann produzieren. Auch hier werden Meilensteine auf die Sublieferanten angewandt, die sich auch Reviews unterziehen müssen. Viele Schritte werden ausgeführt, die die Qualität stets gewährleisten sollen.

In der Installations – und Inbetriebsetzungsphase wird das Produkt durch sämtliche im RAM – Plan beschriebenen Testphasen geschickt, um mögliche Schwachstellen zu identifizieren und auszubessern. Je besser und intensiver die Analysen in den vorangestellten Phasen waren, desto weniger Fehler dürften gefunden werden. Die Inbetriebsetzung erfolgt statisch und erst anschließend dynamisch. Die dynamische Inbetriebsetzung bedeutet, dass das Fahrzeug auf Teststrecken allen möglichen Situationen aus dem Alltag ausgesetzt wird. Bevor der Kunde das Fahrzeug in den Passagierbetrieb nehmen kann, muss sichergestellt sein, dass das Produkt seinen Anforderungen entspricht und keine Probleme auftreten.

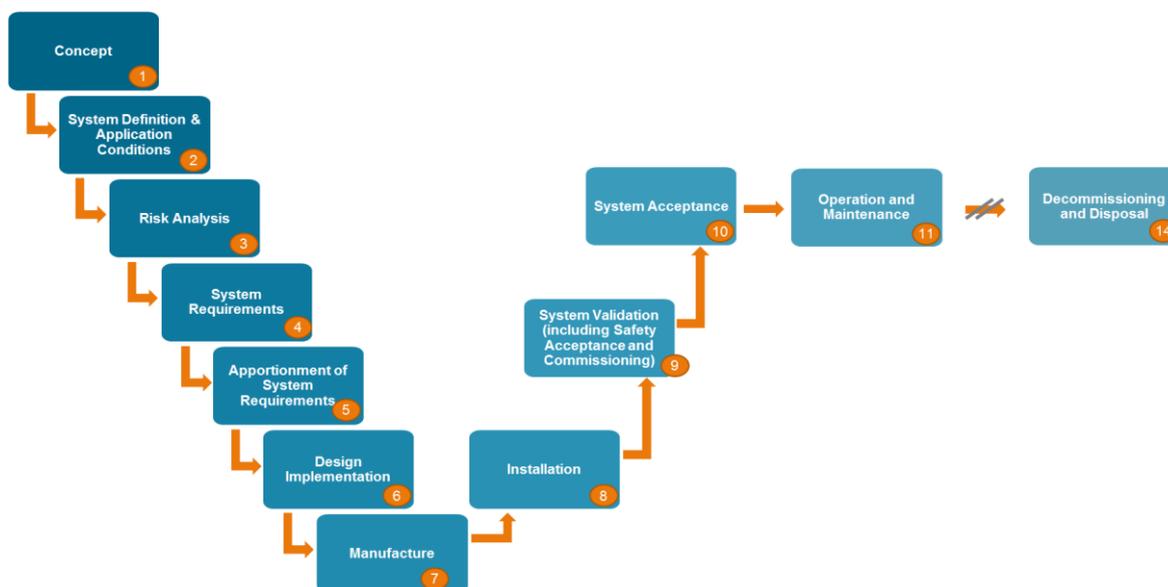


Abbildung 4-2: RAM – Prozess [31]

4.2 RAM – Plan

Die Norm *EN 50126-1:2017* gibt an, dass ein *RAM – Plan* zu erstellen ist. Dieser soll möglichst viele Informationen über die geplante Vorgehensweise enthalten, die der Hersteller durchführen wird, um ein System zuverlässig zu gestalten. Die Norm gibt jedoch keine Muss – Anforderungen an einen *RAM – Plan* an. Sie gibt lediglich Beispiele, wie ein solcher Plan aussehen könnte.

Dazu können unter anderem zählen:

- Ziele
- Der RAMS – Lebenszyklus
- Organisation & Verantwortliche
- RAM – Aktivitäten und Methoden
- Vordefinierte RAM – Werte für Komponenten
- Demonstration der RAM – Werte

Der *RAM-Plan* muss zwar geschrieben werden, jedoch ist nicht festgelegt, was er beinhalten muss. Somit liegt es am Kunden, welche Anforderungen er an einen solchen Plan stellt.

4.3 Qualitative & Quantitative RAM – Analysen

Im Folgenden sollen *qualitative* und *quantitative RAM – Analysen* vorgestellt werden. Sie werden eingesetzt um sicherzustellen, dass die Systeme über den Lebenszyklus hinweg zuverlässig und instandhaltbar gestaltet werden. Je früher diese Analysen eingesetzt werden, desto besser ist am Ende das Ergebnis und die Auswertung von Werten.

4.3.1 Failure Mode Effects and Criticality Analysis – FME(C)A

Die *Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FME(C)A)* ist ein essentielles Tool in der Zuverlässigkeitstechnik. Sie wird in den ersten Phasen eines Produktlebenszyklus. Entwickelt wurde die *FMEA* vom US Militär in den 1940er – Jahren [25].

Die Methode *FMECA* bietet einen systematischen Ansatz um mögliche Fehlermöglichkeiten und Maßnahmen zur Vermeidung dieser Fehler von spezifischen Komponenten zu entdecken. Fehler sollen im Allgemeinen so früh wie möglich erkannt werden. Für jede Funktion werden Fehlermöglichkeiten, deren Wahrscheinlichkeit und die Konsequenzen bestimmt. Dadurch kann eine Risikobewertung durchgeführt werden. Zusätzlich wird eine Kritikalität der ausfallenden Funktion ermittelt. Im Anschluss werden mögliche Maßnahmen gegen Auftreten der Fehler gesucht und technisch realisiert. Eine Restrisikobestimmung runden die *FMECA* ab [20, S. 86].

Im besten Fall wird die *FMECA* in mehreren Phasen der Entwicklung durchgeführt und bildet daher ein sehr dynamisches Dokument. Im Laufe der Entwicklung kann die *FMECA* immer konkreter und detaillierter ausgeführt werden.

Die Bottom – Up Methodik der *FMECA* gliedert sich wie folgt in 9 Schritte (siehe Abbildung 4-3).

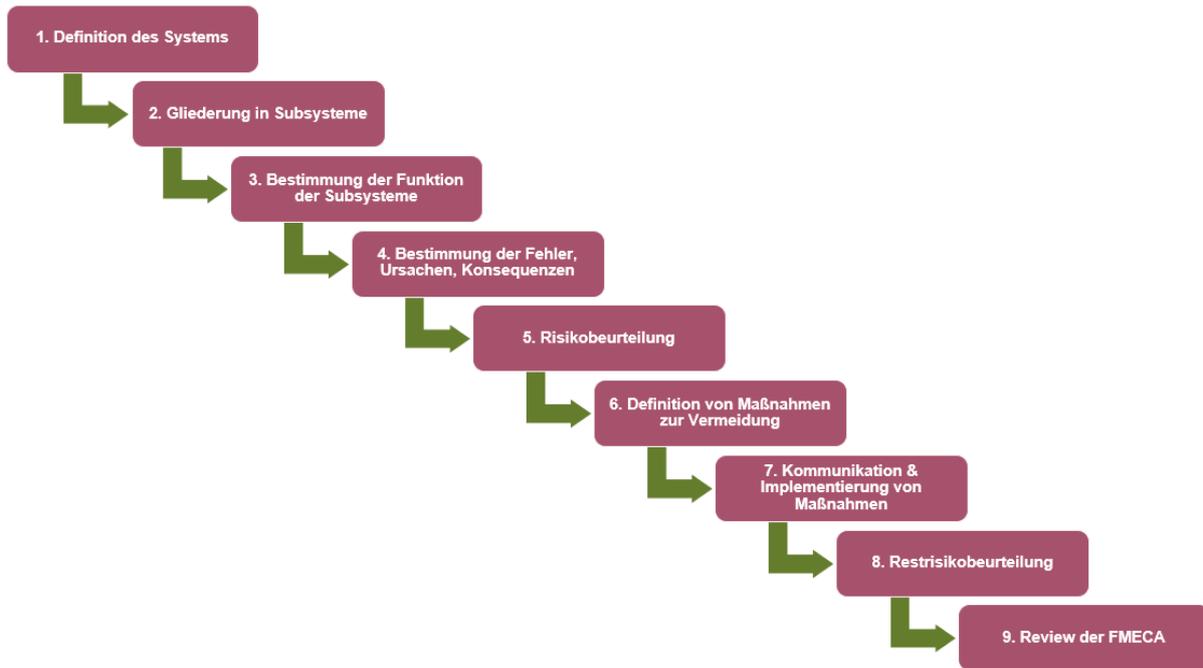


Abbildung 4-3: Vorgangswise FME(C)A

Da vorausgesetzt wird, dass die FMEA allgemein bekannt ist, wird die Vorgehensweise nicht näher erläutert. Für nähere Informationen wird auf die DIN EN 60812:2015 verwiesen.

4.3.2 Fault Tree Analysis – FTA

Die Fehlerbaumanalyse (engl.: Fault Tree Analysis (FTA)) wird durchgeführt, um Ursachen eines Ereignisses, im Speziellen eines Fehlers, systematisch und grafisch darzustellen. Dazu wird ein Top – Down – Ansatz gewählt (siehe Abbildung 4-4). Ganz oben steht beispielsweise ein Funktionsausfall und nach unten hin werden Ursachen gefunden und miteinander verknüpft, die dazu führen können. So ist ersichtlich, welche Fehler zusammentreffen müssen, so dass der Funktionsausfall eintritt. Die einzelnen Elemente sind mit Boole’schen Abhängigkeiten miteinander verknüpft. Es können also IST – Gatter oder ODER – Gatter verwendet werden. Den einzelnen Elementen können außerdem Ausfallwahrscheinlichkeiten hinterlegt werden, die mathematisch zu einer Wahrscheinlichkeit für das Top – Ereignis führen.

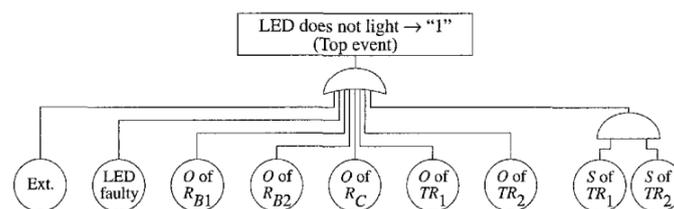


Abbildung 4-4: Fehlerbaumanalyse (FTA) [18, S. 76]

4.3.3 Root Cause Analysis – RCA

Die Fehler – Ursachen – Analyse (engl.: Root Cause Analysis (RCA)) ist eine Methode zur Bestimmung von Ursachen für bestimmte Fehler. Tritt also ein Problem auf, soll hinterfragt

werden, welche Gründe dieses Ereignis hat. Systematische Vorgehensweisen können etwa ein *Ishikawa – Diagramm* (Abbildung 4-5) oder die *Fünf – Warum – Fragen – Methode* sein.

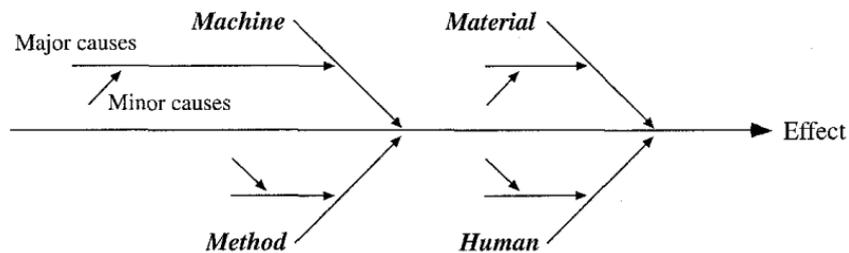


Abbildung 4-5: Ishikawa Diagramm [18, S. 77]

4.4 Qualitative & Quantitative RAM – Tests

Im Folgenden sollen *qualitative* und *quantitative RAM – Tests* vorgestellt werden. Diese Tests werden über den Lebenszyklus der Produkte angewandt, um sicherzustellen, dass diese zuverlässig und robust sind. Zusätzlich können anhand der Tests auch Schwachstellen und Fehler frühzeitig erkannt werden, die dann ausgebessert werden können. Im Optimalfall wird das vor der Inbetriebsetzung der Systeme durchgeführt um Frühausfälle zu vermeiden. So kann garantiert werden, dass die Ausfallverhalten der Komponenten zum einen den Analysen entsprechen und zum zweiten um diese auch zu verifizieren.

Qualitative Tests geben Auskunft über Fehlermodi oder Fehlerarten an. **Quantitative Tests** ermitteln die Zuverlässigkeit einer Komponente.

Es sei auch hier zu erwähnen, dass es natürlich weitere Tests gibt, die durchgeführt werden können. Meistens sind diese aber Varianten der hier vorgestellten.

4.4.1 High Accelerated Life Test – HALT

Im Wesentlichen ist die *Stark beschleunigte Grenzlastprüfung* (engl.: *High Accelerated Life Test (HALT)*) eine Methode, um die *Robustheit* eines Systems zu testen und damit *Frühausfälle* zu entdecken um diese anschließend zu vermeiden. Der Test wird in der Entwicklungsphase angewandt und wurde 1988 vorgestellt [20, S. 288].

Die Robustheit ist die Eigenschaft eines Produkts, die angibt, wie gut es Stress, der höher ist als im regulären Betrieb, aushält, ohne dabei auszufallen.

Um also Ausfälle unter höherer Stressbelastung (Abbildung 4-6) zu entdecken, wird ein System unter betriebsunübliche Bedingungen gesetzt, um frühzeitige Ausfälle zu provozieren. Ein Produkt ist üblicherweise genau auf die Betriebsbedingungen abgestimmt. Wird der Stress oder die Belastung nun höher oder niedriger als üblich angesetzt, kann es zu Ausfällen kommen. Diese Ausfälle spiegeln die Robustheit des Systems wieder. Die genauen Level, unter die das Produkt gesetzt werden soll, hängt von der Erfahrung der Testingenieure ab [20, S. 288].

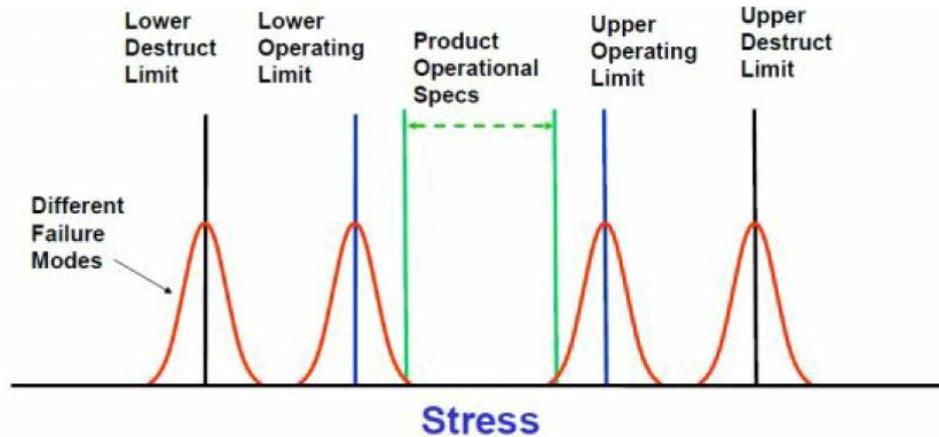


Abbildung 4-6: Stresslevel HALT [20, S. 288]

Parameter, die verändert werden können um „eine höhere Stressbelastung“ aufzubringen sind zum Beispiel:

- Temperatur
- Feuchtigkeit
- Spannung
- Vibration
- Luftdruck
- Kombinationen aus den genannten und/oder anderen Parametern

Als Beispiel kann eine Elektronikkomponente angegeben werden, bei der die Außentemperatur abwechselnd stark geändert wurde (siehe Abbildung 4-7). Sie wurde alternierend von ungefähr -60 °C auf 90 °C gebracht. Hier werden Tag – Nachtzyklen sehr intensiv nachgeahmt. Nach etwa 150 Minuten fiel das Bauteil aus. Unter normal beschleunigten Testbedingungen würde die Provokation eines solchen Ausfalls viel länger dauern [20, S. 288].

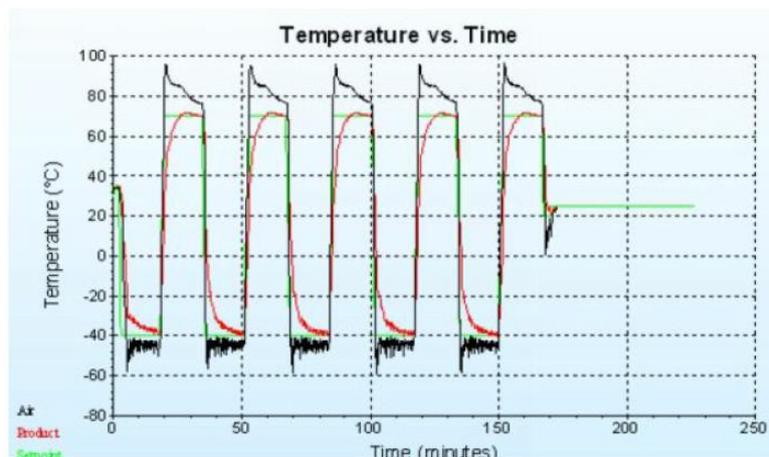


Abbildung 4-7: Temperaturprofil HALT Elektronikkomponente [20, S. 289]

Im Schienenfahrzeugbau werden sehr viele Redundanzen eingebaut, um Zuverlässigkeitsziele zu erreichen. Diese müssen jedoch sehr robust sein um *Common – Mode – Fehler* zu vermeiden [20, S. 288].

4.4.2 High Accelerated Stress Screen – HASS

Die *Belastungsschnellprüfung* (engl.: *High Accelerated Stress Screen (HASS)*) ähnelt sich sehr stark dem *HALT*. Dabei handelt es sich jedoch um eine zerstörungsfreie Prüfung. Es sollen Frühausfälle erkannt werden, ohne das gute Bauteile beschädigt werden. Hier werden also zum Beispiel starke Temperaturschwankungen oder Vibrationen vorgetäuscht um schadhafte Teile zu detektieren und auszusortieren.

Der Kunde erhält zwar ein vorbelastetes Produkt, nimmt dieses aber aufgrund höherer Zuverlässigkeit speziell in der Anfangsphase des Lebenszyklus in Kauf.

4.4.3 Quantitative Accelerated Life Test – QALT

Die *Beschleunigte Grenzlastprüfung* (engl.: *Quantitative Accelerated Life Test (QALT)*) ist eine Methode, um die Zuverlässigkeit zu prognostizieren. Nachdem *HALT* durchgeführt wurde und man sich sicher sein kann, dass das Produkt robust ist, sollte man auch konkrete Werte für die Zuverlässigkeit „ertesten“ können.

Auch hier müssen Stresslevel definiert werden, unter die das System gesetzt werden soll. Typische Parameter sind [20, S. 291]:

- Hohe/Tiefe Temperaturen
- Temperaturzyklen
- Spannungszyklen
- Schwingungsmuster
- Mechanische Stöße
- Hohe Luftfeuchtigkeit

Die genannten Parameter sollen das System zu Ausfällen bringen. So haben Temperaturwechsel, mechanische Beanspruchungen oder Feuchtigkeit bestimmte Auswirkungen auf gewisse Komponenten. Wenn die Belastungsprofile durchgeführt worden sind, müssen die Zeitintervalle, Stresslevel und Ausfälle genau dokumentiert vorliegen. Zuvor ist es von großer Bedeutung, ein definiertes Zuverlässigkeitsziel und die zu testende Losgröße zu bestimmen. Die Losgröße n kann berechnet werden. Dabei ist c das Konfidenzintervall und $R(t)$ das Zuverlässigkeitsziel [20, S. 293].

$$n = \frac{\ln(1 - c)}{\ln(R(t))} \quad (4-1)$$

Man erkennt sofort, dass die Losgröße n mit steigendem Zuverlässigkeitsziel $R(t)$ hohem Konfidenzintervall c wächst. Hier muss also ein Kompromiss gefunden werden. Dieser ist oft auch durch finanzielles Budget limitiert.

Um Stressfaktoren für die jeweiligen Tests zu finden, gibt es statistische Modelle, die die notwendigen Stressfaktoren angeben. Es wird von einer *Life – Stress – Relationship* gesprochen. Darunter fallen folgende Modelle, die aus Gründen des Umfangs dieser Diplomarbeit hier nicht weiter beschrieben werden können [20, S. 296ff.].

- Arrhenius Modell (Temperatur)
- Eyring Modell (Temperatur)
- Inverse Power Law Modell (Spannung, Schwingungen, Ermüdung)
- Temperature Humidity Modell (Temperatur & Feuchtigkeit)
- Thermal – Nonthermal Modell (Temperatur & Nichtthermale Parameter)
- General Loglinear Modell

Diese Modelle geben die Größe der anzuwendenden Parameter an. Um die *Zuverlässigkeit* zu bestimmen, sind sämtliche Ausfälle und Zeitintervalle (in denen die Fehler auftreten) zu dokumentieren und können anschließend ausgewertet werden.

5 Zuverlässigkeitswachstum – Reliability Growth

Von *Zuverlässigkeitswachstum* (engl.: *Reliability Growth*) spricht man, wenn ein Zuverlässigkeitskennwert über eine gewisse Zeitspanne hinweg ansteigt. Die Verbesserung dieser Parameter kann durch verschiedene Maßnahmen verstärkt werden. Zusätzlich spricht man auch von *Zuverlässigkeitszielen*, also Größen, die am Ende einer Betrachtungsperiode erreicht werden sollen.

Im Allgemeinen werden Zuverlässigkeitsziele so gesetzt, dass ein System ab der Betriebsphase eine vom Kunden geforderte Zuverlässigkeit vorweist. Dies kann durch geeignete Analysetechniken und Tests verifiziert werden. Wenn nun die Forderung nach einem Zuverlässigkeitswachstum hinzukommt, müssen besondere Anstrengungen getroffen werden, um die Zuverlässigkeit während eines bestimmten Zeitfensters verbessern zu können. Solche Wachstumsziele stellen wie bereits erwähnt, eine besondere Herausforderung dar, da solche Anforderungen bis dato nicht oft gestellt wurden.

Das Wachstum kann hauptsächlich in der Entwicklungs – und Testphase vorangetrieben werden. Durch geeignete Zuverlässigkeitswachstumsmodelle kann abgeschätzt werden, wie viele Verbesserungen in einem Zeitraum zu welchem Zuverlässigkeitsziel führen. Um diese Prognosen im Anschluss verifizieren zu können, werden spezielle Testprogramme erstellt, die die zuvor angewandten Wachstumsmodelle bestätigen.

In den folgenden Abschnitten werden solche Zuverlässigkeitswachstumsmodelle (engl.: *Reliability – Growth – Models*) vorgestellt. Anschließend werden noch Prüf – und Schätzverfahren für die benötigten Parameter angegeben.

Es sei zu erwähnen, dass es auch viele Forschungsinitiativen gibt, die sich mit dem Thema der Zuverlässigkeitsvorhersage mithilfe Maschinenlernalgorithmen beschäftigen (siehe etwa *Field-Reliability Predictions based on Statistical System Life Cycle Models* [32]). Die Erklärung und Einbindung dieser Modelle würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

5.1 Reliability – Growth – Modelle

Während der Produktentwicklung oder Prüfungsphase sind Schwachstellen zu erkennen und zu beseitigen. So kann Zuverlässigkeitswachstum erreicht werden. Es gibt mehrere mathematische Modelle, die dieses Verhalten schätzen und unterstützen können. Etwa können die Anzahl notwendiger Änderungen des Designs während der Entwicklung berechnet werden, auf der anderen Seite können notwendige Prüfdauern ermittelt werden.

In Tabelle 2-3 (Abschnitt 2.5) wurden bereits die vier relevanten Modelle genannt und in Kategorien eingeteilt. Die Einteilung erfolgt nach *Produktphase* (**Entwicklung** oder **Prüfung**), *Betrieb* (**kontinuierlich** oder **diskret**) und nach *Typ* (**klassisch** oder **Ansatz nach Bayes**). Welches dieser Modelle zum Einsatz kommt, muss nach genauer Beschreibung der Modelle in einer späteren Phase noch diskutiert werden. Klar ist jedenfalls, dass es für die Entwicklungsphase Methoden gibt, aber auch für die Prüfungsphase, die nachgelagert ist. Diese Modelle geben Vorgehensweisen an, welche eine Art Leitlinie für die Erreichung der Zuverlässigkeitsziele dient. Zu einem späteren Zeitpunkt, in einer Validierungsphase, muss durch Prüfungen gezeigt werden, dass es sich tatsächlich um Zuverlässigkeitswachstum handelt (Abschnitt 5.2). Dabei werden dann Ausfallzeiten und anderen Daten aufgenommen.

Bei der Planung von Prüfprogrammen zur Zuverlässigkeitsverbesserung spielen zwei Parameter eine wesentliche Rolle. Das sind

- die zu wertende **Prüfdauer**, die notwendig sein wird und
- die **Anzahl der zu wertenden Ausfälle**, die sich ereignen werden.

Diese beiden Parameter sind wesentlich für die Planung und die Einbettung des Prüfprogramms in den Zeitplan der Entwicklung eines Systems.

5.1.1 Modifiziertes Potenzgesetzmodell nach Krasich

Das erste Modell [5], welches hier vorgestellt wird, wird in der Entwicklungsphase eingesetzt. Einfluss auf das Modell nehmen abschwächende Auswirkungen von Ausfallarten, Verringerung von Eintrittswahrscheinlichkeiten, aber auch zeitliche Faktoren, die für die Verbesserung genötigt werden. M. Krasich hat das Modell 1998 vorgestellt. Es stellt eine Weiterentwicklung des bekannten Crow – NHPP – Potenzgesetzmodells, basierend auf dem Duane – Modell dar.

Mit dem *modifizierten Potenzgesetzmodell* kann die Anzahl und die Größenordnung der Verbesserungen am System geschätzt werden, die notwendig sind, um Zuverlässigkeitswachstum zu erreichen. Je früher Verbesserungen durchgeführt werden, desto stärker wirken diese sich auf ein Zuverlässigkeitswachstum aus. Der Ansatz, mit welchem die am ehesten eintretenden Ausfälle zuerst verbessert werden, rechtfertigt das Potenzmodell. Nach und nach werden dann die immer weniger oft eintretenden Ausfälle behandelt. Eine ständige Beobachtung der aktuellen Zuverlässigkeit mit den prognostizierten Zielen kann dazu dienen, die optimale Strategie zu wählen.

Die *Ausfallrate* $\lambda_a(t)$ des Systems kann ständig mitbeobachtet werden. Sie ergibt sich aus der *Anzahl der Verbesserungen* an den technischen Entwürfen $d(t)$. So kann es zu Fehlerabschwächungen kommen. Dabei stellt α_D die *Zuverlässigkeitswachstumsrate* dar. Sie ergibt sich aus der Abschwächung von Fehlern.

$$\lambda_a(t) = \lambda_{a0}(t) \cdot (1 + d(t))^{-\alpha_D} \quad (5-1)$$

Dabei ist λ_{a0} die geschätzte oder berechnete *Anfangsausfallrate*. Diese ergibt sich aus der *Anfangszuverlässigkeit* $R_0(T)$, wobei T die *Gesamtbetriebsdauer* des Systems darstellt.

$$\lambda_{a0} = -\frac{\ln(R_0(T))}{T} \quad (5-2)$$

D ist die *Gesamtanzahl der verwirklichten Verbesserungen* am System und t_D stellt somit die *Gesamtdauer der Entwurfsänderungen* dar. Mit einer linearen Näherung kann die *Anzahl der Verbesserungen* $d(t)$ angegeben werden.

$$d(t) = D \cdot \frac{t}{t_D} \quad (5-3)$$

$$\lambda_a(t) = \lambda_{a0} \cdot \left(1 + D \cdot \frac{t}{t_D}\right)^{-\alpha_D}$$

Die Zielausfallrate $\lambda_{aG}(t)$ ergibt sich dann mit dem Zuverlässigkeitsziel $R_G(T)$ analog zu (5-2) wie folgt.

$$\lambda_{aG}(t_D) = -\frac{\ln(R_G(T))}{T}$$

$$\lambda_{aG}(t_D) = \lambda_{a0} \cdot \left(1 + D \cdot \frac{t_D}{t_D}\right)^{-\alpha_D} = \lambda_{a0} \cdot (1 + D)^{-\alpha_D} \quad (5-4)$$

$$\lambda_{aG}(t_D) = -\frac{\ln(R_0(T))}{T} \cdot (1 + D)^{-\alpha_D}$$

Die Gesamtanzahl der verwirklichten Verbesserungen D kann nach Substitution von $\lambda_{aG}(t_D)$ mit dem Zuverlässigkeitsziel $R_G(T)$ folgend angegeben werden.

$$D = e^{\frac{-\left(\frac{\ln(R_G(T))}{\ln(R_0(T))}\right)}{\alpha_D}} - 1 \quad (5-5)$$

Gleichzeitig kann die Zuverlässigkeitswachstumsrate α_D beschrieben werden.

$$\alpha_D = \frac{\left(\frac{\ln(R_0(T))}{\ln(R_G(T))}\right)}{\ln(1 + D)} \quad (5-6)$$

Allgemein gilt für einen Zeitpunkt t und dem Intervall $T[0, t_D]$ für die Zuverlässigkeit $R(t, T)$.

$$R(t, T) = \exp(-\lambda_a(t) \cdot T) \quad (5-7)$$

Daraus ergibt sich das Zuverlässigkeitswachstumsmodell nach Krasich für die Entwicklungsphase $R(t, T)$.

$$R(t, T) = \exp\left(-\lambda_{a0} \cdot \left(1 + D \cdot \frac{t}{t_D}\right)^{-\alpha_D} \cdot T\right)$$

$$R(t, T) = \exp\left(\frac{\ln(R_0(T))}{T} \cdot \left(1 + D \cdot \frac{t}{t_D}\right)^{-\alpha_D} \cdot T\right) \quad (5-8)$$

$$R(t, T) = R_0(T) \left\{ \frac{\left(t_D + t \cdot \left(\frac{\ln(R_G(T))}{\ln(R_0(T))} \right)^{-\frac{1}{\alpha_D}} - t \right)}{t_D} \right\}^{-\alpha_D}$$

Um das Zuverlässigkeitswachstum zu verfolgen, kann man einfach die Zuverlässigkeit zu den Zeitpunkten der Verbesserungsmaßnahmen nachrechnen. So kann ein graphischer Vergleich zwischen dem Zuverlässigkeitswachstumsmodell $R(t, T)$ und den tatsächlichen Zuverlässigkeitswerten geschaffen werden.

Die Abbildung 5-1 zeigt einen solchen Vergleich. Der konstante Wert $R_G(T)$ gibt das Zuverlässigkeitsziel an. Diese soll grundsätzlich über die Gesamtbetriebsdauer T erreicht werden. Mithilfe der Parameter Entwicklungsdauer t_D , Anzahl der Verbesserungen D und der anfänglich geschätzten Zuverlässigkeit $R_0(T)$ kann das Modell $R(t, T)$ aufgestellt werden. Die dritte Kurve zeigt die tatsächlich auftretende Zuverlässigkeit nach den Verbesserungsschritten. So kann eine Art Tracking der erreichten Zuverlässigkeitsziele durchgeführt werden.

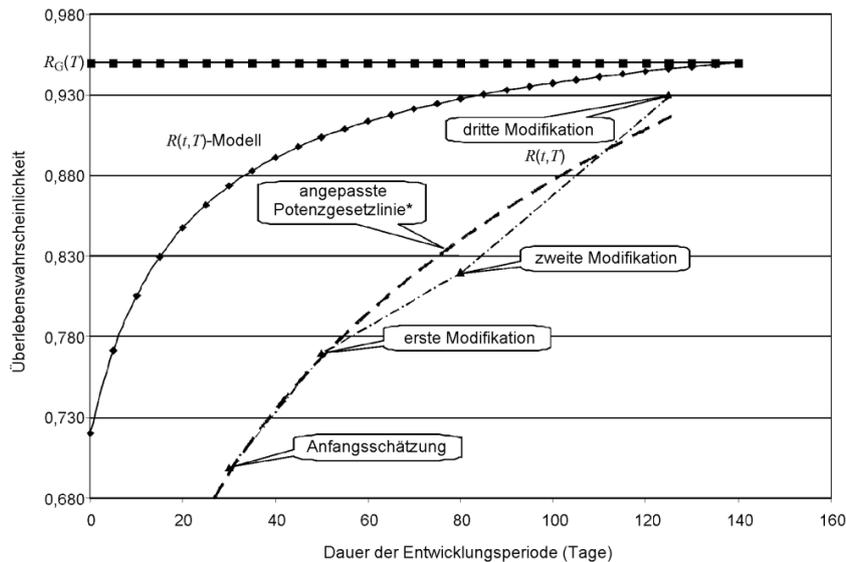


Abbildung 5-1: Geplantes und erzielt Zuverlässigkeitswachstum [5, S. 38]

5.1.2 Modifiziertes Bayes'sches IBM – Rosner – Modell

Das beschriebene *Modifiziertes Bayes'sches IBM – Rosner – Modell* [5] wird in der Entwicklung eingesetzt und wurde von Quigley und Walls erarbeitet. Nach der ersten Schätzung der Zuverlässigkeit, ausgehend von ersten Systemkonzepten, kann beschrieben werden, zu welchen Zeitpunkten Verbesserungen vorgenommen werden sollen. Das Anwachsen der Zuverlässigkeit wird als eine Funktion von der Ausbesserung von systematischen Fehlern, beziehungsweise Schwachstellen, gesehen. Je früher Korrekturen durchgeführt werden, desto besser wirkt es sich auf die Zuverlässigkeit aus.

Das Modell kann auf zwei Arten verwendet werden:

- Prognose der benötigten Zeit zum Erreichen des Zuverlässigkeitsziels (festgelegte Wachstumsrate)
- Schätzung der erforderlichen Wachstumsrate zum Erreichen des Zuverlässigkeitsziels (festgelegte Entwicklungsdauer)

Das Modell führt eine *erwartete Anzahl von Entwurfsschwachstellen* η_k in einer Fehlerklasse k ein. Es liegt an den Ingenieuren, die Fehlerklassen zu definieren. Selbiges gilt für die *Wahrscheinlichkeiten* p_{kj} , mit der die Ausfälle charakterisiert werden können. D bezeichnet die *Anzahl der potentiellen Schwachstellen*. K bezeichnet die *Anzahl der Fehlerklassen*.

$$\eta_k = \sum_{j=1}^{D_k} p_{kj} \quad (5-9)$$

Die *Anfangszuverlässigkeit* $R_1(T)$ kann wie folgt berechnet werden. Weitere Parameter dafür sind die *Ausfallraten der nicht – systematischen Ausfälle* λ_{NS} , sowie die *Ausfallraten von Fehlerklassen* λ_k . Diese beiden Werte können aus historischen Daten oder Schätzungen durch Experten genommen.

$$R_1(T) = \exp \left\{ - \left(\lambda_{NS} \cdot T + \sum_{k=1}^K \eta_k \cdot (1 - e^{-\lambda_k \cdot T}) \right) \right\} \quad (5-10)$$

Gleichzeitig lässt sich dazu auch das *Zuverlässigkeitswachstum* $R(T)$ berechnen.

$$R(T) = \exp \left\{ - \left(\lambda_{NS} \cdot T + \sum_{k=1}^K \eta_k \cdot e^{-\alpha_D \cdot T} \cdot (1 - e^{-\lambda_k \cdot T}) \right) \right\} \quad (5-11)$$

Voraussetzung dafür ist natürlich, dass die *Wachstumsrate* α_D bereits quantifiziert vorliegt. Andernfalls kann diese auch berechnet werden. $R_G(T)$ gibt wieder das *Zuverlässigkeitsziel* an und t_D die *Gesamtdauer der Entwurfsänderungen*.

$$\alpha_D = \frac{\ln \left(\frac{\sum_{k=1}^K \eta_k \cdot (1 - e^{-\lambda_k \cdot T})}{-\ln(R_G(T)) - \lambda_{NS} \cdot T} \right)}{t_D} \quad (5-12)$$

Es kann auch die *geschätzte Zeitdauer bis zum Erreichen des Zuverlässigkeitsziels* t_G berechnet werden.

$$t_G = \frac{\ln \left(\frac{\sum_{k=1}^K \eta_k \cdot (1 - e^{-\lambda_k \cdot T})}{-\ln(R_G(T)) - \lambda_{NS} \cdot T} \right)}{\alpha_D} \quad (5-13)$$

Die folgende Abbildung 5-2 zeigt ein Beispiel für ein prognostiziertes Zuverlässigkeitswachstum nach Bayes. Grundlage dafür sind ein zuvor definiertes *Zuverlässigkeitsziel* $R_G(T)$, sowie eine definierte *Wachstumsrate* α_D .

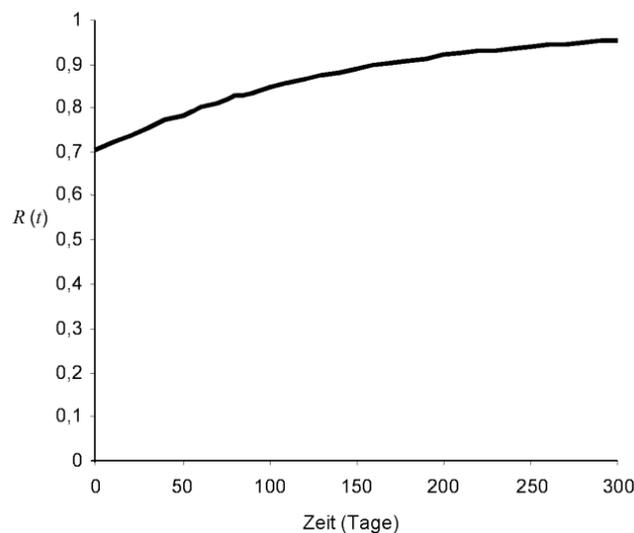


Abbildung 5-2: Beispiel Wachstumsmodell nach Bayes [5, S. 39]

5.1.3 Kontinuierliche Zuverlässigkeitsmodelle

Zu den hier zu beschreibenden Zuverlässigkeitswachstumsmodellen gehören zum einen das *Potenzgesetzmodell* (engl.: *Power Law*), sowie das *Modell mit fester Fehleranzahl* [5].

Bei den Prüfungen werden Ausfall – und Zeitdaten verwertet. Das *Potenzgesetzmodell* wird auf den gesamten Satz von zu wertenden Ausfällen angewandt. Das *Potenzgesetzmodell* ist durch folgende Gleichungen beschrieben.

Die erwartete akkumulierte Anzahl von Ausfällen $E[N(T)]$ wird folgend angegeben.

$$E[N(T)] = \lambda \cdot T^\beta \quad (5-14)$$

Dabei ist λ der *Skalenparameter* und β der *Formparameter*. β gibt an, ob Zuverlässigkeitswachstum vorherrscht oder nicht.

- $\beta > 1$: Sinkende Zuverlässigkeit
- $\beta = 1$: Gleichbleibende Zuverlässigkeit
- $\beta < 1$: Zuverlässigkeitswachstum

Die *Ausfallintensität* $z(T)$ wird folgend angegeben.

$$z(T) = \frac{d}{dT} E[N(T)] = \beta \cdot \lambda \cdot T^{\beta-1} \quad (5-15)$$

Den *mittleren Ausfallabstand* $\theta(T)$ kann man auch ermitteln.

$$\theta(T) = \frac{1}{z(T)} \quad (5-16)$$

Die Parameter λ und β können mithilfe des *Maximum – Likelihood – Verfahrens* geschätzt werden (siehe dazu Abschnitt 5.2). Zusätzlich können dann noch *Anpassungstests* (engl.: *Goodness – Of – Fit Tests*) durchgeführt werden. Siehe dazu ebenfalls Abschnitt 5.2.

Das *Potenzgesetzmodell* zeichnet sich durch eine einfache Berechnung und Handhabung aus. Es wird für die Planung zukünftiger Programme verwendet.

Als zweites Modell wird das *Modell mit fester Fehleranzahl* in der Literatur angegeben. Dabei handelt es sich um das *IBM – Rosner – Modell*. Es geht davon aus, dass sich Ausfälle mit der konstanten Rate z ereignen. Weiters wird angenommen, dass es eine feste, aber unbekannte Anzahl von nicht zufälligen Fehlern gibt.

Die *Änderungsrate* $\frac{dN(T)}{dT}$ ist proportional zur aktuellen *Anzahl von Ausfällen* $N(T)$.

$$\begin{aligned} \frac{dN(T)}{dT} &= -K_2 \cdot N(T) \\ N(T) &= e^{-K_2 \cdot T + const.} \end{aligned} \quad (5-17)$$

Die *erwartete Anzahl der Ausfälle* $E[N(T)]$ wird folgend angegeben.

$$\begin{aligned} E[N(T)] &= \text{Zufällige Ausfälle} + \text{Ausfälle bei } T = 0 - \text{Ausfälle bei } T \\ E[N(T)] &= z \cdot T + K_1 \cdot (1 - e^{-K_2 \cdot T}) \end{aligned} \quad (5-18)$$

Das vorliegende Modell lässt eine Schätzung des Zeitpunktes zu, an welchem das Produkt zu q [0,1] Teilen fehlerfrei gemacht sein wird. Die *beseitigten nicht zufälligen Fehler* zum Zeitpunkt t ergeben sich wie folgt. Zusätzlich ist der *fehlerfrei gemachte Teil* $q(T)$ angegeben.

$$N(0) - N(t) = K_1 \cdot (1 - e^{-K_2 \cdot T}) \quad (5-19)$$

$$q(T) = \frac{K_1 \cdot (1 - e^{-K_2 \cdot T})}{K_1} = (1 - e^{-K_2 \cdot T})$$

Natürlich muss auch K_2 geschätzt werden. Dies kann anhand des *Maximum – Likelihood – Verfahrens* ermittelt werden (siehe dazu Abschnitt 5.2). Nun kann der Zeitpunkt t_q angegeben werden, bei dem der gewünschte Teil q des Systems fehlerfrei gemacht wurde.

$$t_q = -\frac{\ln(1 - q)}{K_2} \quad (5-20)$$

Der *mittlere Ausfallabstand* $\theta(T)$ berechnet sich wie folgt.

$$\theta(T) = \frac{t}{\text{Gesamtzahl der Ausfälle in } (0, t)} \quad (5-21)$$

5.1.4 Diskretes Zuverlässigkeitswachstumsmodell nach Crow

Das *Diskrete Zuverlässigkeitswachstumsmodell* [5] wurde von Crow entwickelt. Es eignet sich für Systeme zum einmaligen Gebrauch. Bei den Prüfungen werden mehrere gleiche Komponenten getestet. Entweder es kommt zu einem Ausfall oder einem Erfolg. Die Prüfungen sind in mehreren Stufen aufgebaut. Nach der ersten Stufe werden Korrekturmaßnahmen ergriffen, die die Zuverlässigkeit verbessern. Anschließend wird das System so neu konfiguriert, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall oder Erfolg gleichbleibt. Das *Diskrete Wachstumsmodell* besitzt dasselbe Wachstumsmuster und dieselbe Lernkurve wie das Potenzgesetzmodell für kontinuierliche Daten. Dies könnte eventuell für LED – Module oder Displays geeignet sein.

Es werden k Stufen festgelegt. Die *Zuverlässigkeit* wird als R_i angegeben, wobei $i = 1, \dots, k$ ist. Jeder Versuch in Stufe i hat dieselbe Erfolgswahrscheinlichkeit R_i . Sie wird in der Stufe i konstant gehalten. m_i gibt die Ausfälle pro Stufe an und n_i die Anzahl der Versuche. Die *kumulative Anzahl an Versuchen* über i Stufen wird als t_i bezeichnet.

$$t_i = \sum_{j=1}^i n_j \quad (5-22)$$

Die *Ausfallwahrscheinlichkeit* f_i wird folgend angegeben. Wieder sind β und λ *Formparameter* und *Skalenparameter*.

$$f_i = \frac{\lambda \cdot t_i^\beta - \lambda \cdot t_{i-1}^\beta}{n_i} \quad (5-23)$$

Die *erwartete Anzahl von Ausfällen* $E[N(t_i)]$ wird demnach angegeben.

$$E[N(t_i)] = \sum_{j=1}^i n_j \cdot f_j = \lambda \cdot t_i^\beta \quad (5-24)$$

Um die Werte mithilfe der *Maximum – Likelihood – Methode* β und λ zu schätzen gibt es zwei Bedingungen, die erfüllt sein müssen.

$$\sum_{i=1}^K [H_i] \cdot [S_i] = 0 \quad (5-25)$$

$$\sum_{i=1}^K [U_i] \cdot [S_i] = 0$$

$$H_i = [t_i^{\hat{\beta}} \cdot \ln(t_i) - t_{i-1}^{\hat{\beta}} \cdot \ln(t_{i-1})]$$

$$U_i = [t_i^{\hat{\beta}} - t_{i-1}^{\hat{\beta}}]$$

$$S_i = \left[\frac{m_i}{\hat{\lambda} \cdot t_i^{\hat{\beta}} - \hat{\lambda} \cdot t_{i-1}^{\hat{\beta}}} - \frac{n_i - m_i}{n_i - \hat{\lambda} \cdot t_i^{\hat{\beta}} + \hat{\lambda} \cdot t_{i-1}^{\hat{\beta}}} \right]$$

Mit den geschätzten Werten $\hat{\beta}$ und $\hat{\lambda}$ kann auch f_i und R_i beschrieben werden.

$$\hat{f}_i = \frac{\hat{\lambda} \cdot t_i^{\hat{\beta}} - \hat{\lambda} \cdot t_{i-1}^{\hat{\beta}}}{n_i} \tag{5-26}$$

$$\hat{R}_i = 1 - \hat{f}_i$$

5.2 Prüf – und Schätzverfahren für das kontinuierliche Potenzgesetzmodell

In den folgenden Abschnitten sind zusätzliche notwendige Methoden für die Erreichung von Zuverlässigkeitszielen angegeben. Zum einen sind das Wachstumsprüfungen und Schätzung von Parametern (Abschnitt 5.2.1), die aus Prüfungsdaten resultieren. Um die Qualität der Daten zu garantieren, müssen Anpassungsprüfungen (Abschnitt 5.2.2) und Vertrauensbereiche (Abschnitt 5.2.3) anschließend durchgeführt und ermittelt werden. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 5-3 dargestellt.



Abbildung 5-3: Vorgehensweise Zuverlässigkeitswachstumsbewertung

5.2.1 Wachstumsprüfung und Schätzung der Parameter

Will man nun überprüfen, ob die ausgewerteten Daten aus Beobachtungen einem Wachstum entsprechen, müssen Wachstumsprüfungen [5] durchgeführt werden. Diese Wachstumsprüfung kann in zwei Fällen unterschieden werden.

Der erste Fall kann angewandt werden, wenn die Zeitpunkte von allen zu wertenden Ausfällen bekannt sind. Beim zweiten Fall liegen die Daten in gruppierten Zeitintervallen vor.

Fall 1 – Daten zu den Zeitpunkten aller zu wertenden Ausfälle

Zu allererst müssen die nicht zu wertenden Ausfälle ausgeschlossen werden. Nachdem die gesamten zu wertenden Prüfdauern und die Zeitpunkte der Ausfälle gesammelt worden sind, kann die Kenngröße U (je nach Testtyp) berechnet werden. Dabei ist zwischen *Typ – I* und *Typ – II* Tests zu unterscheiden (siehe Abschnitt 2.5). T^* und T_N geben die *gesamt zu wertenden Prüfdauern* für *Typ – I* und *Typ – II* Tests an. N ist die *Gesamtzahl der zu wertenden Ausfälle* und T_i ist die *zu wertende Prüfdauer beim Ausfall i* .

$$U_I = \frac{\sum_{i=1}^N T_i - N \cdot \frac{T^*}{2}}{T^* \cdot \sqrt{\frac{N}{12}}} \quad (5-27)$$

$$U_{II} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} T_i - (N-1) \cdot \frac{T_N}{2}}{T_N \cdot \sqrt{\frac{N-1}{12}}}$$

U wird dabei näherungsweise als standardisiert und normalverteilt angenommen. Der Mittelwert ist dabei 0 und die Standardabweichung 1. Mithilfe einer zweiseitigen Prüfung auf negatives oder positives Wachstum bei einem *Signifikanzniveau* α , kann auf Zuverlässigkeitswachstum geprüft werden.

$$U < -u_{1-\alpha/2} \text{ oder } U > u_{1-\alpha/2} \quad (5-28)$$

Ist die obenstehende Bedingung erfüllt, herrscht positives, beziehungsweise negatives Zuverlässigkeitswachstum.

Nächster Schritt ist die Bildung der *Summe* S_1 (je nach Testtyp).

$$S_{1I} = \sum_{i=1}^N \ln\left(\frac{T^*}{T_i}\right) \quad (5-29)$$

$$S_{1II} = \sum_{i=1}^N \ln\left(\frac{T_N}{T_i}\right)$$

Somit lässt sich β (je nach Testtyp) schätzen.

$$\hat{\beta}_I = \frac{N-1}{S_{1I}} \quad (5-30)$$

$$\hat{\beta}_{II} = \frac{N-2}{S_{1II}}$$

Auch der Parameter λ (je nach Testtyp) lässt sich mit folgender Formel berechnen.

$$\hat{\lambda}_I = \frac{N}{T^* \hat{\beta}_I}$$

$$\hat{\lambda}_{II} = \frac{N}{T_N \hat{\beta}_{II}}$$
(5-31)

Die *Ausfallintensität* $z(T)$ und der *mittlere Ausfallabstand* $\theta(T)$ kann zusätzlich noch angegeben werden.

$$\hat{z}(T) = \hat{\lambda} \cdot \hat{\beta} \cdot T^{\hat{\beta}-1}$$

$$\hat{\theta}(T) = \frac{1}{\hat{z}(T)}$$
(5-32)

Fall 2 – Daten zu den Zeitpunkten von Gruppen zu wertender Ausfälle

Wenn die Daten gruppiert vorliegen, also mehrere bekannte Zeitpunkte von Ausfällen in einem gewissen Zeitfenster, kann der Fall 2 angewandt werden. Zu allererst müssen wieder die nicht zu wertenden Ausfälle ausgeschlossen werden. Das Zeitintervall $[0; T]$ ist in d Intervalle eingeteilt. N_i gibt die *zu wertenden Ausfälle im Intervall* i $[1; d]$ an. Die *Gesamtzahl der zu wertenden Ausfälle* N ergibt sich wie folgt.

$$N = \sum_{i=1}^d N_i$$
(5-33)

Dabei muss darauf geachtet werden, dass für kein Intervall $\rho_i \cdot N$ kleiner als 5 ist.

$$\rho_i = \frac{t(i) - t(i-1)}{t(d)}$$
(5-34)

Nach der erfolgten Prüfung ist nun die *Kenngroße* χ^2 zu berechnen.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^d \frac{(N_i - \rho_i \cdot N)^2}{\rho_i \cdot N}$$
(5-35)

Man nimmt an, dass die Ausfalldauern einem homogenen Poisson – Prozess folgen. Die *Kenngroße* χ^2 kann nun dazu verwendet werden, zu testen, ob Zuverlässigkeitswachstum vorherrscht oder nicht. Es ergibt sich beim Signifikanzniveau α ein kritischer Wert CV .

$$CV = \chi^2_{1-\alpha} \cdot (1 - d)$$
(5-36)

Wenn gilt $\chi^2 \geq CV$, dann herrscht Zuverlässigkeitswachstum. Um nun den *Formparameter* β abschätzen zu können, muss folgende Gleichung genügen.

$$\sum_{i=1}^d N_i \cdot \left(\frac{t(i)^{\hat{\beta}} \cdot \ln(t(i)) - t(i-1)^{\hat{\beta}} \cdot \ln(t(i-1))}{t(i)^{\hat{\beta}} - t(i-1)^{\hat{\beta}}} - \ln(t(d)) \right) = 0$$
(5-37)

Nach Erhalt von β ergeben sich dann auch λ , die *Ausfallintensität* $z(T)$ und der *mittlere Ausfallabstand* $\theta(T)$.

$$\hat{\lambda} = \frac{N}{t(d)^{\hat{\beta}}}$$

$$\hat{z}(T) = \hat{\lambda} \cdot \hat{\beta} \cdot T^{\hat{\beta}-1} \tag{5-38}$$

$$\hat{\theta}(T) = \frac{1}{\hat{z}(T)}$$

5.2.2 Anpassungsprüfung

Nach Schätzung der Werte für *Ausfallrate* λ , die *Ausfallintensität* $z(T)$ und den *mittleren Ausfallabstand* $\theta(T)$ muss noch festgestellt werden, ob diese Werte auch einer bestimmten Verteilung zugeordnet werden können. Bei der *Anpassungsprüfung* (engl.: *Goodness – Of – Fitness Test*) [5] wird auch wieder zwischen zwei Fällen unterschieden. Der erste Fall behandelt wieder die Situation, dass zu jedem Zeitpunkt eines Ausfalls der genaue Zeitpunkt dokumentiert ist. Im Gegensatz dazu beschreibt der zweite Fall zeitlich in Intervallen gruppierte Ausfallzeitpunkte.

Fall 1 – Daten zu den Zeitpunkten aller zu wertenden Ausfälle

Das Verfahren beginnt damit, die sogenannte *Cramér – von – Mises Kenngröße* C^2 zu ermitteln. Diese kann für *Typ – I Tests*, als auch *Typ – II Tests* gefunden werden. Spezifische Werte je nach Testtyp sind in der folgenden Tabelle 5-1 ersichtlich.

Testtyp	T	M
Typ – I Test	T^*	N
Typ – II Test	T_N	$N - 1$

Tabelle 5-1: Kennwerte je nach Testtyp

$$C^2(M) = \frac{1}{12 \cdot M} + \sum_{i=1}^M \left(\left(\frac{T_i}{T} \right)^{\hat{\beta}} - \frac{2 \cdot i - 1}{2 \cdot M} \right)^2 \tag{5-39}$$

Ist der kritische Wert $C^2(M)$ kleiner als der in der Abbildung 5-4 ersichtliche, dann muss ein *Potenzgesetzmodell* angenommen werden. Die Hypothese stimmt also.

M	Kritischer Wert der Kenngröße
3	0,154
4	0,155
5	0,160
6	0,162
7	0,165
8	0,165
9	0,167
10	0,167
11	0,169
12	0,169
13	0,169
14	0,169
15	0,169
16	0,171
17	0,171
18	0,171
19	0,171
20	0,172
30	0,172
≥ 60	0,173

Abbildung 5-4: Kritische Werte 10 % Signifikanzniveau [5, S. 33]

Fall 2 – Daten zu den Zeitpunkten von Gruppen zu wertender Ausfälle

Wenn die Ausfalldaten also gruppiert in Intervallen vorliegen, kann folgende Vorgehensweise herangezogen werden. Die *erwartete Anzahl von Ausfällen im Zeitintervall* e_i wird folgend ermittelt. Das Intervall ist $[t(i - 1); t]$.

$$e_i = \hat{\lambda} \cdot (t(i)^{\hat{\beta}} - t(i - 1)^{\hat{\beta}}) \quad (5-40)$$

Es muss stets gelten $e_i > 5$. Folgende *Kenngroße* χ^2 lässt sich berechnen.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^d \frac{(N_i - e_i)^2}{e_i} \quad (5-41)$$

Diese *Kenngroße* χ^2 muss kleiner als der Tabellenwert mit $d - 2$ Freiheitsgraden und 10 % Signifikanzniveau (aus der χ^2 – Verteilung) sein. Dann ist die Hypothese, dass es sich um ein Potenzgesetzmodell handelt, verifiziert.

5.2.3 Vertrauensbereich des Formparameters

Wie schon an einer vorigen Stelle angegeben, handelt es sich beim *Formparameter* β [5] um einen Indikator für Zuverlässigkeitswachstum. Es gelten folgende Angaben.

- $\beta > 1$: Sinkende Zuverlässigkeit
- $\beta = 1$: Gleichbleibende Zuverlässigkeit
- $\beta < 1$: Zuverlässigkeitswachstum

Um die Qualität der Schätzung von β angeben zu können, werden sogenannte *Vertrauensbereiche* ermittelt. Auch hier wird wieder zwischen einem ersten Fall und einem zweiten Fall unterschieden. Siehe oben weiter für eine genaue Definition.

Fall 1 – Daten zu den Zeitpunkten aller zu wertenden Ausfälle

Nachdem β in Abschnitt 5.2.1 geschätzt wurde kann für *Typ – I Tests* folgend die *untere Vertrauensgrenze* β_{LB} und die *obere Vertrauensgrenze* β_{UB} berechnet werden. Werte für die χ^2 – Verteilung sind aus geeigneter Literatur zu entnehmen.

$$D_L = \frac{\chi_{0,05}^2(2 \cdot N)}{2 \cdot (N - 1)}$$

$$D_U = \frac{\chi_{0,95}^2(2 \cdot N)}{2 \cdot (N - 1)} \quad (5-42)$$

$$\beta_{LB} = D_L \cdot \hat{\beta}$$

$$\beta_{UB} = D_U \cdot \hat{\beta}$$

Auch für *Typ – II Tests* können die *untere Vertrauensgrenze* β_{LB} und die *obere Vertrauensgrenze* β_{UB} berechnet werden. Werte für die χ^2 – Verteilung sind aus geeigneter Literatur zu entnehmen.

$$D_L = \frac{\chi_{0,05}^2(2 \cdot (N - 1))}{2 \cdot (N - 2)}$$

$$D_U = \frac{\chi_{0,95}^2(2 \cdot (N - 1))}{2 \cdot (N - 2)} \quad (5-43)$$

$$\beta_{LB} = D_L \cdot \hat{\beta}$$

$$\beta_{UB} = D_U \cdot \hat{\beta}$$

Fall 2 – Daten zu den Zeitpunkten von Gruppen zu wertender Ausfälle

Falls die Daten in gruppierten Zeitintervallen vorliegen, sind nach der Schätzung von β in Abschnitt 5.2.1 folgende Schritte durchzuführen, um auf die passenden Vertrauensparameter *untere Vertrauensgrenze* β_{LB} und *obere Vertrauensgrenze* β_{UB} zu kommen.

$$P(i) = \frac{t(i)}{t(d)}$$

$$A = \sum_{i=1}^d \frac{(P(i)^{\hat{\beta}} \cdot \ln(P(i)^{\hat{\beta}}) - P(i-1)^{\hat{\beta}} \cdot \ln(P(i-1)^{\hat{\beta}}))^2}{P(i)^{\hat{\beta}} - P(i-1)^{\hat{\beta}}}$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{A}} \quad (5-44)$$

$$S = \frac{1,64 \cdot C}{\sqrt{N}}$$

$$\beta_{LB} = (1 - S) \cdot \hat{\beta}$$

$$\beta_{UB} = (1 + S) \cdot \hat{\beta}$$

5.2.4 Vertrauensbereiche des MTBF

Der *mittlere Ausfallabstand MTBF* $\theta(T)$ wurde im Abschnitt 5.2.1 geschätzt. Auch hier ist es notwendig die *Vertrauensbereiche* [5] anzugeben.

Auch hier wird wieder zwischen einem ersten Fall und einem zweiten Fall unterschieden. Für die beiden Berechnungen siehe in geeigneter Literatur [5].

5.3 Zuverlässigkeit von Software

Die *Zuverlässigkeit von Software* wird mit steigender Anzahl verbauter komplexer Anwendungen, gesteuert durch diverse Softwareprogramme, ein immer wichtiger werdender Faktor hinsichtlich Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Gesamtsystemen.

Es sei zu erwähnen, dass in dieser Diplomarbeit nicht näher in die Thematik Softwarezuverlässigkeit eingegangen werden kann. Das würde den Umfang dieser Arbeit sprengen. Es gibt eine Vielzahl an Methoden, die etwa Errors suchen, die Komplexität von Softwareprogrammen ermitteln oder eben Fehlerraten ermitteln. Für den interessierten Leser sei deshalb auf die Literatur verwiesen.

Softwarezuverlässigkeit ist die „*Wahrscheinlichkeit, dass eine gegebene Software unter bestimmten Voraussetzungen, in einem betrachteten Zeitintervall ohne Fehler funktioniert.*“ [33, S. 125]

Interne und externe Kommunikation, intelligente Kontrollmechanismen und autonome Systeme müssen sich auf zuverlässige Software verlassen können. Ähnlich wie bei Hardwarekomponenten muss die Zuverlässigkeit in der Entwicklung nachgewiesen werden. Typischerweise geschieht das mithilfe von geeigneten Verifikations – und Validierungsprozessen. Trotzdem ist es notwendig, zusätzlich zu den herkömmlichen Verfahren geeignete Methoden zu finden, die mit einem vernünftigen Arbeitsaufwand die Zuverlässigkeit von verbauter Software voraussagen können. Da es zu einem vermehrten Einsatz von Software kommt, die auch immer komplexer wird, wäre es eine zu große Herausforderung für die Hersteller, sämtliche Codezeilen zu testen. Eine Zeile Code entspricht etwa vier Zeilen an Softwaretests. Man erkennt also, dass spezielle Methoden notwendig sind, die die Zuverlässigkeit von immer komplexer werdender Software beschreiben und nachweisen können [20, S. 318].

Software hat im Vergleich zu Hardware folgende Eigenschaften [20, S. 318]:

- **Keine Alterungserscheinungen:** Softwarefehler weisen nie Verhalten auf, die in einer steigenden Fehlerrate resultieren. Sie sind grundsätzlich nur von bestimmten Eingangsgrößen abhängig, es kommt also zu keinem Alterungsprozess. Frühausfälle kommen aber vor, sie entstehen in der Entwicklung und werden dann durch Upgrades der Software ausgebessert.
- **Schwierige Fehlerdetektion:** Da Softwarefehler meistens von vorausgehenden Störungen (*Fault* und *Errors*; siehe weiter unten) ausgelöst werden, ist es schwierig, diese zu finden. Die Störungen treten nur unter speziellen Bedingungen auf, die oft nicht bekannt sind. Somit ist die Fehlerdetektion von Softwarefehlern kein leichtes Vorhaben und führt zu Schwierigkeiten.
- **Schwierige Fehlerprognose:** Softwarefehler sind schwierig vorherzusagen. Ähnlich wie bei der Fehlerdetektion ist es nicht einfach, Fehlerprognosen zu stellen. Spezielle Bedingungen und Eingaben können sich in Störungen auswirken, die Fehler provozieren. Diese Bedingungen sind oft nicht eindeutig und können deshalb nicht systematisch bewertet werden. Zusätzlich kommt dazu, dass jede Software sehr spezifisch und ein Einzelstück ist. Man hat daher eingeschränkten Zugriff auf bereits bekannte Fehlerdaten, die man verwenden könnte, um Fehlerprognosen zu stellen.
- **Softwarefehler sind nicht zeitabhängig:** Softwarefehler treten nicht zeitabhängig auf, sondern sind wie bereits besprochen, abhängig von den vorherrschenden Umgebungsbedingungen oder Eingabedaten. Es ist daher nicht möglich, Softwareprogramme über gewisse Zeitintervalle zu testen und daraus Zuverlässigkeit zu berechnen.

Wie bereits erwähnt, ist Software in den meisten Fällen sehr spezifisch auf eine Komponente oder eine Funktion zugeschnitten. Jedes Programm muss individuell getestet und analysiert werden. Die meisten Fehler entstehen, ähnlich wie bei der Hardware, in der Entwicklungsphase. Eine falsche Speichergröße, inkorrekte Hardware – Software – Schnittstellen und viele weitere Faktoren können schuld an Ausfällen sein.

Speziell bei Softwarefehlern gibt es auch vorgelagerte Effekte, die diese triggern. Es ist daher wichtig den Unterschied zwischen *Error*, *Fault* und *Failure* zu kennen. Die Begriffe werden hier auf Englisch angegeben, denn im Deutschen sind sie nicht eindeutig klar zu trennen.

- **Error:** Eine Diskrepanz zwischen, vom Programm berechneter (oder gemessener) Größe und der tatsächlichen (theoretisch) korrekten Größe. Man spricht von einem falschen Zustand in der Systemstruktur. Dies kann ausgelöst sein durch einen mentalen Denkfehler des Programmierers.
- **Fault:** Ein struktureller Auslöser eines *Failure*. Dies kann etwa ein falsches Statement in einem Programm oder ein falscher Prozess sein. Oft ist es die Folge eines *Errors* des Programmierers.
- **Failure:** Ein Nichterfüllen der geforderten Funktion eines Systems.

Die Abbildung 5-5 zeigt den schematischen Zusammenhang zwischen Softwarefaults, Eingabedaten, sowie dem Softwarefehler, der daraus resultieren kann.

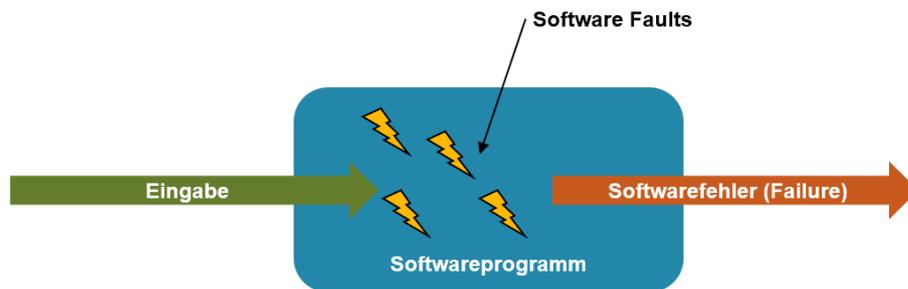


Abbildung 5-5: Zusammenhang Faults & Failure [33, S. 2]

Die Abbildung 5-6 zeigt einen typischen Fehlerratenverlauf von Software. Bevor die Software in Betrieb geht, wird diese getestet und Debugging durchgeführt. Debugging sind Routineprozesse, die Bugs und Errors orten und diese dann entfernen. So kann in den ersten Phasen des Produktlebens die Softwarefehlerrate gesenkt werden. Problematisch kann es bei großen Softwareprogrammen werden, da diese so umfangreich sind und die Software in kleine Pakete geteilt wird, die dann getrennt betrachtet werden müssen. In der Abbildung zeigt die rote Linie eine ideale Fehlerratenkurve an. Die schwarze Kurve zeigt eine eher realistische Variante an. Dabei ist ersichtlich, dass Upgrades in der Betriebsphase notwendig sind, um die Software auf geänderte Umweltbedingungen oder andere Gegebenheiten anzupassen. Mit diesen Upgrades werden dann wieder unvermeidliche Fehlerquellen mit eingebracht, die die Fehlerrate wieder leicht anheben.

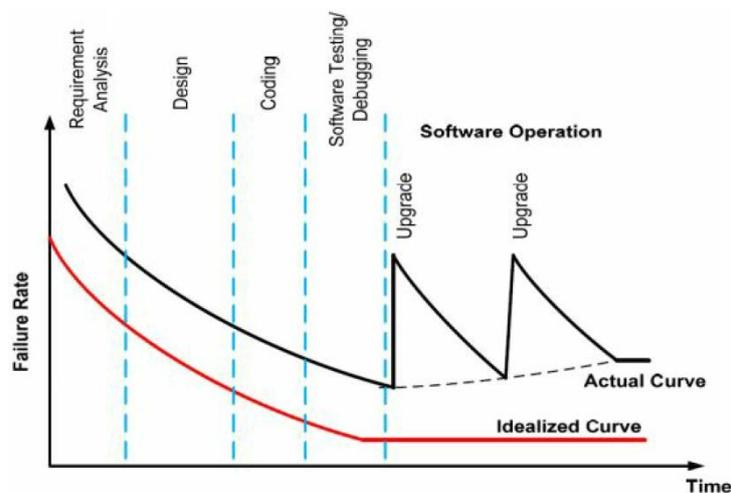


Abbildung 5-6: Fehlerrate von Software [20, S. 320]

Um Fehlerraten oder Softwarezuverlässigkeit zu messen, gibt es verschiedene Methoden. Grundsätzlich spricht man von drei Arten von Tests [20, S. 320]:

- **Black – Box – Test:** Es werden nur Ausgangsgrößen, also im Wesentlichen, die Funktion unter Betriebsbedingungen betrachtet. Die Struktur der Software ist dabei irrelevant.
- **White – Box – Test:** Bei diesem Test werden die Softwarestrukturen auf ihre Zuverlässigkeit überprüft.
- **Metrik – basierter Test:** Ein neuer Ansatz, um Softwarezuverlässigkeit, basierend auf statistischen Werten (Anzahl der Codezeilen, Anzahl Statements, Komplexität...) und Charakteristiken vom Entwicklungsprozess (Erfahrung der Entwickler, Testmethoden...) zu prognostizieren.

Es gibt **deterministische** und **probabilistische** Ansätze, die verwendet werden können. Zu den wohl bekanntesten deterministischen Methoden zählt das *Halstead's Software Metric*. Mit diesem Tool kann die Zahl der Errors in einem Programm geschätzt werden. Dabei kann die Komplexität der Software geschätzt werden und anschließend die Schwierigkeit beim Finden und Debuggen angegeben werden [33, S. 153].

Bei den probabilistischen Ansätzen kann zusätzlich noch in verschiedene Gruppen unterteilt werden. Die wichtigste für Zuverlässigkeitsbetrachtungen ist wahrscheinlich die Bestimmung der Fehlerraten. Deshalb werden hier zwei Methoden angegeben, die diesen Parameter schätzen.

5.3.1 Jelinski & Moranga – Modell

Das *Jelinski & Moranga – Modell* ist eines der ersten Softwarezuverlässigkeitsmodelle vom Jahre 1972. Folgende Annahmen werden getroffen [33, S. 164]:

- Es gibt eine initiale Menge von bereits bereinigten Faults N .
- Jeder Fault ist in einer Testphase unabhängig und gleich verteilt.
- Zeitintervalle zwischen Softwarefehlern sind unabhängig und exponentiell verteilt.
- Nach Auftreten eines Fehlers wird ein dazugehöriger Fault entfernt.
- Die Softwarefehlerrate ist grundsätzlich konstant in einer betrachteten Zeiteinheit ohne Modifikationen.
- Die Detektionsrate ist proportional zur Anzahl der Faults in der Software.

Die Fehlerrate $\lambda(t_i)$ wird folgend beschrieben. t_i beschreibt die Zeit zwischen dem i – Fehler und dem $(i - 1)$ – Fehler. Für i gilt $[1; N]$. Die *Proportionalkonstante* ϕ gibt die Auswirkungen an, die ein Fault auf das gesamte Softwareprogramm ausübt. N und ϕ können mit geeigneten Methoden geschätzt werden [33, S. 164].

$$\lambda(t_i) = \phi \cdot (N - i + 1) \quad (5-45)$$

Die *Zuverlässigkeit* $R(t_i)$ wird durch folgende Formel beschrieben [33, S. 165].

$$R(t_i) = e^{-\phi \cdot (N - i + 1) \cdot t_i} \quad (5-46)$$

5.3.2 Inflection S – Shaped Modell

Speziell in der Softwarezuverlässigkeitsbetrachtung gibt es das sogenannte *S – Shaped Modell*. Die meisten Modelle für die Zuverlässigkeit geben eine fallende Fehlerdetektionsrate mit der steigenden Anzahl an gefundenen (und reparierten) Fehlern in einem System an. Anders verhält es sich bei *S – Shaped Modell*. Hier wird angenommen, dass die Fehlerdetektionsrate während einer Testphase sogar ansteigt. Je mehr Fehler gefunden werden, desto einfacher wird es, noch mehr Fehler zu finden. Die sogenannte *Inflektionsrate* gibt dabei das Verhältnis zwischen den zu findenden Fehlern und der Gesamtanzahl von Fehlern im System an [34].

Für das Modell wird angenommen, dass

- manche Fehler erst detektierbar werden, wenn andere gefunden werden,
- die Detektionsrate proportional zur Gesamtzahl der detektierbaren Fehler im System ist,
- die Fehlerrate jedes detektierbaren Fehlers konstant und identisch ist und
- alle Fehler entfernt werden können [34].

Das Modell basiert auf dem nichthomogenen – Poisson – Prozess mit einer *Mittelwertfunktion* $\mu(t)$. Dabei ist c die *Detektionsrate*, K die *Gesamtzahl der Defekte* und i die *Inflektionsrate*.

$$\mu(t) = K \cdot \frac{(1 - e^{-c \cdot t})}{(1 + i \cdot e^{-c \cdot t})} \quad (5-47)$$

Daraus ergibt sich eine Fehlerrate $\lambda(t)$ über die Zeit.

$$\lambda(t) = K \cdot \frac{c \cdot e^{-c \cdot t} \cdot (1 + i)}{(1 + i \cdot e^{-c \cdot t})^2} \quad (5-48)$$

Somit ist das *S – Shaped Modell* eine sehr interessante Darstellung, da es zeigt, dass die Fehlerdetektion von der Anzahl bereits gefundener Fehler abhängt. Je mehr Fehler gefunden werden, desto stärker steigt die *Fehlerdetektionsrate*. Dieses Verhalten wird von der S – Kurve wiedergegeben (Abbildung 5-7).

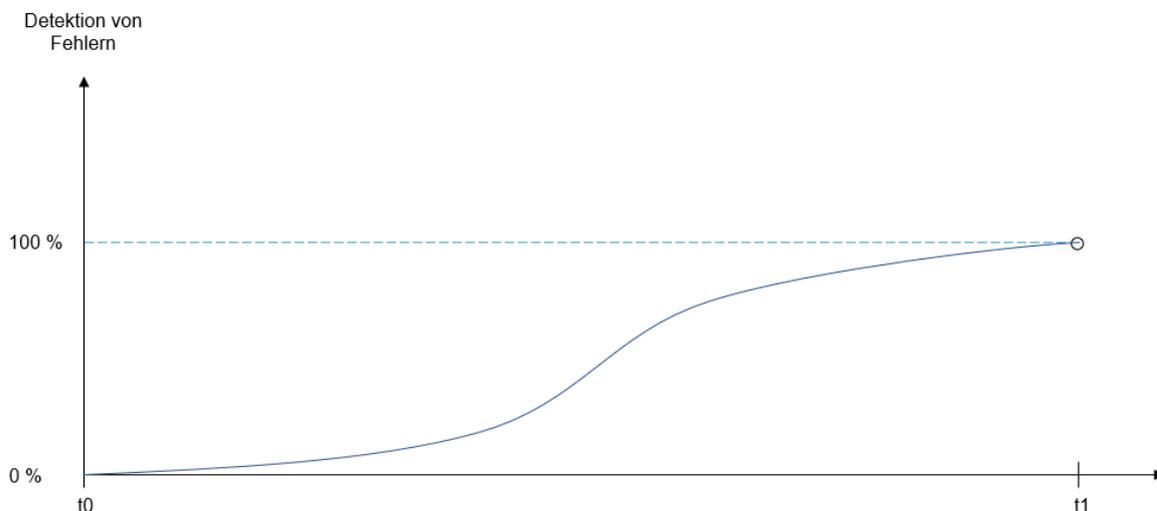


Abbildung 5-7: S - Shaped Modell

5.4 Lifetime Data Analysis (LDA)

Um Fehlerraten und Zuverlässigkeitskenngrößen voraussagen zu können, ist es notwendig, Systeme und Komponenten über ihren gesamten Lebenszyklus zu beobachten. Es wird eine *Ereigniszeitanalyse* (engl.: *Lifetime Data Analysis (LDA)*) durchgeführt. Hier soll keine Verwechslung mit der *Zuverlässigkeitswachstumsverfolgung* entstehen.

Bei der LDA handelt es sich um eine Vorgehensweise, die beschreibt, wie Fehlerverhalten von Bauteilen beobachtet und beschrieben werden können. Oft liegen keine Erfahrungswerte für Zuverlässigkeitskennwerte vor, diese müssen dann erst erhoben werden. Dabei werden historische Daten (Zeit/Distanz bis zum Fehler, Fehleranzahl...) gesammelt und statistisch ausgewertet. Am Ende sollen dabei möglichst genaue Vorhersagen über Ausfallverhalten, Zuverlässigkeit und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen von diversen Komponenten herauskommen. Als Beispiel für geschätzte Kennwerte kann der *MTBF* angeführt werden [20, S. 190f.].

Grundsätzlich wird die LDA über den gesamten Produktlebenszyklus durchgeführt. In den ersten Entwicklungsphasen können Tests (siehe Abschnitt 4.4) durchgeführt werden, um Fehler zu entdecken. In der Betriebsphase kann über geeignete Datensammelsysteme (zum Beispiel: *Failure Report Analysis and Corrective Action System (FRACAS)*) Information über Zeitpunkte und Fehler am System gespeichert und ausgewertet werden.



Abbildung 5-8: Zusammenhang LDA

Die Abbildung 5-8 zeigt den logischen Zusammenhang der Schritte bei der LDA. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden kurz erläutert [20, S. 191f.].

- **Datenset**

Das Datenset ist im Wesentlichen die Sammlung von historisch aufgezeichneten Fehlerdaten von Systemen. Diese können entweder gruppiert oder nichtgruppiert sein. Werden Daten mehrerer Individuen der gleichen Population betrachtet, spricht man von gruppierten Daten. Das können zum Beispiel eine Gruppe von Türen in einem Zug sein. Nichtgruppierte Daten nennt man Datensets, die als Grundlage nur ein Individuum einer Population beschreiben.

- **Datentyp**

Bei den Datentypen kann man kategorisch zwischen links – zensierten, rechts – zensierten, mehrfach – zensierten und kompletten Daten unterscheiden. Von Rechts – zensierten Daten spricht man, wenn nach dem betrachteten Zeitfenster kein Fehler aufgetreten ist. Bei Links – zensierten Daten gab es schon Ausfälle vor dem Start des Zeitfensters. Datensets können auch mehrfach – zensiert sein. Im Gegensatz dazu ergeben sich komplette Daten.

- **Goodness – Of – Fit – Test**

Wenn Verteilungsfunktionen von Fehlercharakteristiken nicht von vornherein klar sind, müssen diese geschätzt werden. Oft ist es so, dass Spezialisten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen vorhersagen können, wenn gewisse Fehlermuster schon bekannt sind. Anderenfalls sind sogenannte Goodness – Of – Fit – Tests notwendig, die diese Verteilungsfunktionen

inklusive deren Parameter schätzen. Es gibt mehrere Methoden dazu, die nur kurz angeführt werden. Es sei hier auf geeignete Statistiksoftware und weiterführende Literatur verwiesen.

- Plot – Methode
- Rank – Regressions – Methode
- Maximum – Likelihood – Methode

Mit diesen Methoden, die üblicherweise in spezieller Software zum Einsatz kommt, können aus Fehlerdatensets Verteilungsfunktion und deren Parameter bestimmt werden.

- **Verteilungsfunktion & Prognose der Kennwerte**

Aus den oben beschriebenen Goodness – Of – Fit – Tests können also Verteilungsfunktionen abgeleitet werden, mithilfe derer Komponentenausfallverhalten beschrieben werden. Daraus ergeben sich dann Zuverlässigkeitskenngrößen.

Die Lifetime Data Analysis ist notwendig, um nachhaltig, Zuverlässigkeitskenngrößen bestimmen zu können, die oft nur aus der Praxis und im Feld fahrenden Fahrzeugen geholt werden können. Theoriewerte sind oft keine aussagekräftigen Informationen, auf die man sich verlassen kann. Tatsächlich auftretende Fehler und Ausfälle können mithilfe der LDA systematisch zu wahrheitsgetreuer Kenngrößen verwertet werden. Dies ist notwendig, um sicherzustellen, dass die verkauften Systeme tatsächlich die angegebenen Werte einhalten.

5.5 Human Reliability Analysis (HRA)

Es gibt eine Vielzahl an qualitativen und quantitativen Methoden, die das menschliche Risiko hinsichtlich Zuverlässigkeit von Systemen messen und beeinflussen können. Im Wesentlichen geht es dabei darum, menschliche Fehler während der Entwicklungs – und Betriebsphase zu kontrollieren, die zu einem Unfall oder Ausfall des Systems führen könnten.

Der Aspekt ist grundsätzlich sehr wichtig, denn alle systematischen Fehler resultieren bekanntlich aus menschlichen Vorgängen. Wenn der Mensch „zuverlässig“ arbeitet, dann treten wesentlich weniger Schwachstellen auf. Die Schwierigkeit dabei zeigt sich in einer Einbettung der menschlichen Zuverlässigkeit in den technischen Entwicklungsprozess. Auch in der Betriebsphase ist es nicht leicht, die menschliche Komponente immer klar zu berücksichtigen. Speziell im Schienenfahrzeugbau gibt es jedoch klare Szenarien (Entgleisung oder Kollision), die durch menschliche Fehler ausgelöst werden können [20, S. 335].

Die menschliche Zuverlässigkeit kann umschrieben werden mit der *Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Fehlers* $P(HE)$.

$$P(HE) = \frac{\text{Anzahl der menschlichen Fehler}}{\text{Gesamtanzahl der menschlichen Fehlermöglichkeiten}} \quad (5-49)$$

Bei den *menschlichen Fehlern* gibt es mehrere Arten, die im Folgenden (Tabelle 5-2) kurz erklärt werden.

Fehlerart	Beschreibung	Beispiel
Auslassungsfehler	Fehler, die aufgrund eines Versehens oder einer Fehlwahrnehmung passieren	<i>Während einer Entgleisung: Der Fahrer vergisst wichtige Maßnahmen zu treffen. In der Wartung: Der Arbeiter vergisst wichtige Schritte einer Inspektionsstätigkeit durchzuführen.</i>
Aktionsfehler	Fehler, die passieren, wenn eine Aktion fehlerhaft oder falsch ausgeführt wird	<i>Während einer Entgleisung: Der Fahrer drückt einen falschen Knopf. In der Wartung: Die Reparatur wird falsch ausgeführt.</i>
Absichtlicher Fehler	Fehler, der absichtlich passiert.	<i>Im Zug: Der Fahrer fährt absichtlich über dem Geschwindigkeitslimit. In der Wartung: Beschädigung von anderen Teilen, um zur eigentlichen Problemstelle zu gelangen.</i>

Tabelle 5-2: Arten von menschlichen Fehlern [20, S. 337]

Dabei ist zu erwähnen, dass *absichtliche Fehler* nicht Teil der menschlichen Zuverlässigkeitsanalysen sind, dafür gibt es andere Verfahren. Die Abbildung 5-9 zeigt die Einflussfaktoren von menschlichen Fehlern.

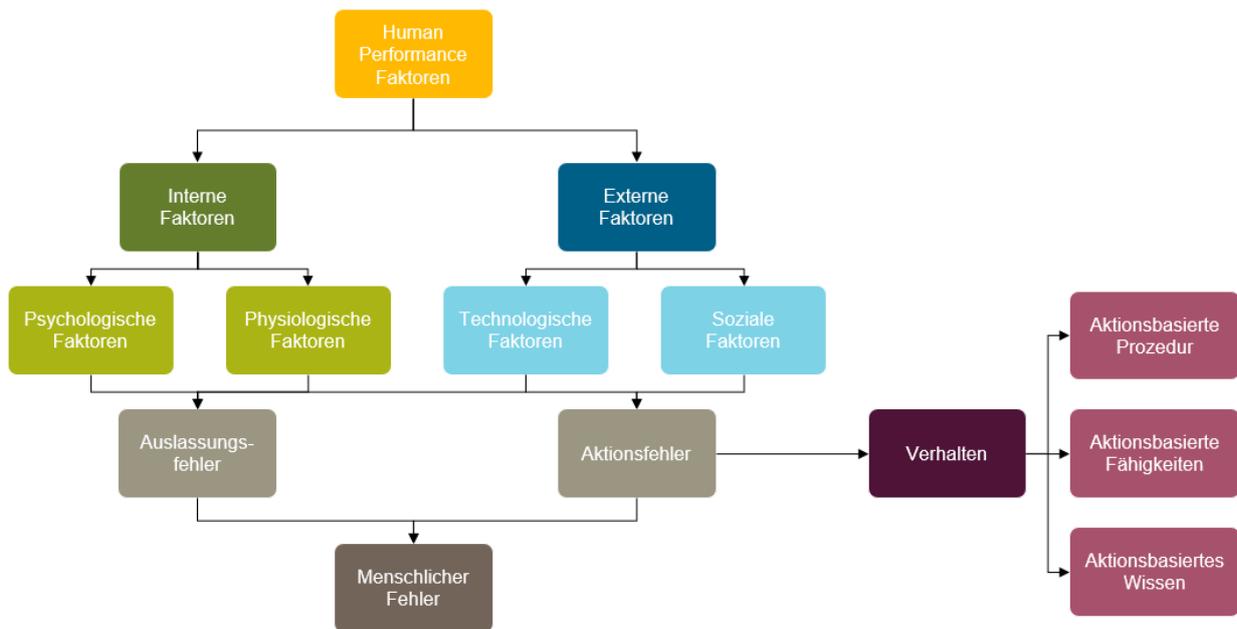


Abbildung 5-9: Einflussfaktoren menschlicher Fehler [20, S. 340]

Grundsätzlich gibt es *interne* und *externe* Faktoren gibt, welche sich auf die menschliche Leistung auswirken. Die internen Faktoren werden dann unterteilt in psychologische und physiologische Faktoren.

Psychologische Faktoren sind Einflüsse wie zum Beispiel Stress, Überarbeitung, Depression, Demotivation oder eine Konzentrationsschwäche. Physiologische Faktoren sind körperliche Beschwerden, wie Krankheiten oder Verletzungen.

Auf der anderen Seite gibt es die technologischen und sozialen Faktoren, die von außen (extern) auf die menschliche Leistung wirken. Technologische Faktoren sind Arbeitsbedingungen, Werkzeuge, Ergonomie oder Prozesse. Auf diese Faktoren hat der Arbeitgeber direkten Einfluss. Die sozialen Faktoren spiegeln das Arbeitsklima wieder. Aspekte wie soziale Kontakte, Akzeptanz im Team, Mobbing oder ähnliches.

Die genannten Faktoren können dann in einem menschlichen Fehler, also einem Auslassungsfehler oder einem Aktionsfehler resultieren. Speziell für die Aktionsfehler gibt es noch ein weiteres Konzept, welches hier genannt werden sollte. Das Verhalten eines Menschen teilt sich in drei Untergruppen auf. Wird gearbeitet, kommen Prozeduren, Fähigkeiten und Wissen zum Einsatz. Meistens ist es eine Kombination dieser drei; sie beeinflussen wesentlich die Aktion, die gerade ausgeführt wird. Menschen haben die Charakteristik, dass sie oft zum Beispiel Prozeduren gut folgen können, aber gewisse Fähigkeiten nicht besitzen. Jeder ist anders. Dies sollte hier jedenfalls berücksichtigt werden.

Um nun diese menschliche Zuverlässigkeit zu bewerten und zu kontrollieren, haben sich eine Vielzahl von Methoden entwickelt. Diese sollen nicht weiters erklärt oder beschrieben werden, denn das würde den Rahmen dieser Diplomarbeit sprengen. Deshalb werden die Methoden und Verfahren nur aufgezählt. Für den interessierten Leser sei auf die Literatur verwiesen [20, S. 343ff.].

- Technique For Human Error Rate Prediction (THERP)
- Operator Action Tree (OAT)
- Human Error Assessment Reduction Technique (HEART)
- Standardized Plant Analysis Risk Human Reliability (SPAR – H)
- Success Likelihood Index Methodology implemented through Multi – Attribute Utility Decomposition (SLIM – MAUD)
- Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach (SHERPA)
- Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)
- Bayesian Network

6 Analyse eines Projekts und Zuverlässigkeitswachstumsmodellierung

In diesem Kapitel wird anhand des bereits mehrfach erwähnten anonymisierten Projekts analysiert, wie sich Zuverlässigkeitskennwerte über den Zeitverlauf üblicherweise verändern und einstellen. Dies steht stellvertretend für das Verhalten vieler anderer Schienenfahrzeuge (Metros, Light Rails, Passenger Coaches). Die dafür verwendeten Daten stammen aus dem Feld und wurden dem Autor zur Verfügung gestellt. Es handelt sich dabei um etwa 14.000 Datensätze eines sich bereits im Einsatz befindenden Metroprojekts, die Störungsmeldungen zu bestimmten Zeitpunkten beschreiben.

Aus diesen Felddaten werden Zuverlässigkeitskennwerte über die Zeit, beziehungsweise über die Laufleistung ermittelt. Dies muss anhand geeigneter Schritte durchgeführt werden. Um einem wissenschaftlichen Anspruch gerecht zu werden, erfolgt die gesamte Datenauswertung nach in der Literatur angegebenen Standards. Eine solche allgemeine Vorgehensweise ist in Abbildung 6-1 angegeben. Das Hauptaugenmerk liegt in dieser Arbeit auf Schritt 2 und 3 (*pre-processing* und *analysis*). Die Daten liegen bereits gesammelt vor. Nach dem *data cleaning* kann dann *gefiltert*, *geclustered* und *analysiert* werden.

Es wird zum einen erklärt, wie die grundsätzliche Methodik beim Auswerten von solchen umfangreichen Datensätzen ist. Dies dient auch der Verständlichkeit des interessierten Lesers. Zum anderen werden dabei, stellvertretend für viele andere Projekte, mögliche Fehlerquellen in Komponenten und Ansätze herausgehoben, die später für ein angestrebtes Zuverlässigkeitswachstum relevant sind.

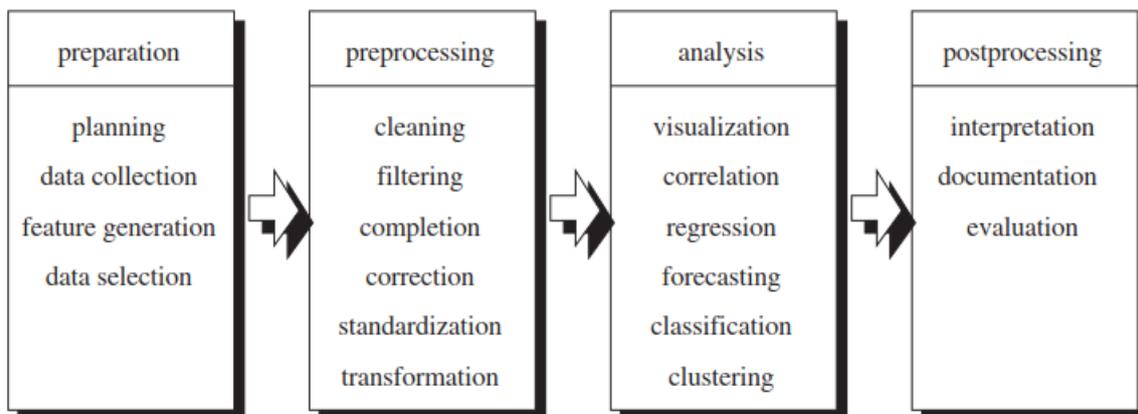


Abbildung 6-1: Vorgehensweise bei der Datenanalyse [35, S. 3]

Im Anschluss an den Analyseteil wird dann eines der beschriebenen Modelle für Zuverlässigkeitswachstum (siehe Abschnitt 5.1) ausgewählt und anhand dieses Modells ein Zuverlässigkeitswachstum modelliert und simuliert. Dafür sind verschiedene Projektannahmen zu treffen, die sich aus alten und aktuellen Projekten ergeben. Diese Annahmen wurden in der Beschreibung des **Use – Case** (Abschnitte 1.3 und 6.6) getroffen. Es wird verfolgt, wie ein konkretes Zuverlässigkeitsziel in der Entwicklungsphase erreicht werden kann und wie sich das Zuverlässigkeitswachstumsmodell in Wirklichkeit realisieren lassen könnte. Dies ist notwendig, um

im Kapitel 7 ein Konzept für ein Zuverlässigkeitswachstumsprogramm, passend zum aktuellen RAM/LCC – Prozess zu beschreiben.

6.1 Anforderung an die Auswertung der Felddaten

Es ist unumgänglich, für die Auswertung der umfangreichen Datensammlung (beispielhafter Screenshot in Abbildung 6-2) eindeutige Anforderungen zu stellen. Die hier genannten Darstellungen sollen mithilfe der Analyse dargestellt werden:

- 1) FIT (Failure in Time) & MDBF (Mean Distance Between Failure) aller Fehlerklassen und Fehlerarten
- 2) FIT & MDBF von betriebsrelevanten Fehlerklassen und Fehlerarten
- 3) FIT & MDBF von inhärenten, betriebsrelevanten Fehlern
- 4) Komponentenweiser Vergleich der Fehlerquellen

Lfd.Nr.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	100032_FNL	-	21.10.2013	21.10.2013	Tran 137001	Vehicle body total MD	0	4	nicht-bezugsfähig; Fehlerklasse: FB	0	2	bezugsfähig; Fehlerklasse: FB	unbekannt	During static commissioning driver's DC	door leak	DDC	-	delete	Siem	
2	100033_FNL	-	21.10.2013	21.10.2013	Tran 137001	Vehicle body total MD	0	4	nicht-bezugsfähig; Fehlerklasse: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerklasse: NB	unbekannt	During static commissioning driver's DC	door leak	DDC	-	delete	Siem	
3	100038_FNL	-	11.11.2013	11.11.2013	Tran 025004	Vehicle body total MC	0	2	bezugsfähig; Fehlerklasse: FB	0	2	bezugsfähig; Fehlerklasse: FB	unbekannt	cause of loose mechanical links not FX	lose Bolt	Siem	-	lose Bolt	Siem	
4	5000_FNL	-	14.10.2014	14.10.2014	-	D	0	1	ausgelaufen; Fehlerbehebung: FD	0	1	ausgelaufen; Fehlerbehebung: FD	unbekannt	according to e-mail from SW new seat	-	-	-	-	Siem	
5	100058_FNL	-	11.12.2013	11.12.2013	Tran 124510	Vehicle body total MD	0	2	bezugsfähig; Vorzeiger: AE EA	0	2	bezugsfähig; Vorzeiger: AE EA	unbekannt	no pressure (current) signal	BDU AC	DDC	-	delete	Siem	
6	100059_FNL	-	05.12.2013	05.12.2013	Tran 024502	Vehicle body total MB	0	2	bezugsfähig; Vorzeiger: AE EA	0	2	bezugsfähig; Vorzeiger: AE EA	unbekannt	current collector did not blow; current <	-	-	-	-	Siem	
7	100058_FNL	-	11.12.2013	11.12.2013	Tran 124510	Vehicle body total MD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	during routine check of door cor	DDC	-	delete	Siem		
8	100059_FNL	-	31.10.2013	31.10.2013	Tran 024502	Vehicle body total MD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: EA	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: EA	unbekannt	Connections of the CAN/BU; bogie id	-	-	-	-	Siem	
9	100060_FNL	-	02.01.2014	02.01.2014	Tran 025002	Vehicle body total MB	0	2	bezugsfähig; Vorzeiger: AE EA	0	2	bezugsfähig; Vorzeiger: AE EA	unbekannt	whisper protection valve	BDU AC	DDC	-	delete	Siem	
10	100061_FNL	-	08.01.2014	08.01.2014	Tran 025003	Vehicle body total MD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: PA	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: PA	unbekannt	It was not possible to comm. BDU AC	DDC	-	delete	Siem		
11	100062_FNL	-	08.01.2014	08.01.2014	Tran 025005	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: EA	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: EA	unbekannt	The BDU has been changed	BDU AC	DDC	-	delete	Siem	
12	100063_FNL	-	09.01.2014	09.01.2014	Tran 025006	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: HB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: HB	unbekannt	Auxiliary meter should be a auxiliary	-	-	-	-	Siem	
13	100064_FNL	-	11.11.2013	11.11.2013	Tran 124512	Vehicle body total MB	0	1	ausgelaufen; Vorzeiger: AE EA	0	1	ausgelaufen; Vorzeiger: AE EA	unbekannt	smoked current collector to current <	CVH	-	-	-	überheize	Siem
14	100065_FNL	-	11.11.2013	11.11.2013	Tran 124512	Vehicle body total MB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: BE	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: BE	unbekannt	seam on the edge is broken	visible	ERK	-	-	getrennt	Siem
15	100065_FNL	-	19.01.2014	19.01.2014	Tran 025002	Vehicle body total MD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: BE	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: BE	unbekannt	no possibility to upgrade	driver co	ERK	-	-	getrennt	Siem
16	100067_FNL	547	24.01.2014	24.01.2014	Tran 024002	Vehicle body total MD	0	4	nicht-bezugsfähig; Fehlerklasse: JF	0	4	nicht-bezugsfähig; Fehlerklasse: JF	unbekannt	wrong bogie was mounted	-	-	-	-	falsche	Siem
17	100067_FNL	547	24.01.2014	24.01.2014	Tran 024002	Vehicle body total MD	0	4	nicht-bezugsfähig; Fehlerklasse: JF	0	4	nicht-bezugsfähig; Fehlerklasse: JF	unbekannt	damaged card ID - SCIP de	SCIP	DDC	-	-	falsche	Siem
18	100068_FNL	2373	11.12.2013	11.12.2013	Tran 025006	Vehicle body total MC	0	4	nicht-bezugsfähig; Fehlerklasse: JF	0	4	nicht-bezugsfähig; Fehlerklasse: JF	unbekannt	wrong bogie was mounted	-	-	-	-	falsche	Siem
19	100068_FNL	2373	21.01.2014	21.01.2014	Tran 024002	Vehicle body total MD	0	4	nicht-bezugsfähig; Fehlerklasse: JF	0	4	nicht-bezugsfähig; Fehlerklasse: JF	unbekannt	wrong bogie was mounted	-	-	-	-	falsche	Siem
20	100069_FNL	712	21.12.2014	21.12.2014	Tran 244024	Vehicle body total MC	0	1	ausgelaufen; Fehlerbehebung: PA	0	1	ausgelaufen; Fehlerbehebung: PA	unbekannt	Overbrake system is unusable	BDU AC	CVH	-	-	überheize	Siem
21	100070_FNL	-	23.01.2014	23.01.2014	Tran 025006	Vehicle body total MD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: BE	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: BE	unbekannt	Wiper control doesn't give a wiper co	CVH	-	-	-	überheize	Siem
22	100071_FNL	-	04.02.2014	04.02.2014	Tran 025003	Vehicle body total MD	0	1	ausgelaufen; Fehlerbehebung: EA	0	1	ausgelaufen; Fehlerbehebung: EA	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
23	100072_FNL	-	08.01.2014	08.01.2014	Tran 025003	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: DA	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: DA	unbekannt	It was not possible to comm. BDU AC	DDC	-	delete	Siem		
24	100073_FNL	-	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
25	100074_FNL	-	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
26	100075_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
27	100076_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
28	100076_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
29	100077_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
30	100078_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
31	100079_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
32	100080_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
33	100081_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
34	100082_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
35	100083_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
36	100084_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
37	100085_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
38	100086_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
39	100087_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
40	100088_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
41	100089_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
42	100090_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
43	100091_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
44	100092_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
45	100093_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
46	100094_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
47	100095_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
48	100096_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
49	100097_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
50	100098_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
51	100099_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
52	100100_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
53	100101_FNL	729	04.02.2014	04.02.2014	Tran 124512	Vehicle body total TD	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	0	2	bezugsfähig; Fehlerbehebung: NB	unbekannt	During routine check of door	door cor	DDC	-	-	delete	Siem
54	100102_FNL	729	04.02.201																	

Spalte	Erklärung
Bauteil-Schaden	Nennung des schadhafte Bauteils
Bauteil-Zustand	Qualitative Beschreibung des Schadens
Beschreibung	Qualitative Beschreibung des Fehlers
Fahrzeugtyp	Typ des Wagens (MC, M, T1)
Fehlerklasse_Kunde (gemäß VDV 166-3:2014)	Zuordnung zu Störungsklasse A, B, C, D (siehe VDV 166-3:2014 [36]) A – Die Betriebsfähigkeit des Zuges ist nicht mehr gewährleistet . Der Zug oder die ausgefallenen Teile sind sofort außer Betrieb zu nehmen. B – Die Betriebsfähigkeit des Zuges ist nur noch eingeschränkt gewährleistet . Eine Weiterfahrt bis zu einem strategisch günstigen Punkt (z. B. Kehr- oder Abstellanlage) ist unter eingeschränkten Bedingungen (z. B. Begrenzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit oder der Einsatzzeit) möglich. C – Die Betriebsfähigkeit des Zuges ist nur gering beeinträchtigt . Eine Weiterfahrt ist zunächst ohne Einschränkungen bis zur Endhaltestelle oder bis zur nächsten Einrückstelle möglich, weil z. B. aufgrund redundanter Ausführung von Komponenten die geforderte Funktion teilweise weiter erfüllt wird. D – Die Betriebsfähigkeit des Zuges ist nicht beeinträchtigt . Eine Weiterfahrt ist ohne Einschränkungen möglich, weil z. B. aufgrund redundanter Ausführung der Komponenten die geforderte Funktion weiterhin voll erfüllt ist. Der Fehler ist der Werkstätte zu melden.
Funktionaler_Begriff	Eine Zuordnung der Baugruppe zu funktionalen Gruppen.
Fzg_Nr	Nummer des Fahrzeugs (Zug) 1-35
Massnahmen	Erklärung der Maßnahme zur Behebung des Schadens (Rollkuren, Justierungen...)
Produktgruppe – Bezeichnung	Zuordnung nach DIN EN 15380-2:2006 „Bahnanwendungen – Kennzeichnungssystematik für Schienenfahrzeuge – Teil 2: Produktgruppen“
Produktgruppe_Code	Zuordnung nach DIN EN 15380-2:2006 „Bahnanwendungen – Kennzeichnungssystematik für Schienenfahrzeuge – Teil 2: Produktgruppen“
Störungseintritt_Datum	Datum des Störungseintritts (Auslieferung der Fahrzeuge ab April 2013)
Störungseintritt_Uhrzeit	Uhrzeit des Störungseintritts
Wagen_Nr	Nummer des Wagens (6 Wägen pro Zug)

Tabelle 6-1: Erklärung der Spalten

Theoretische Randbedingungen werden in Tabelle 6-2 aufgelistet. Die Flotte besteht aus 35 Zügen, wobei ein Zug aus 6 Wägen besteht. Daraus ergeben sich also 210 Wägen in Summe. Die theoretische Gesamtleistung pro Jahr wird mit 200.000 km angegeben.

Größe	Zugeordneter Wert
Gesamt – Fahrzeuganzahl	35 Züge
Wagenanzahl	6 Wägen / Zug
Einsatzdauer pro Jahr	6.000 Stunden / Jahr
Durchschnittliche Laufleistung pro Jahr	200.000 km / Jahr

Tabelle 6-2: Theoretische Randbedingungen Felddaten

Da die theoretischen Laufleistungen nur bedingt zu plausiblen Auswertungen führen, wurden auch die tatsächlichen Kilometerstände, sowie die Startdaten der beginnenden Gewährleistungsphasen zu den bestimmten Zeitpunkten beziehungsweise Fahrzeugen zur Verfügung gestellt. Somit ist sichergestellt, dass die Ergebnisse auch tatsächlich den Gegebenheiten entsprechen. Nach Auswertung der Laufleistung pro Zug ergeben sich folgende Verläufe.

Abbildung 6-3 zeigt den Einsatz der Züge (graue Balken) über die Zeit. Ab Juli 2014 ist also fast die ganze Flotte von 35 Zügen im Einsatz. Die rote Linie zeigt den Anstieg der Laufleistung der gesamten Flotte. Interessant dabei ist auf jeden Fall, dass durch eine geschickte Organisation der Fahrpläne und Einsatz der Züge sichergestellt ist, dass die Flottenkilometer konstant ansteigen. Vor dem Juli 2014 handelt es sich nicht um den vollen Betrieb der Flotte,

sondern eher mehr um ein Einfahren und Inbetriebsetzen der ersten Garnituren. Die Gewährleistung beginnt für jeden Zug mit dem Inbetriebgehen.

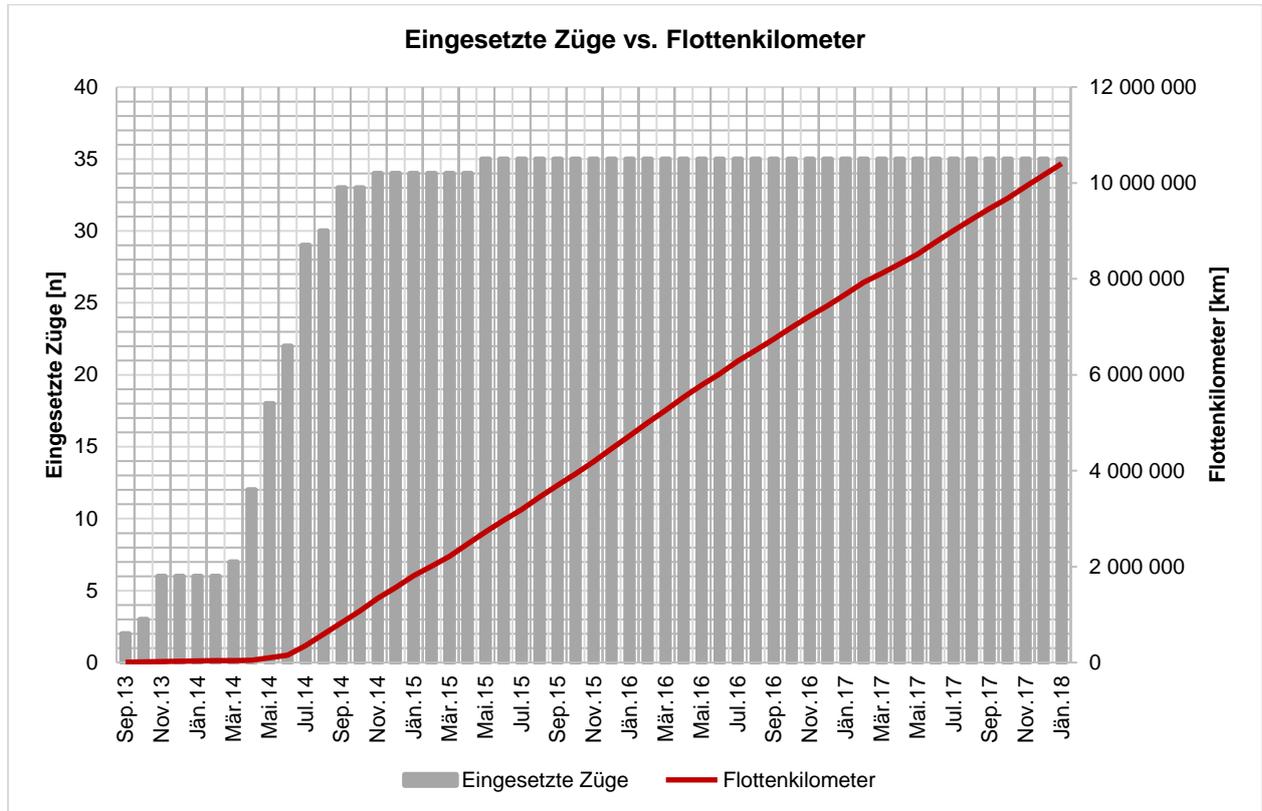


Abbildung 6-3: Eingesetzte Züge vs. Flottenkilometer

Abbildung 6-4 verdeutlicht den Hintergrund einer konstanten Steigung der Flottenkilometer. Die violette Linie zeigt die monatliche Laufleistung aller Züge. Hier wird ersichtlich, dass die Laufleistung ab Juli 2014 im Mittel etwa 240 000 km pro Monat ist. Sie schwankt jedoch zwischen 275 000 km und 190 000 km. Trotzdem ergibt sich ein gewollter, konstanter Anstieg der Gesamtflottenlaufleistung.

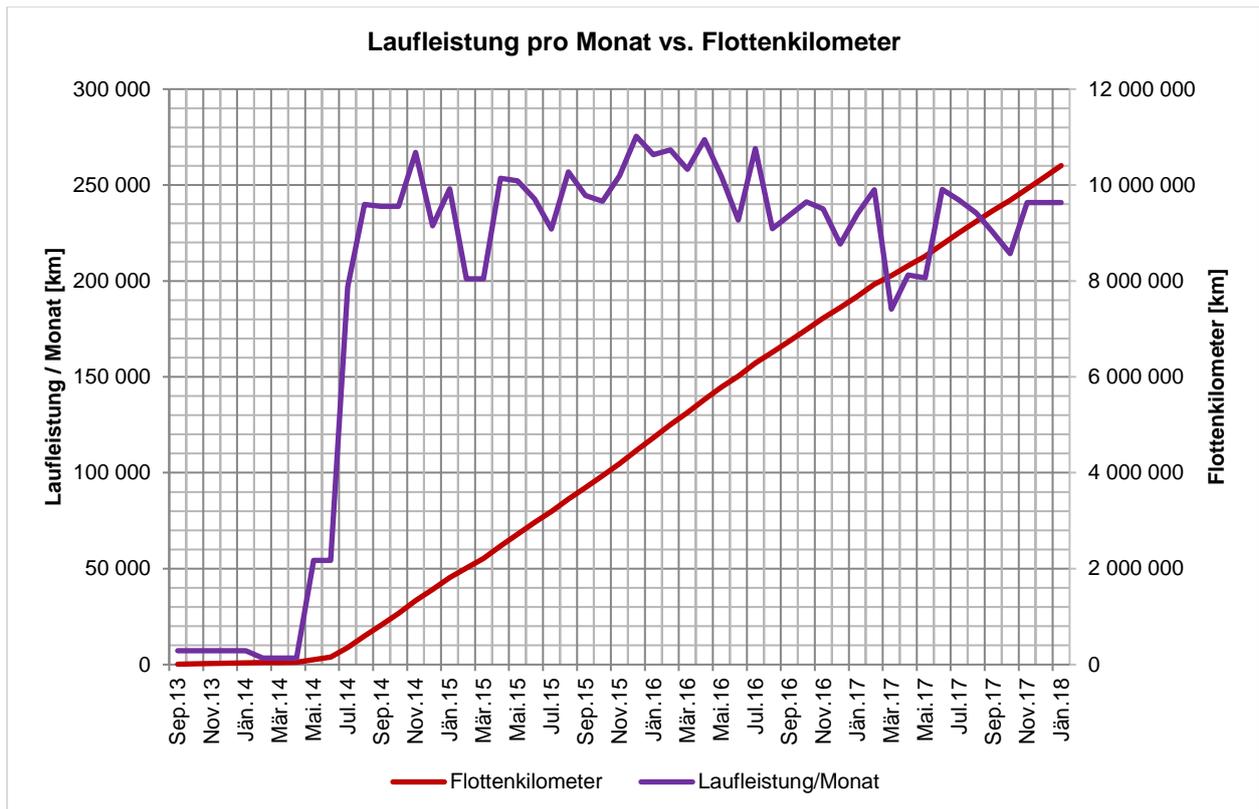


Abbildung 6-4: Laufleistung pro Monat vs. Flottenkilometer

6.3 Data Cleaning der Felddaten

Um Analysen mit den Felddaten durchführen zu können, ist es essentiell, diese zuerst zu bereinigen. Dabei werden irrtümliche Doppelaufzeichnungen oder inkonsistente Daten entfernt, die Fehlschlüsse in weiterer Folge provozieren könnten. Es werden zum Beispiel Informationen oder Attribute entfernt, die irrelevant für weitere Betrachtungen sind. Es hat keinen weiteren Nutzen, wenn man die Datensätze unnötig groß lässt. Das Ziel hierbei ist also ein „Kürzen“ der Daten auf wirklich notwendige Inhalte und das richtige Format. Nur so kann sichergestellt werden, dass eine gute Basis für die weiteren Schritte geschaffen wurde.

Die konkrete Vorgehensweise gliedert sich in folgende Punkte:

1) Erstellen einer Sicherungskopie der Datensätze

Eine Kopie ist notwendig, um gewährleisten zu können, dass zum einen die Ausgangsbasis der Analyse erhalten bleibt und zum anderen keine Daten verloren gehen können.

2) Entfernen von Spalten, die irrelevante Attribute der Datensätze enthalten

Informationen, die nicht relevant für die Analyse sind, werden gelöscht.

3) Entfernen von Tupel, die nicht zugeordnet werden können

Datensätze, die unvollständig oder teilweise fragwürdig sind, werden nicht in die Analysen mitgenommen und werden deshalb entfernt. Der Anteil der entfernten Datensätze ist verschwindend gering und fällt deshalb nicht ins Gewicht.

4) Standardisieren & Formatieren der Inhalte der unterschiedlichen Attribute

Bei manuellen Einträgen kommt es zu Unregelmäßigkeiten hinsichtlich der Formatierung von den Informationen. Diese werden auf eine standardisierte Schreibweise gebracht, um sie vergleichen zu können.

5) Sortieren der Datensätze nach Datum

Da die Auswertungen nach ansteigender Zeit ausgegeben werden sollen, bietet es sich an, die Datensätze auch schon vorab nach Datum zu sortieren. Zusätzlich wurden den Datensätzen die aktuellen Kilometerstände zugeordnet.

6) Entfernen von Datensätzen, die sich auf Betreiberfehler reduzieren lassen

Dies kann durchgeführt werden, da ein Attribut existiert, die eine Kennzeichnung auf Betreiberfehler enthält. Diese sind nicht relevant, da sie nicht auf den Hersteller zurückzuführen sind.

7) Einfügen eines Primärschlüssels

Ein Primärschlüssel wurde jedem Datensatz zugeordnet. Dies gewährleistet eine eindeutige Beschreibung des Datensatzes (siehe Abbildung 6-5).

A	B	G	
Key	Störungseintritt_Datum	Fzg_Nr	Feh_e
F7166	13.01.2016	Train 02	C
F2	13.08.2013	Train 11	D
F3	09.09.2013	Train 11	D
F4	09.09.2013	Train 13	D

Abbildung 6-5: Primärschlüssel

6.4 Ausleitung der Fehlerkurven

In den folgenden Abschnitten wird dargelegt, wie sich die einzelnen Analyseergebnisse berechnen und ergeben.

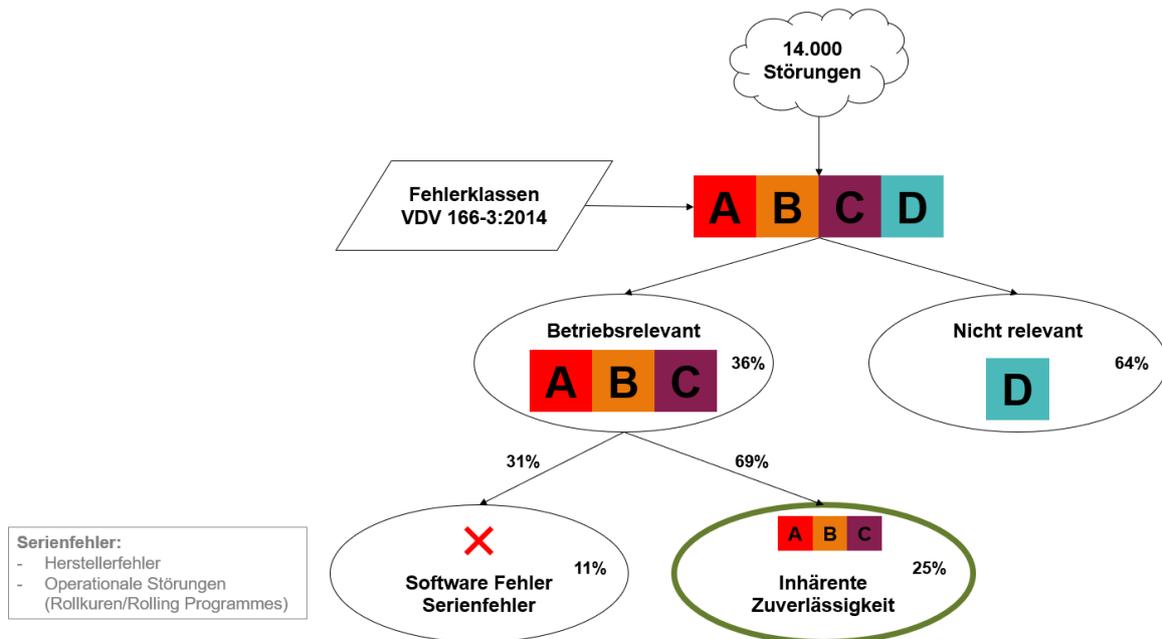


Abbildung 6-6: Vorgehensweise Sortieren der Fehler

Die grundlegende Vorgehensweise, wie die Fehler und Störungen sortiert und gefiltert wurden, ist in der Abbildung 6-6 dargestellt. Zuerst wurden die Datensätze in die 4 Fehlerklassen (A – D) eingeteilt. Dies wird anhand der VDV 166-3:2014 durchgeführt. Anschließend werden nur die betriebsrelevanten Fehlerklassen A – C betrachtet, von denen wiederum nur diejenigen ausgewählt werden, welche die Grundlage für die „inhärente“ Zuverlässigkeit darstellen. Softwarefehler und Serienfehler werden also ausgeblendet.

Folgende generelle Annahmen werden bei der Analyse getroffen:

Größe	Annahme
Betriebsstunden pro Tag	16 h / Tag
Relevante Zeitdauer	Juli 2014 bis Juli 2017 (36 Monate)
Theoretische Laufleistung pro Monat	200 000 km

Tabelle 6-3: Annahmen für die Analyse

6.4.1 Auswertung Zuverlässigkeit aller Fehlerklassen (ABCD)

Zu allererst wird ermittelt, wie die Verteilung der Fehlerklassen über alle gesammelten Feld-daten ist (Abbildung 6-7). Dabei zeigt sich, dass 64 % nicht betriebsrelevante Störungen sind (D – Fehler). Der Rest gliedert sich in jeweils 1 % A – und B – Fehler. Rund 34 % nehmen die C – Fehler ein. A, B und C – Fehler zählen zu den betriebsrelevanten Fehlerklassen.

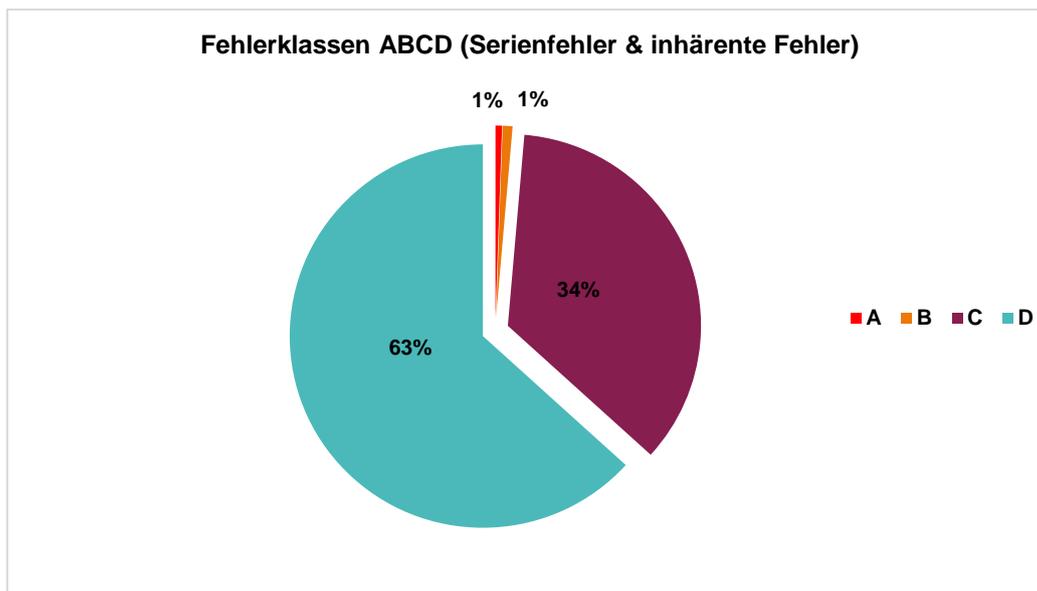


Abbildung 6-7: Fehlerklassen ABCD

Um aus den Störungsdaten nun Zuverlässigkeitskurven zu erhalten, wird folgend vorgegan-gen. Betrachtet werden hier in einem ersten Schritt alle Fehler, also Fehlerklassen A – D. Grundsätzlich werden FIT (Failure In Time) und MDBF (Mean Distance Between Failure), be-zogen auf die Einsatzmonate, ermittelt. Gleichung (6-1) zeigt die grundlegende Formel für die Berechnung des MDBF Wertes und Gleichung (6-2) zeigt die Berechnung des FIT Wertes. Dabei werden, wie in Tabelle 6-3 beschrieben, 16 Betriebsstunden pro Tag angenommen.

$$MDBF [km] = \frac{\frac{\text{Laufleistung}}{\text{Monat}} [km]}{\text{Anzahl Fehler pro Monat (ABCD)}} \quad (6-1)$$

$$FIT \left[\frac{10^{-9}}{h} \right] = \frac{\text{Anzahl der Fehler pro Monat}}{\text{Anzahl der Tage des Monats} \cdot \text{Betriebsstunden pro Tag [h]}} \cdot 1E9 \quad (6-2)$$

Aus diesen Berechnungen ergeben sich folgende Verläufe. Abbildung 6-8 zeigt den *MDBF* (grün) und *FIT* (blau) Verlauf über die gesamten Monate hinweg. Die dünnen Linien zeigen dabei einen „moving average“ Verlauf. Dieser bildet einen arithmetischen Mittelwert aus den 4 vorangehenden Werten und stellt somit einen etwas anschaulicheren Verlauf dar.

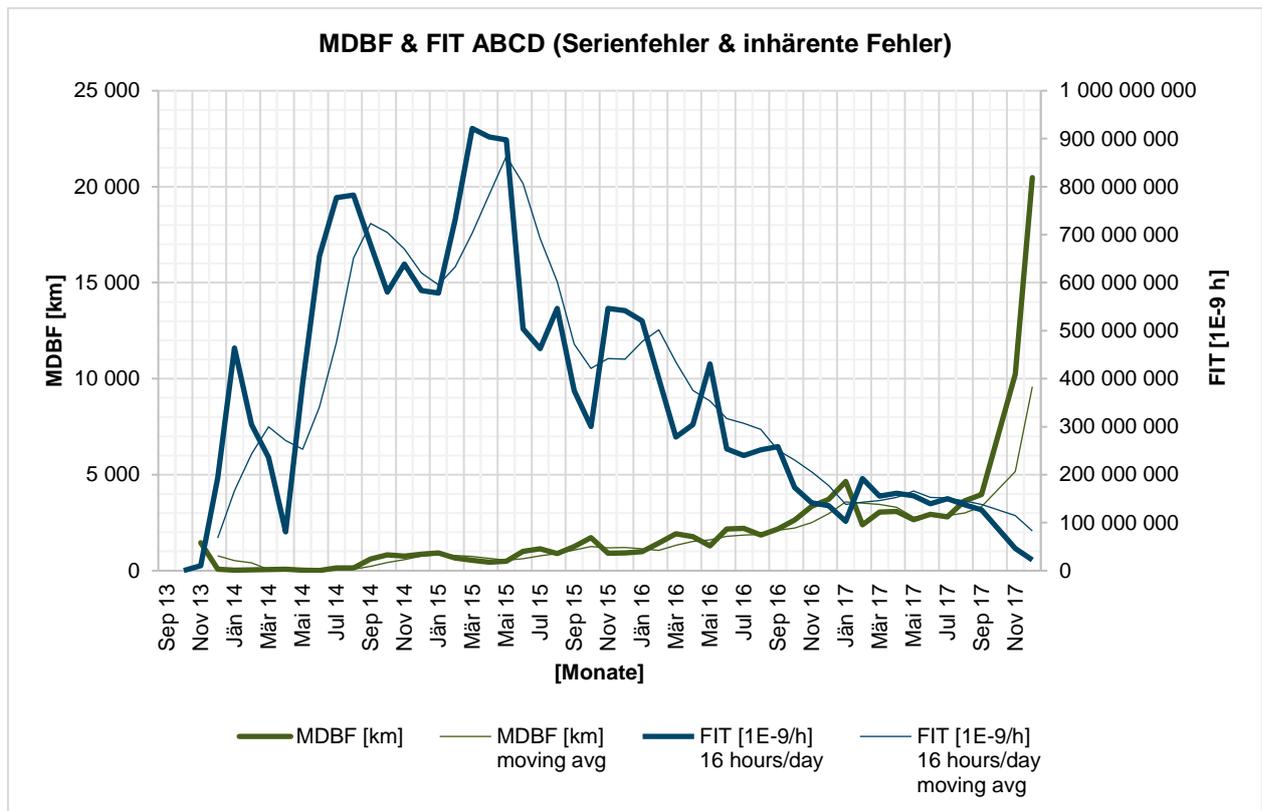


Abbildung 6-8: FIT & MDBF (ABCD)

Es sei zu erwähnen, dass eine Betrachtung der Kurven erst ab etwa Juli 2014 sinnvoll ist, denn in dem Zeitraum davor wurden noch nicht alle Züge eingesetzt und befanden sich noch in einer Art Inbetriebsetzungsphase. Ab Juli 2014 erkennt man jedoch sehr eindeutig, dass der FIT – Verlauf sinkt und die MDBF – Werte stetig ansteigen. Dies entspricht einem Zuverlässigkeitswachstum. Die FIT – Werte springen ein wenig, doch der Trend ist fallend. Auch die MDBF – Werte zeigen ein lineares Wachstum bis September 2017. Danach zeigt sich ein sehr stark in die Höhe schnellendes Wachstum. Dies kann entweder daraus resultieren, dass die ersten Züge bereits aus der Gewährleistung sind, oder keine Fehlermeldungen mehr in die Datenbanken eingetragen wurden. Es macht also keinen Sinn, dieses Verhalten in die Analyse zu inkludieren.

Da diese Kurven jedoch auch nicht – betriebsrelevante Fehlerklassen beinhalten, muss hier noch eine Trennung geschehen.

6.4.2 Auswertung Zuverlässigkeit betriebsrelevanter Fehlerklassen (ABC)

Nach VDV 166-3:2014 [36] sind die Fehlerklassen A, B und C betriebsrelevant. Das bedeutet, dass bei Auftreten einer dieser Fehler, der Zug gewartet oder repariert werden muss und somit direkt in die Zuverlässigkeit des Systems hineinspielt. D – Fehler sind Störungen, die repariert werden müssen. Dies ist nicht zwingend im Betrieb notwendig, sondern kann auch erst bei einer geplanten Wartungstätigkeit durchgeführt werden.

In Abbildung 6-9 wird ersichtlich, dass das Verhältnis zwischen A – B – und C – Fehlern so ist, dass den Großteil C – Fehler einnehmen und nur jeweils 2 % Prozent einen Komplett – beziehungsweise Teilausfall des Systems bedeuten. Diese Kategorisierung geht aus der Norm VDV 166-3:2014 hervor.

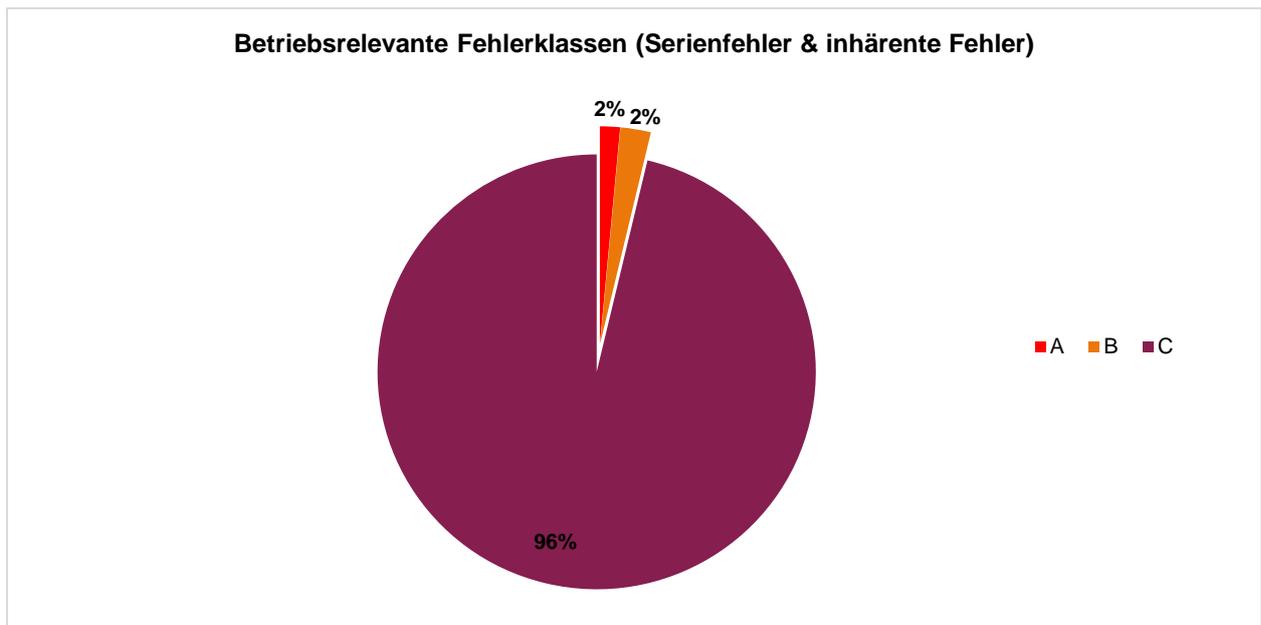


Abbildung 6-9: Verteilung betriebsrelevante Fehlerklassen

In Abbildung 6-10 und Abbildung 6-11 sind der *FIT* – Wert (blau) und der *MDBF* – Wert (grün) wieder über die Laufzeit (monatlich) aufgetragen. Im Gegensatz zu Abbildung 6-8 wird hier erst ab Juli 2014, also ab dem Zeitpunkt, zu dem alle Züge ausgeliefert und in Betrieb sind, betrachtet. Dabei wird die Laufzeit auf das Betrachtungsfenster Juli 2014 bis Juli 2017 begrenzt. Zusätzlich sind nur die betriebsrelevanten Fehler A, B und C – Fehler berücksichtigt. Man erkennt auch hier, dass ein klares Zuverlässigkeitswachstum auftritt. Der *FIT* – Wert sinkt und der *MDBF* – Wert steigt.

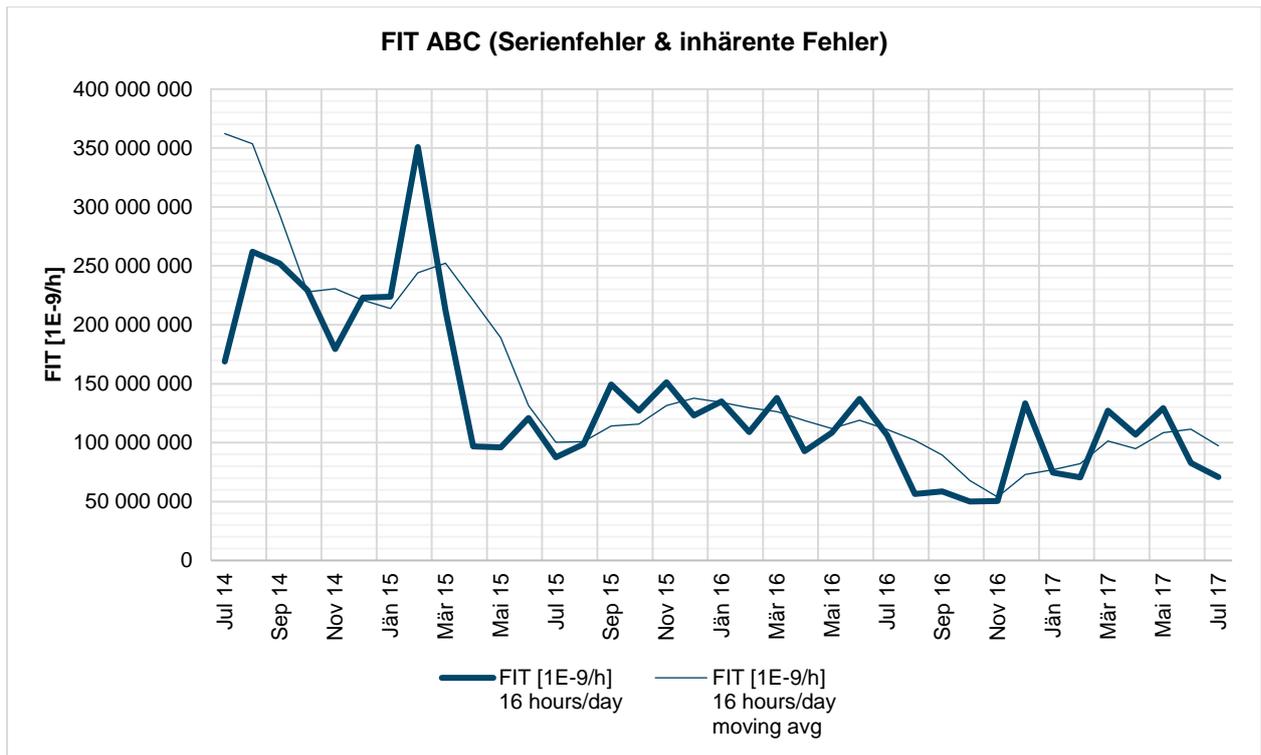


Abbildung 6-10: FIT (ABC)

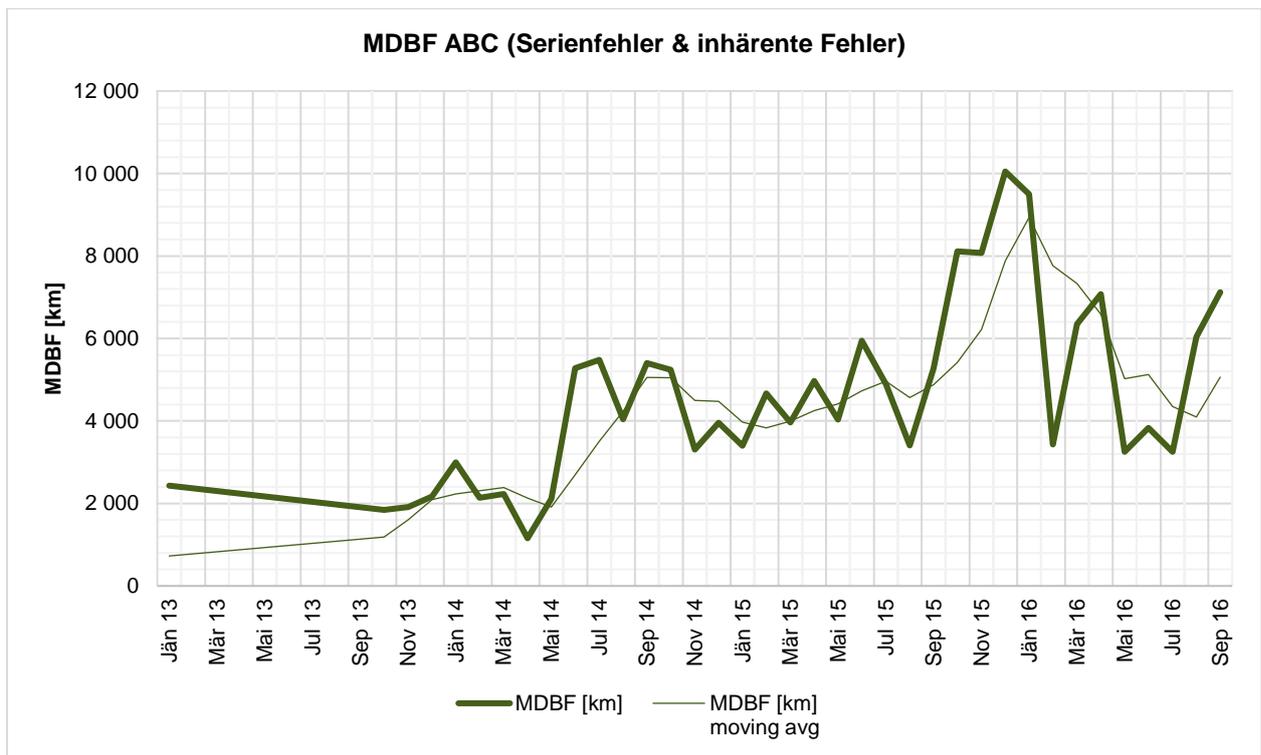


Abbildung 6-11: MDBF (ABC)

A – Fehler, sind Fehler, bei dem die Betriebsfähigkeit des Zuges nicht mehr gewährleistet ist, dieser muss also sofort abgeschleppt werden. Bei B – Fehlern ist die Betriebsfähigkeit nur noch eingeschränkt gewährleistet, eine Weiterfahrt ist in diesem Fall auch nicht mehr möglich.

Auch bei C – Fehlern ist die Betriebsfähigkeit beeinträchtigt. Hier muss auch sofort gehandelt werden, bedeutet, dass der Zug von der Strecke genommen werden muss.

6.4.3 Trennung der seriellen von den inhärenten Fehlern

Nach der Trennung der zuverlässigkeitsrelevanten Fehlerklassen (ABC) von den nicht – betriebsrelevanten Fehlern muss ein weiterer Schritt durchgeführt werden.

Es ist wichtig, **serielle** und **inhärente** Fehler voneinander zu trennen. In dieser Diplomarbeit wird grundsätzlich nur die **inhärente Zuverlässigkeit** betrachtet. Dies ist die Zuverlässigkeit, die das System von sich aus besitzt, ohne von organisatorischen oder betriebsbedingten Gegebenheiten beeinflusst zu werden. Sie stellt also die „technische“ Zuverlässigkeit des Produkts dar und ist direkt auf den Hersteller zurückzuführen. Diese wird hier näher beleuchtet.

Serielle Fehler weisen die ganze Flotte auf und werden durch geeignete Maßnahmen, wie etwa Rollkuren behandelt. Serielle Fehler können Herstellerfehler sein, also Fehler, die vom Lieferanten kommen. Sie sind per definition systematische Fehler, da erst eine durchgeführte Rollkur diese Fehler behebt. Zusätzlich werden in diesem Schritt auch **Softwarefehler** (sind auch systematische Fehler) ausgeklammert, denn diese sind auch nicht Bestandteil der Analysen des RAM/LCC – Teams und folglich auch nicht relevant für diese Diplomarbeit.

Abbildung 6-12 zeigt die Verteilung der Fehler und Fehlerklassen nach Trennung der inhärenten Fehler von den Serienfehlern, beziehungsweise Softwarefehlern. Das Verhältnis der beiden ist etwa 30:70. Wie erläutert, werden weiters nur die inhärenten Fehler, aufgeteilt auf die Fehlerklassen A, B und C behandelt.

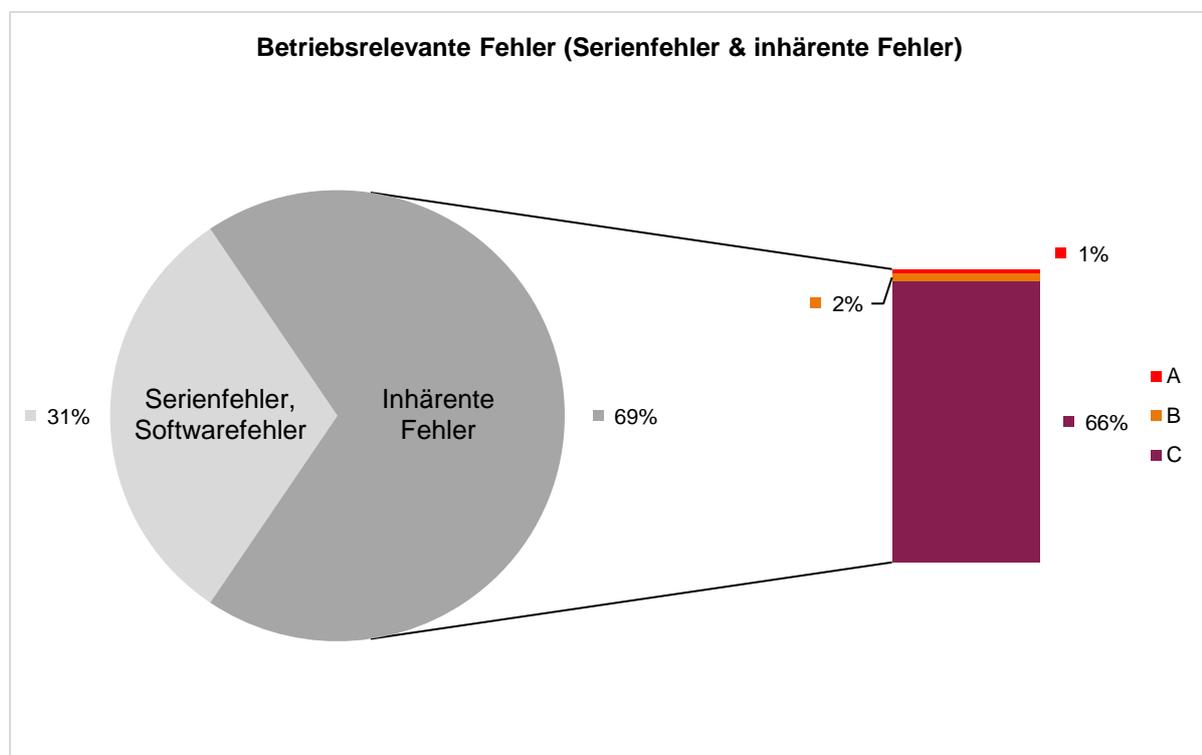


Abbildung 6-12: Trennung inhärente und serielle Fehler

Abbildung 6-13 und Abbildung 6-14 zeigen die Verläufe für FIT und MDBF – Werte von den inhärenten Fehlern und den Fehlerklassen A, B und C.

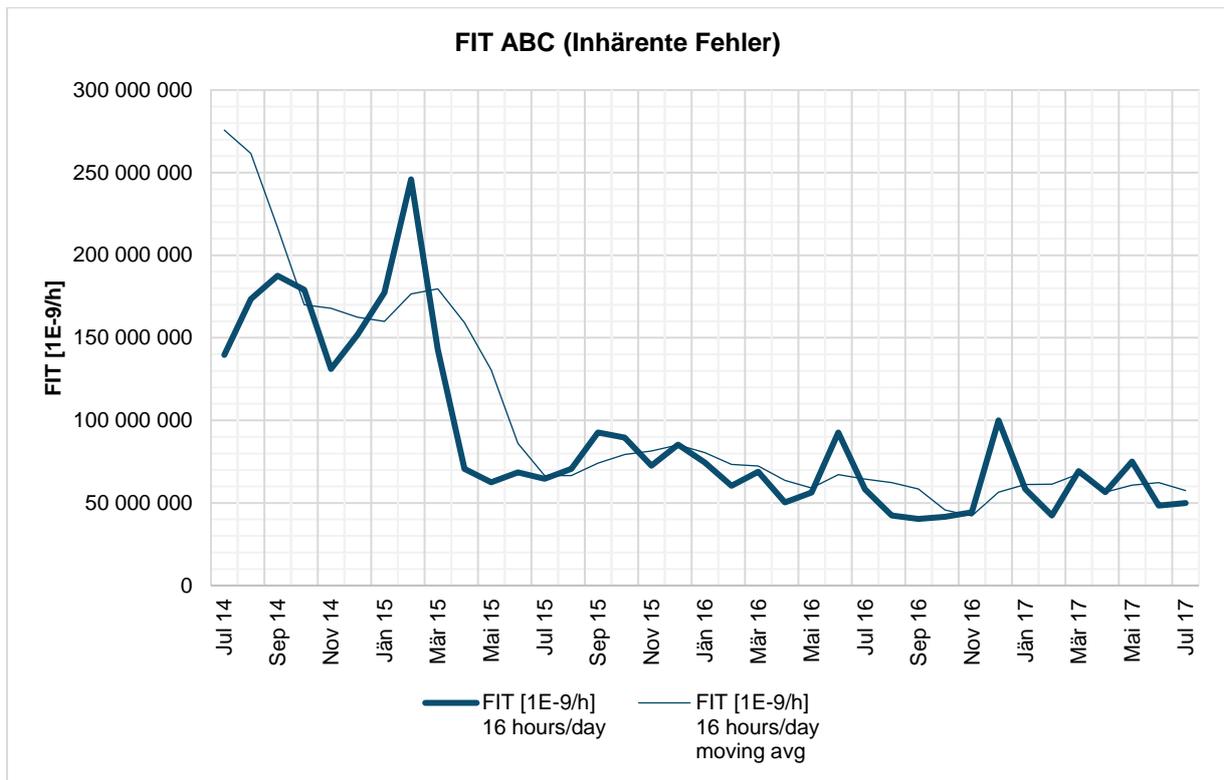


Abbildung 6-13: FIT (Inhärente Fehler, ABC)

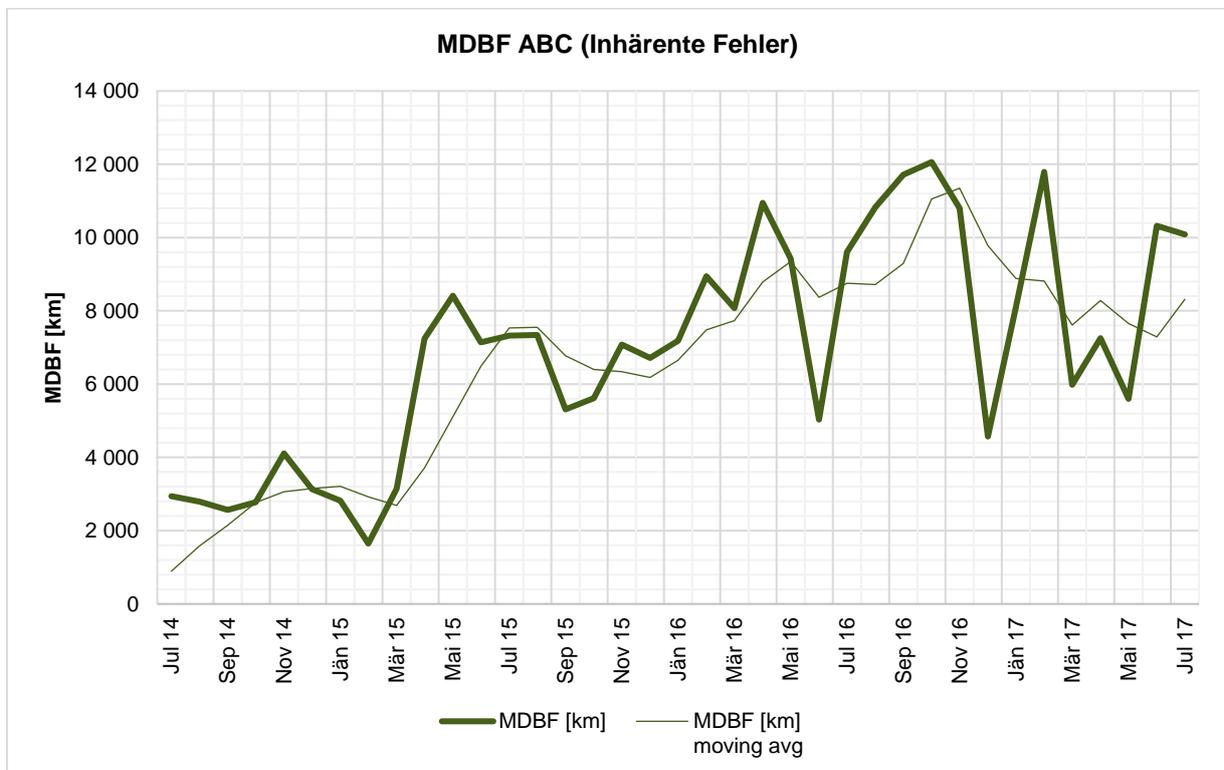


Abbildung 6-14: MDBF (Inhärente Fehler, ABC)

Interessant ist hierbei, dass auch die inhärenten Fehler ein Wachstum der Zuverlässigkeit widerspiegeln. Grundsätzlich würde man bei der inhärenten Zuverlässigkeit auf zufällige Fehler schließen und man würde meinen, eine konstante Fehlerrate müsse sich einstellen. Da dies aber nicht der Fall ist, muss das im Umkehrschluss bedeuten, dass den inhärenten Fehlern auch Fehler innewohnen, die systematisch sind; also Fehler, die durch geeignete Maßnahmen entdeckt und vermieden werden können. So kann (inhärentes) Zuverlässigkeitswachstum durch geeignete Maßnahmen erreicht werden.

6.5 Analyse der Baugruppen

Wichtig bei Zuverlässigkeitsbetrachtungen ist definitiv auch eine fundierte Aussage, welche Baugruppen in einem System ausschlaggebend für viele Ausfälle, beziehungsweise Störungen sind. Dazu wurden die bereits genannten „Funktionalen Begriffe“ in Baugruppen in den Zügen geclustert. Somit kann ermittelt werden, an welchen Baugruppen am besten Zuverlässigkeit verbessert werden kann.

Mithilfe einer „ABC – Analyse“ und Darstellung in einem Paretdiagramm (siehe Abbildung 6-15) kann gezeigt werden, welche Komponenten hier am meisten von Ausfällen betroffen sind.

Für die Darstellung werden sämtliche Fehler Baugruppen zugeordnet. Danach wird ermittelt, wieviel Ausfälle von welchen Baugruppen stammen. Anschließend werden die Baugruppen nach Anzahl der Ausfälle sortiert und in drei Klassen eingeteilt. Diese Klassen geben die Auswirkung auf die Zuverlässigkeit wieder. Sie sind eingeteilt in „Sehr stark“, „Stark“ und „Schwach“. Die Abbildung 6-15 zeigt die drei Balken nach Klassen und die betreffenden Komponenten. Die schwarze Linie zeigt an, dass 3 Baugruppen eine „sehr starke“ Auswirkung, auf die Zuverlässigkeit haben. Sie bewirken nämlich 60 % der gesamten Ausfälle. 30 % der Ausfälle werden dann von den Komponenten verursacht, die eine „starke“ Auswirkung zeigen und den Rest von 10 % nehmen dann die restlichen Baugruppen ein. Hier macht es also wenig Sinn, nach Fehlern zu suchen und diese zu verbessern, denn hierbei kann wenig Zuverlässigkeitswachstum erzielt werden.

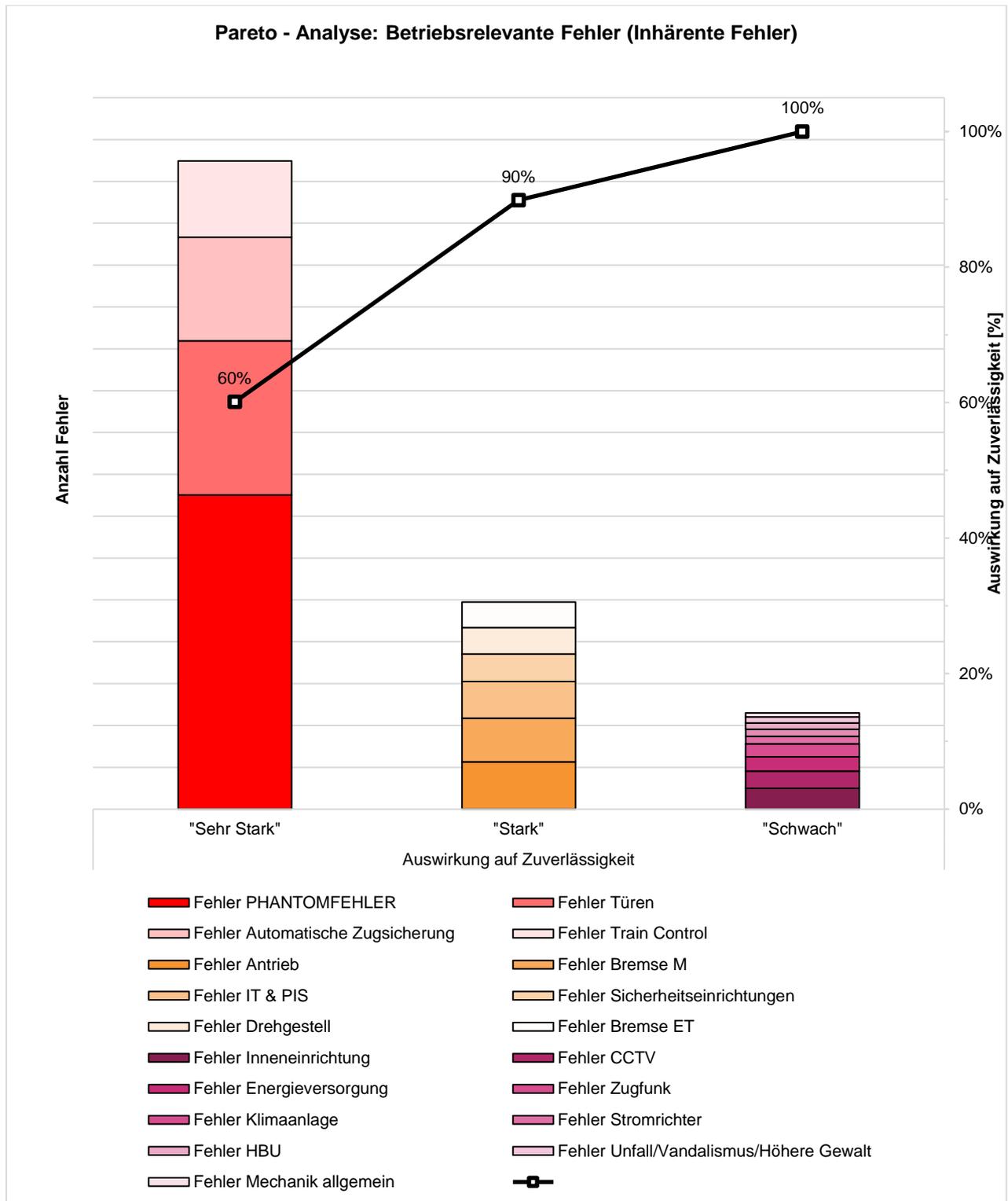


Abbildung 6-15: Paretodiagramm Auswirkung auf Zuverlässigkeit

Aus dieser Analyse geht also ganz klar hervor, dass die Problemstellen bei den *Türen*, der *Automatischen Zugsicherung* und der *Train Control* liegen. Bei diesen mechatronischen Systemen treten also viele Fehler auf, die den Zug „unzuverlässig“ machen. Auffallend ist zudem, dass der Großteil aller Fehler als sogenannte „Phantomfehler“ gelten. Das sind Fehler, die in Wirklichkeit gar nicht aufgetreten sind, sondern durch einen anderen Fehler oder eine Ursache

getriggert werden. Sie treten sporadisch bei softwarebehafteten, mechatronischen Systemen auf und verschwinden augenblicklich nach einem Neustart oder Reset des Systems.

Weniger relevant sind etwa *Fehler Mechanik allgemein*, also Fehler am Wagenkasten oder zum Beispiel an *Stromrichtern* oder der *Klimaanlage*.

6.6 Annahmen für den Use – Case

Bevor in den folgenden Abschnitten zwei ausgewählte Zuverlässigkeitswachstumsprogramme modelliert und für einen konkreten Fall durchkalkuliert werden, müssen zuvor noch ein paar Annahmen getroffen werden, damit ein Vergleich zwischen den Modellen stattfinden kann. Zusätzlich müssen Parameter definiert werden, die in die Modelle eingesetzt werden (siehe Tabelle 6-4). Es werden möglichst reale Annahmen getroffen, um klare Aussagen zu erhalten.

Grundsätzlich sind zwei Eingangsgrößen notwendig. Zum einen ist das eine geschätzte Zuverlässigkeit zu Beginn des Entwicklungsprozesses $MDBF_0(T)$, welches mit 900 km angenommen wird. Auf der anderen Seite ist ein gewünschtes Zuverlässigkeitsziel $MDBF_G(T)$ mit 8 000 km gefordert. T ist die Gesamtbetriebsdauer. Man geht immer davon aus, dass sich die Zuverlässigkeit auf diese Dauer bezieht. Die Umrechnung von $MDBF$ auf FIT und $MTBF$ Werten folgt anhand der hier angegebenen Gleichungen (6-3) und (6-4).

$$FIT \left[\frac{10^{-9}}{h} \right] = \frac{\text{Laufleistung pro Monat [km]}}{MDBF [km] \cdot \text{Tage pro Monat} \cdot \text{Tägliche Betriebsdauer [h]}} \cdot 1E9 \quad (6-3)$$

$$MTBF [h] = \frac{10^9}{FIT \left[\frac{10^{-9}}{h} \right]} \quad (6-4)$$

Die Laufleistung pro Monat L wird mit 200 000 km angenommen, die tägliche Einschaltdauer t_{active} mit 16 h pro Tag.

Die Entwurfsverbesserungszeit t_D wird hier mit 36 Monaten angenommen. Dies ist die Zeitspanne, die zur Verfügung steht, um ein gewisses Zuverlässigkeitsziel zu erreichen. Sie kann während des Entwicklungsprozesses beginnen und später in Testphase und Inbetriebsetzungsphase enden. Die 36 Monate werden auch deshalb gewählt, weil aus der Analyse der Felddaten 3 Jahre als ein optimales Betrachtungsfenster hervorging.

Als Gesamtbetriebsdauer T werden ebenso 36 Monate angenommen. Dies wird deshalb so gewählt, weil sich die Zuverlässigkeitsprognose genau mit Beginn des Betriebseinsatzes einstellen soll, das heißt, der Kunde soll zum Zeitpunkt der Übernahme des Zuges bereits die geplante Zuverlässigkeit messen können (Ende der Entwurfsverbesserungszeit t_D).

Die Gesamtanzahl der verwirklichten Verbesserungen D wird hier als nicht relevant erachtet (n.r.). Sie ist mathematisch zwar abhängig von α_D und vice versa und fällt deshalb nicht in die Berechnung mit ein (siehe Gleichungen (5-5) und (5-6)). Es ist leichter und plausibler, die Wachstumsrate α_D zu schätzen. Dies geschieht für beide ausgewählten Modelle separat.

Annahmen für Use Case					
Zuverlässigkeit zum Startzeitpunkt			Zuverlässigkeitsziel		
MDBF_0 (T) [km]	FIT_0 (T) [1E-9/h]	MTBF_0 (T) [h]	MDBF_G (T) [km]	FIT_G (T) [1E-9/h]	MTBF_G (T) [h]
900	462 962 963	2,16	8 000	52 083 333	19,20

Entwurfsverbesserungszeit	Wachstumsrate	Gesamtbetriebsdauer	Gesamtanzahl der verwirklichten Verbesserungen (n.r.)	Laufleistung pro Monat [km] (Annahme)	Tägliche Einschaltdauer [h]
t_D [Monat]	alpha_D	T [Zeitpunkt in Monaten]	D	L [km]	t_active
36	modellspezifisch	36	-	200 000	16

Tabelle 6-4: Annahmen für den Use – Case

6.7 Use – Case: Modell Krasich

Als erstes Modell für ein Zuverlässigkeitswachstum wird das **Modifizierte Potenzgesetzmodell nach Krasich** (siehe 5.1.1) ausgewählt. Dabei handelt es sich um weiterentwickeltes Potenzgesetzmodell. Dies besagt, dass diejenigen Fehler zuerst ausgebessert werden, die sich am stärksten auf die Zuverlässigkeit auswirken. Mithilfe dieses Modells kann geschätzt werden, wie lange es braucht, bis ein Zuverlässigkeitsziel erreicht wird, beziehungsweise, wie viele Verbesserungen am System notwendig sind, um ein gewisses Ziel in einer bestimmten Zeit zu erreichen.

Die Wachstumsrate α_D wird mit 0.3 angenommen. Sie wird nur geschätzt, da auch in Realität keine Erfahrungswerte dafür bekannt sind. Dies entspricht jedenfalls einem moderaten Wachstum, wie es auch in dem Analyseprojekt zu finden war. Wird α_D kleiner angenommen, wird es weniger aggressiv, es hat also nur anfangs einen steilen Anstieg durch Verbesserungsmaßnahmen, wird dann aber sehr flach. Wird α_D höher angenommen, wird die Kurve steiler und linearer. Hier wird die Zuverlässigkeit also ständig gleich stark verbessert (siehe Abbildung 6-16). α_D wird im Idealfall aus Altprojekten berechnet.

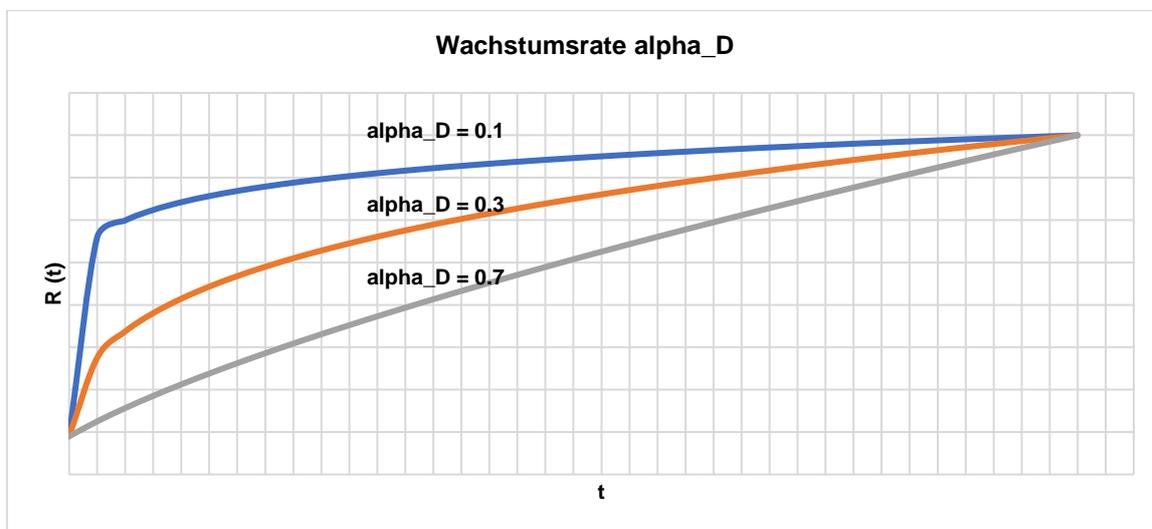


Abbildung 6-16: Wachstumsrate α_D

Die Formeln für die Grundlage der Berechnung findet der interessierte Leser in Abschnitt 5.1.1 (beziehungsweise Gleichungen (3-10), (6-3) und (6-4)).

Tabelle 6-5 zeigt die Ergebnisse der Modellierung. Die Spalte *t* gibt grundsätzlich die Laufzeit an. Die Tabelle teilt sich in 2 Sektionen. Zum einen ist das der *Prognostizierte Verlauf*, der die berechneten Werte *MTBF*, *FIT* und *MDBF* angibt. Der *Tatsächliche Verlauf* stellt einen realen Verlauf aus den Abschnitten 6.4 der Analyse der Felddaten dar. Hier wurden die inhärenten Zuverlässigkeitskurven der ABC – Fehler aus dem Abschnitt Juli 2014 bis Juli 2017 herangezogen (siehe auch Tabelle 6-3).

Zeit <i>t</i> [Monat]	Prognostizierter Verlauf			Tatsächlicher Verlauf*	
	MTBF (t,T) [h]	FIT (t,T) [1E-9/h]	MDBF (t,T) [km]	FIT [1E-9/h]	MDBF [km]
0	2,16	462 962 963	900	275 756 048	894
1	6,60	151 527 784	2 750	261 643 145	1 584
2	8,10	123 528 437	3 373	216 851 478	2 149
3	9,13	109 514 536	3 805	169 909 274	2 769
4	9,95	100 521 061	4 145	167 775 538	3 061
5	10,63	94 046 897	4 430	162 449 597	3 147
6	11,23	89 062 965	4 678	159 929 435	3 209
7	11,76	85 052 999	4 899	176 629 704	2 927
8	12,24	81 723 972	5 098	179 581 893	2 686
9	12,68	78 894 801	5 281	159 202 189	3 713
10	13,08	76 446 374	5 450	130 472 350	5 111
11	13,46	74 296 498	5 608	86 117 512	6 483
12	13,81	72 386 264	5 756	66 549 059	7 528
13	14,15	70 672 129	5 896	66 549 059	7 553
14	14,47	69 121 071	6 028	74 109 543	6 779
15	14,77	67 707 508	6 154	79 368 280	6 398
16	15,06	66 411 247	6 274	81 367 608	6 337
17	15,33	65 216 096	6 389	85 080 645	6 181
18	15,60	64 108 889	6 499	80 544 355	6 649
19	15,85	63 078 788	6 605	73 269 489	7 481
20	16,10	62 116 775	6 708	72 365 707	7 729
21	16,34	61 215 272	6 807	63 612 347	8 786
22	16,57	60 367 855	6 902	59 025 654	9 346
23	16,79	59 569 035	6 995	67 090 170	8 369
24	17,00	58 814 090	7 084	64 432 124	8 753
25	17,21	58 098 928	7 172	62 415 995	8 721
26	17,42	57 419 985	7 256	58 434 140	9 293
27	17,61	56 774 137	7 339	45 665 323	11 049
28	17,81	56 158 633	7 419	42 170 699	11 347
29	17,99	55 571 038	7 498	56 586 022	9 784
30	18,18	55 009 188	7 574	61 122 312	8 882
31	18,36	54 471 153	7 649	61 290 323	8 814
32	18,53	53 955 203	7 722	67 500 720	7 609
33	18,71	53 459 784	7 794	56 613 623	8 281
34	18,87	52 983 492	7 864	60 746 688	7 655
35	19,04	52 525 059	7 933	62 258 785	7 288
36	19,20	52 083 333	8 000	57459677,42	8 314

Tabelle 6-5: Ergebnisse Use - Case: Krasich

Das Modell gibt eine benötigte Anzahl von Verbesserungen *D* an mit 1454 (siehe Tabelle 6-6). Dies entspricht einem Wachstum von 0.3. Im Gegensatz dazu werden die Anzahl der Fehler, welche für die inhärente Zuverlässigkeit zuständig sind, in das Modell eingesetzt. Bei 3500 entdeckten Fehlern erreicht man ein Wachstum von 0.27. Die geschätzten 0.3 klingen also plausibel.

Berechnete Werte für <i>D</i> und α_D	
$\alpha_D = 0.3$	$D = 14\ 000 * 25\% = 3\ 500$
Gesamtanzahl der verwirklichten Verbesserungen <i>D</i>	α_D
1454	0.27

Tabelle 6-6: Berechnung α_D und *D*

Abbildung 6-17 gibt den grafischen Zusammenhang zwischen α_D und D an. Wenn man also etwa nur 1000 Fehler fände und diese beheben würde (was einem Drittel der tatsächlich gefundenen und behobenen Fehler entspricht), würde man auf eine Wachstumsrate von etwa 0.32 kommen.

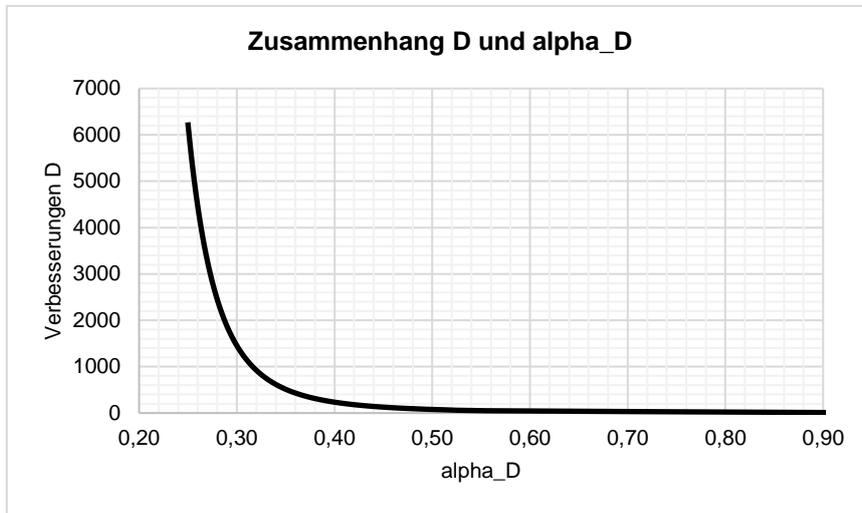


Abbildung 6-17: Zusammenhang α_D und D

Folgende grafische Ergebnisse lassen sich aus angewandten abbilden (Abbildung 6-18 und Abbildung 6-19).

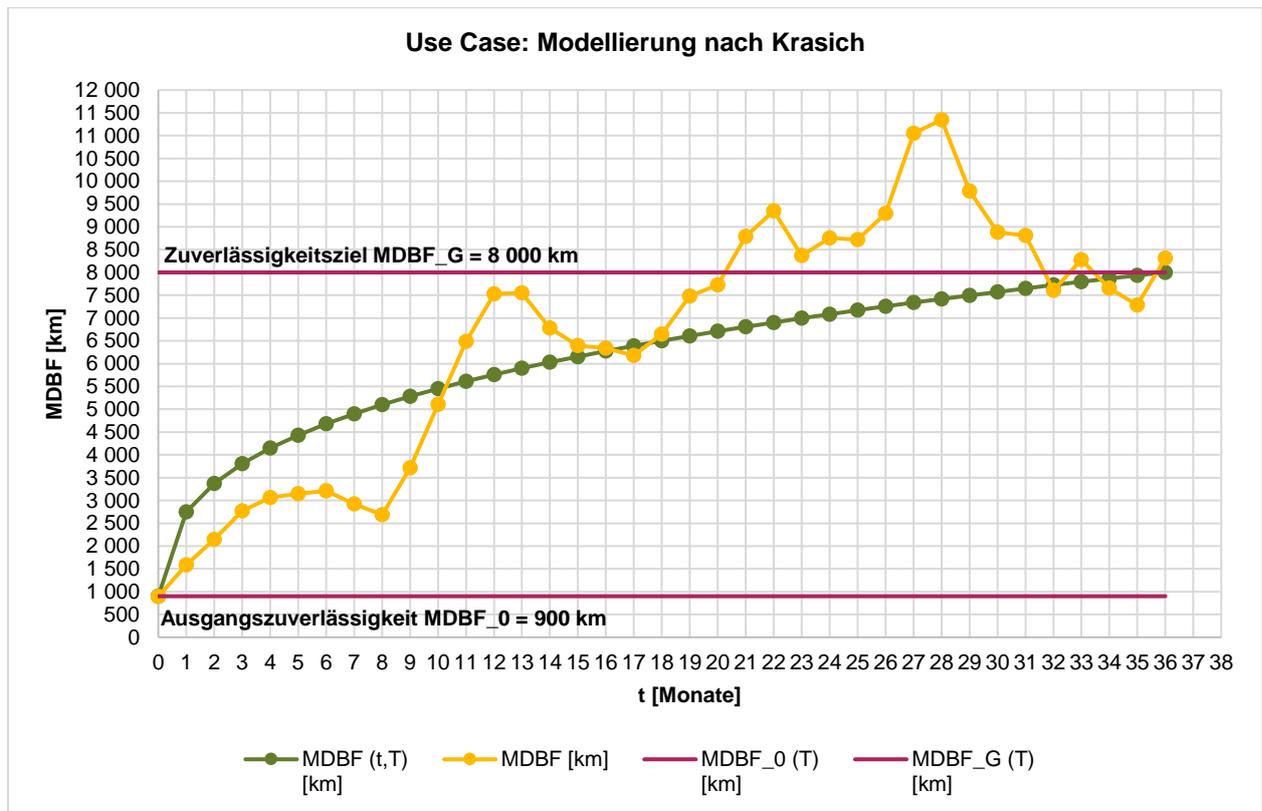


Abbildung 6-18: Use - Case: Krasich MDBF

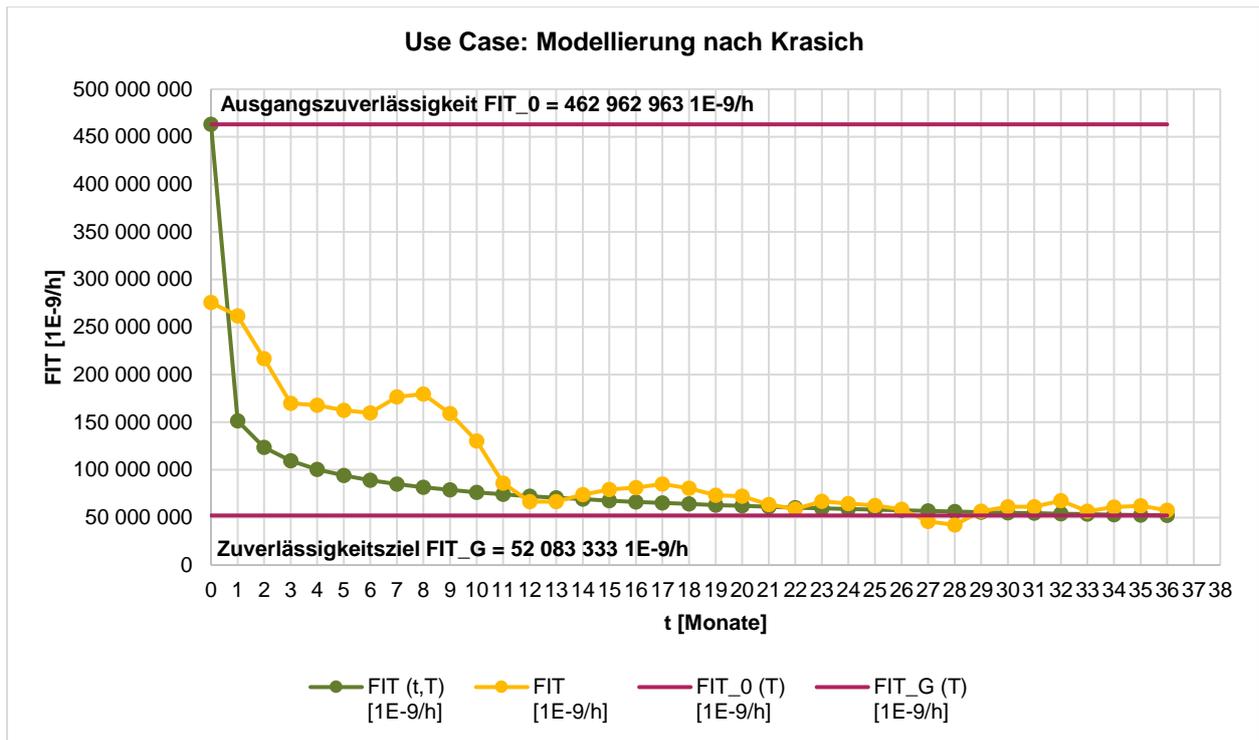


Abbildung 6-19: Use - Case: Krasich FIT

Die beiden Abbildungen zeigen also ein prognostiziertes Zuverlässigkeitswachstum über die Zeitdauer t hinweg. Die grüne Linie zeigt den geplanten Verlauf der $MDBF$ oder FIT Werte. Diese Linie ist beeinflusst durch die Wachstumsrate α_D . Die Form ist aber immer die einer Potenzgesetzkurve. Die Werte wurden wie oben beschrieben, angenommen. Die beiden violetten konstanten Begrenzungen zeigen den Zielwert beziehungsweise den Startwert der Zuverlässigkeit (in $MDBF$ oder FIT). Zusätzlich wurden noch die entsprechenden tatsächlichen Verläufe der $MDBF$ oder FIT – Werte in gelb in die beiden Diagramme mitaufgenommen. Sie belegen eindeutig, dass Zuverlässigkeitswachstum in dem analysierten Projekt auftritt. Dieses Wachstum ähnelt zudem auch noch dem Potenzgesetzmodell, also einer starken Verbesserung zu Beginn der Laufzeit und dann weniger, aber dennoch Wachstum der Zuverlässigkeit.

Natürlich kann in der Realität die Zuverlässigkeit nicht wie in einem idealen Modell steigen, es gibt also noch immer Ausreißer und eine gewisse Schwankung. Dies kann aus verschiedenen Ursachen resultieren. Ungenauigkeiten beim Messen oder Aufnehmen der Störungen, sich gegenseitig beeinflussende Störungen oder andere.

Man erkennt deutlich, dass die gelbe Linie ($MDBF$ oder FIT – Werte) sich einem Ziel nähert und dieses auch erreicht. Daraus kann geschlossen werden, dass Zuverlässigkeitswachstum auftritt, messbar ist und mit dem Modell nach Krasich vorausgesagt werden kann. Vorausgesagt können das **Wachstum** werden, sowie **benötigte zu findende Fehler** und die **Wachstumsrate**. Diese sind direkte Treiber für die Umsetzung in Analysen oder Zuverlässigkeitstestspezifikationen.

6.7.1 Rückblick: Modell nach DUANE

Da das *DUANE*–Modell sehr häufig in der Literatur beschrieben wird und deshalb nicht außer Acht gelassen werden sollte, wird es hier nur kurz angegeben. Für weitere Informationen sei auf geeignete Literatur verwiesen.

Das Modell besagt, dass das Verhältnis zwischen der kumulierten Laufzeit t_{cum} und der Anzahl der angefallenen Fehler $N(t)$ logarithmisch über die kumulierte Laufzeit t_{cum} aufgetragen eine lineare Funktion ergibt (siehe Abbildung 6-20). Mithilfe dieser Funktion lässt sich dann Zuverlässigkeitswachstum über einen unendlichen Zeithorizont voraussagen. Das Modell ist jedoch weniger realitätsnahe als das oben genannte *Krasich* – Modell.

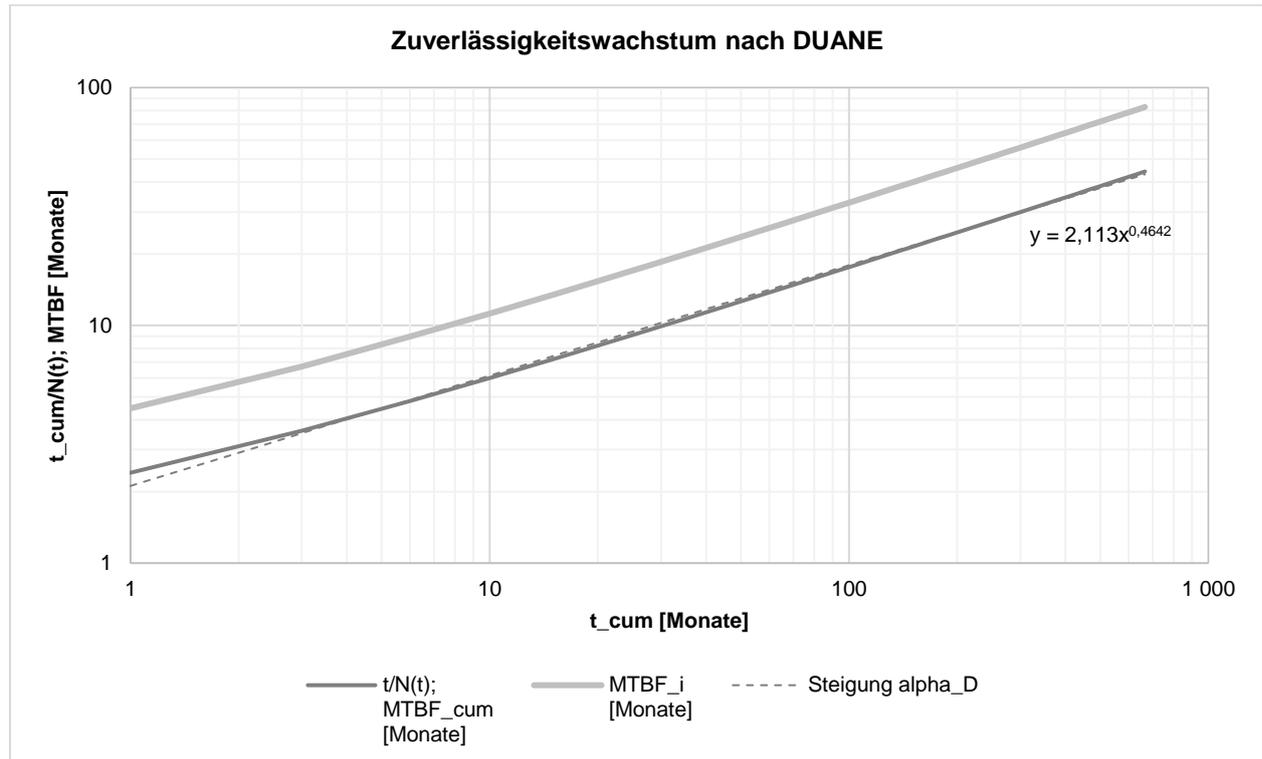


Abbildung 6-20: Zuverlässigkeitswachstumsmodell DUANE

6.8 Use – Case: Modell IBM – Rosner

Das zweite ausgewählte Modell ist das **IBM – Rosner Modell**. Dieses funktioniert ähnlich wie das *Krasich* – Modell, doch es besitzt eine zusätzliche Eigenschaft, die sehr interessant sein könnte. Es handelt sich dabei um einen „Bayes’schen Ansatz“. Es können von Experten Wahrscheinlichkeiten geschätzt werden, die das Auftreten von Ausfällen von definierten Schwachstellen beschreiben. Zudem kann man Fehler auch noch in Fehlerklassen einteilen. Die theoretische Grundlage ist in Abschnitt 5.1.2 beschrieben.

Tabelle 6-7 zeigt die spezifischen Annahmen. Die Anzahl der Fehlerklassen K wird mit 3 definiert. Dabei handelt es sich um die Klassen A, B und C. Die Anzahl der Schwachstellen D wird pro Klasse mit 10 angegeben. Dies wird aus dem Grund so niedrig angenommen, weil die Überlegung dahinter ist, dass rund 10 Komponenten Schwachstellen besitzen. Schwachstellen werden hier also als Komponenten verstanden.

Zusätzlich werden noch die Ausfallraten λ für alle dieser drei Fehlerklassen geschätzt. Sie stammen hier aus der Analyse des Projekts. Da es sich in dem hier beschriebenen Fall nur um die inhärente Zuverlässigkeit handelt und davon ausgegangen wird, dass grundsätzlich nur systematische Schwachstellen behoben werden, also solche, die nachvollziehbar und stimulierbar sind, wird in diesem Fall hier λ_{NS} gleich 0 gesetzt.

Anzahl der Fehlerklassen	Anzahl Schwachstellen pro Fehlerklasse	Ausfallraten nach Klassen (aus FIT Raten der ABC Fehler)			
		lambda_1	lambda_2	lambda_3	lambda_NS
K	D				
3	10	0,006	0,006	0,14	0

Tabelle 6-7: Annahmen IBM - Rosner Modell

Tabelle 6-8 gibt die daraus ermittelte Anzahl der erwarteten Entwurfsschwachstellen η an, die daraus berechnete Zuverlässigkeitswachstumsrate α_D und die notwendige Zeit t_G . η wird geschätzt. Die Zeit t_G ist natürlich 36 Monate, weil es auch zuvor als Parameter t_D angegeben wird.

Erwartete Anzahl an Entwurfsschwachstellen			Zuverlässigkeitswachstumsrate berechnet	Notwendige Zeit berechnet
eta_1	eta_2	eta_3	alpha_D [1]	t_G [Monate]
3,466	2,636	2,626	0,037	36,098

Tabelle 6-8: Erwartete Entwurfsschwachstellen IBM - Rosner Modell

Die Tabelle 6-9 gibt nun die berechneten Werte an. Analog zu der Berechnung nach Modell *Krasich* ergeben sich folgende Spalten: Die Spalte t gibt grundsätzlich die Laufzeit an. Die Tabelle teilt sich in 2 Sektionen. Zum einen ist das der *prognostizierte Verlauf*, der die berechneten Werte *MTBF*, *FIT* und *MDBF* angibt. Der *Tatsächliche Verlauf* stellt einen realen Verlauf aus den Abschnitten 6.4 der Analyse der Felddaten dar. Hier wurden die inhärenten Zuverlässigkeitskurven der ABC – Fehler aus dem Abschnitt Juli 2014 bis Juli 2017 herangezogen (siehe auch Tabelle 6-3).

Zeit t [Monat]	Prognostizierter Verlauf			Tatsächlicher Verlauf*		Annahmen	
	MTBF (t,T) [h]	FIT (t,T) [1E-9/h]	MDBF (t,T) [km]	FIT [1E-9/h]	MDBF [km]	FIT_G (T) [1E-9/h]	MDBF_G (T) [km]
0	9.49	105 400 087	3 953	275 756 048	894	52 083 333	8 000
1	9.85	101571648	4102	261 643 145	1 584	52 083 333	8 000
2	10.22	97 882 077	4 257	216 851 478	2 149	52 083 333	8 000
3	10.60	94 326 622	4 417	169 909 274	2 769	52 083 333	8 000
4	11.00	90 900 314	4 584	167 775 538	3 061	52 083 333	8 000
5	11.42	87 598 464	4 757	162 449 597	3 147	52 083 333	8 000
6	11.85	84 416 549	4 936	159 929 435	3 209	52 083 333	8 000
7	12.29	81 350 214	5 122	176 629 704	2 927	52 083 333	8 000
8	12.76	78 395 259	5 315	179 581 893	2 686	52 083 333	8 000
9	13.24	75 547 641	5 515	159 202 189	3 713	52 083 333	8 000
10	13.74	72 803 458	5 723	130 472 350	5 111	52 083 333	8 000
11	14.25	70 158 955	5 939	86 117 512	6 483	52 083 333	8 000
12	14.79	67 610 511	6 163	66 549 059	7 528	52 083 333	8 000
13	15.35	65 154 636	6 395	66 549 059	7 553	52 083 333	8 000
14	15.93	62 787 968	6 636	74 109 543	6 779	52 083 333	8 000
15	16.53	60 507 266	6 886	79 368 280	6 398	52 083 333	8 000
16	17.15	58 309 408	7 146	81 367 608	6 337	52 083 333	8 000
17	17.80	56 191 385	7 415	85 080 645	6 181	52 083 333	8 000
18	18.47	54 150 297	7 695	80 544 355	6 649	52 083 333	8 000
19	19.16	52 183 349	7 985	73 269 489	7 481	52 083 333	8 000
20	19.89	50 287 848	8 286	72 365 707	7 729	52 083 333	8 000
21	20.64	48 461 199	8 598	63 612 347	8 786	52 083 333	8 000
22	21.41	46 700 901	8 922	59 025 654	9 346	52 083 333	8 000
23	22.22	45 004 544	9 258	67 090 170	8 369	52 083 333	8 000
24	23.06	43 369 805	9 607	64 432 124	8 753	52 083 333	8 000
25	23.93	41 794 446	9 969	62 415 995	8 721	52 083 333	8 000
26	24.83	40 276 310	10 345	58 434 140	9 293	52 083 333	8 000
27	25.76	38 813 319	10 735	45 665 323	11 049	52 083 333	8 000
28	26.74	37 403 469	11 140	42 170 699	11 347	52 083 333	8 000
29	27.74	36 044 831	11 560	56 586 022	9 784	52 083 333	8 000
30	28.79	34 735 543	11 995	61 122 312	8 882	52 083 333	8 000
31	29.87	33 473 814	12 448	61 290 323	8 814	52 083 333	8 000
32	31.00	32 257 916	12 917	67 500 720	7 609	52 083 333	8 000
33	32.17	31 086 183	13 404	56 613 623	8 281	52 083 333	8 000
34	33.38	29 957 013	13 909	60 746 688	7 655	52 083 333	8 000
35	34.64	28 868 859	14 433	62 258 785	7 288	52 083 333	8 000
36	35.95	27 820 230	14 977	57459677.42	8 314	52 083 333	8 000

Tabelle 6-9: Ergebnisse Use - Case: IBM – Rosner

Abbildung 6-21 und Abbildung 6-22 zeigen die grafische Darstellung der berechneten Werte nach Modell *IBM – Rosner*.

Die grüne Kurve gibt den prognostizierten Verlauf des Wachstums (als *MDBF* oder *FIT*) ausgedrückt an. Die beiden violetten Konstanten sind das angegebene Zuverlässigkeitsziel und das prognostizierte maximale Wachstum. Die gelbe Kurve ist der tatsächliche Verlauf der Zuverlässigkeitswerte über 36 Monate hinweg. Dieser ist aus dem Betrachtungszeitraum Juli 2014 bis Juli 2017 aus der Analyse des Altprojektes entnommen.

Man erkennt auch hier in dem *IBM – Rosner* Modell das Wachstum der tatsächlichen Werte. Anders, als beim *Krasich – Modell* werden hier ein Zuverlässigkeitsziel $MDBF_G$ oder FIT_G und auf der anderen Seite ein maximales Wachstum $MDBF(T)$ (oder $FIT(T)$) angegeben. Dieses maximale Wachstum resultiert aus dem mathematischen Modell. Es kommt aus den Schätzungen und den angenommenen Wahrscheinlichkeiten für Ausfälle in den unterschiedlichen Fehlerklassen. Es ist ersichtlich, dass das Zuverlässigkeitsziel erreicht wird, jedoch das maximale Wachstum nicht erreicht wird. Es schießt sozusagen über das Ziel hinaus. Der tatsächliche Verlauf (gelbe Kurve) kann nicht mit der Prognose mithalten. Grundsätzlich wäre dies eine praktische Funktion, sie muss aber noch getestet werden.

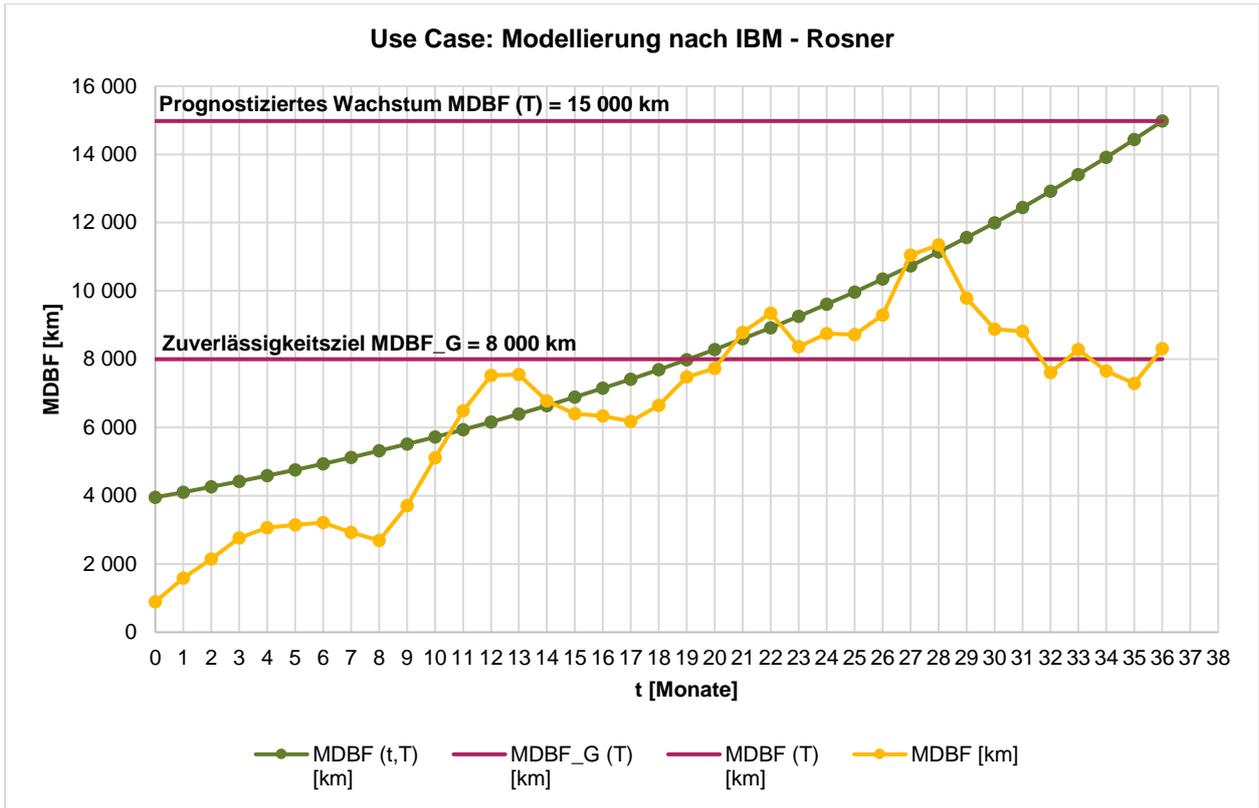


Abbildung 6-21: Use - Case: IBM – Rosner MDBF

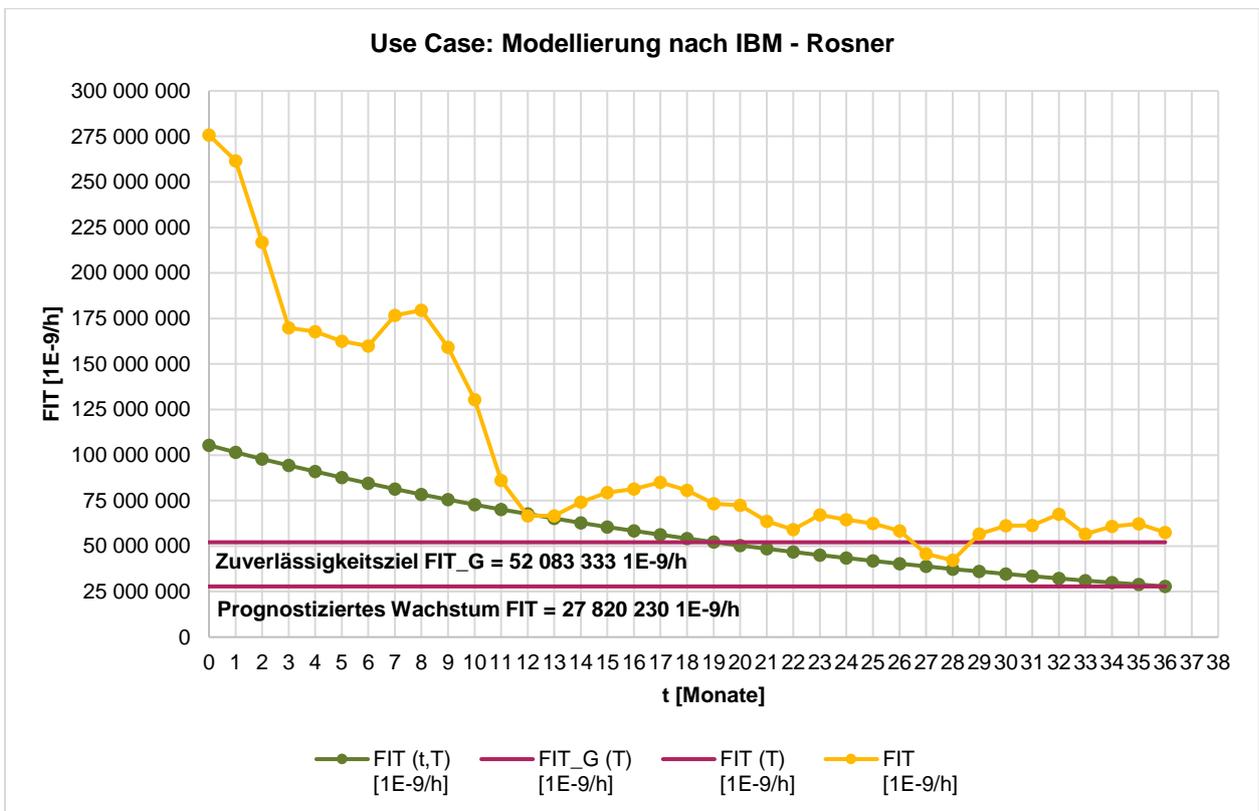


Abbildung 6-22: Use - Case: IBM – Rosner FIT

Der Schluss, der daraus gezogen werden kann ist, dass zum einen, das Modell *IBM – Rosner* möglicherweise schon etwas zu komplex aufgezogen ist. Wahrscheinlichkeiten zu schätzen, die angeben, mit welcher Häufigkeit Fehler aus Schwachstellen resultieren ist nicht mehr trivial und im eigentlichen Entwicklungsprozess zu zeit – und kostenintensiv. Es sind zu viele Parameter und Eingangsvariablen anzugeben, die eine zu hohe Unsicherheit mit sich bringen.

Die zweite Erkenntnis ist, dass klar wird, dass viel Aufwand betrieben werden muss, um gewisse Zuverlässigkeitslevel halten zu können. Ab dem Monat 28 ist im *MDBF* Verlauf zu sehen, dass die Zuverlässigkeit wieder leicht sinkt. Sie ist zwar dennoch höher als das Zuverlässigkeitsziel, doch kann dem prognostizierten Verlauf nicht folgen. Man muss also mit Vorsicht und Erfahrung vorgehen, um tatsächlich prognostizierte Werte erreichen zu können. Je komplexer Modelle werden, desto schwieriger ist es, damit umzugehen.

6.9 Auswertung der Zuverlässigkeitsparameter

Anschließend werden noch die Analysen, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, durchgeführt, um zu testen, ob es sich bei den gemessenen Werte tatsächlich um ein Potenzgesetzmodell handelt und welche Parameter diese Kurven haben könnte. Die Ergebnisse sind gesammelt in Abbildung 6-23 dargestellt.

Nach einer Wachstumsprüfung (siehe Abschnitt 5.2.1) ewren *Typ – I* Berechnungen durchgeführt, die zu dem Ergebnis führen, dass es sich bei den gemessenen Kurven tatsächlich um Zuverlässigkeitswachstum handelt. Dies kann belegt werden durch die Tatsache, dass der Wert $U_I < -u_{1-\frac{\alpha}{2}}$ ist. Der Tabellenwert für $u_{1-\frac{\alpha}{2}}$ ist 1,96. Der Fehler 1. Art wurde mit 5% angenommen. Es ergeben sich die *Formparameter* β_1 und λ_1 . Wenn man dies mit Abbildung 6-16 vergleicht, würde das bedeuten, dass ein nahezu lineares Wachstum vorliegt.

Die Abbildung 6-24 zeigt die *Ausfallintensität* $z(T)$ und den *Mittleren Ausfallabstand* $\theta(T)$. Dies resultiert aus den *Formparametern*, die berechnet wurden und stellen eine modellhafte Anschauung dar. Es kann das charakteristische Verhalten der Zuverlässigkeit widerspiegeln. Es zeigt sich eine eindeutige Verbesserung der Werte über die 36 Monate.

Testzeit	Gesamttestzeit	Anzahl Fehler	U - Wert	Fehler	Kontrollmaß	Summe	Formparameter	
T_i [Monate]	T^* [Monate]	N	U_I	alpha	$u_{97.5}$	S_{II}	beta_1	lambda_1
[1,37]	37	1624	-13,13	5%	1,96	2096	0,77	99,15

Abbildung 6-23: Auswertung Zuverlässigkeitswachstum

Anschließend wird noch ein Anpassungstest, wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben, durchgeführt. Es kann nicht nachgewiesen werden, dass es sich bei den beobachteten Felddaten um eine Verteilung nach dem *Potenzgesetz* handelt. Doch es ist klar, dass dies nicht der Fall sein muss und würde ja implizieren, dass die Verbesserung der Zuverlässigkeit in dem Projekt bereits nach den Vorstellungen des *Potenzgesetzmodells* bewusst gesteuert wurde. Dies würde bedeuten, dass die am stärksten sich auswirkenden Fehler zuerst ausgebessert wurden und nachfolgend die weniger stark störenden Komponenten geändert wurden. Dies ist nicht geschehen. Solch ein systematisches Vorgehen muss noch geplant und gesteuert werden und ist schemenhaft in Kapitel 7 vorgestellt.

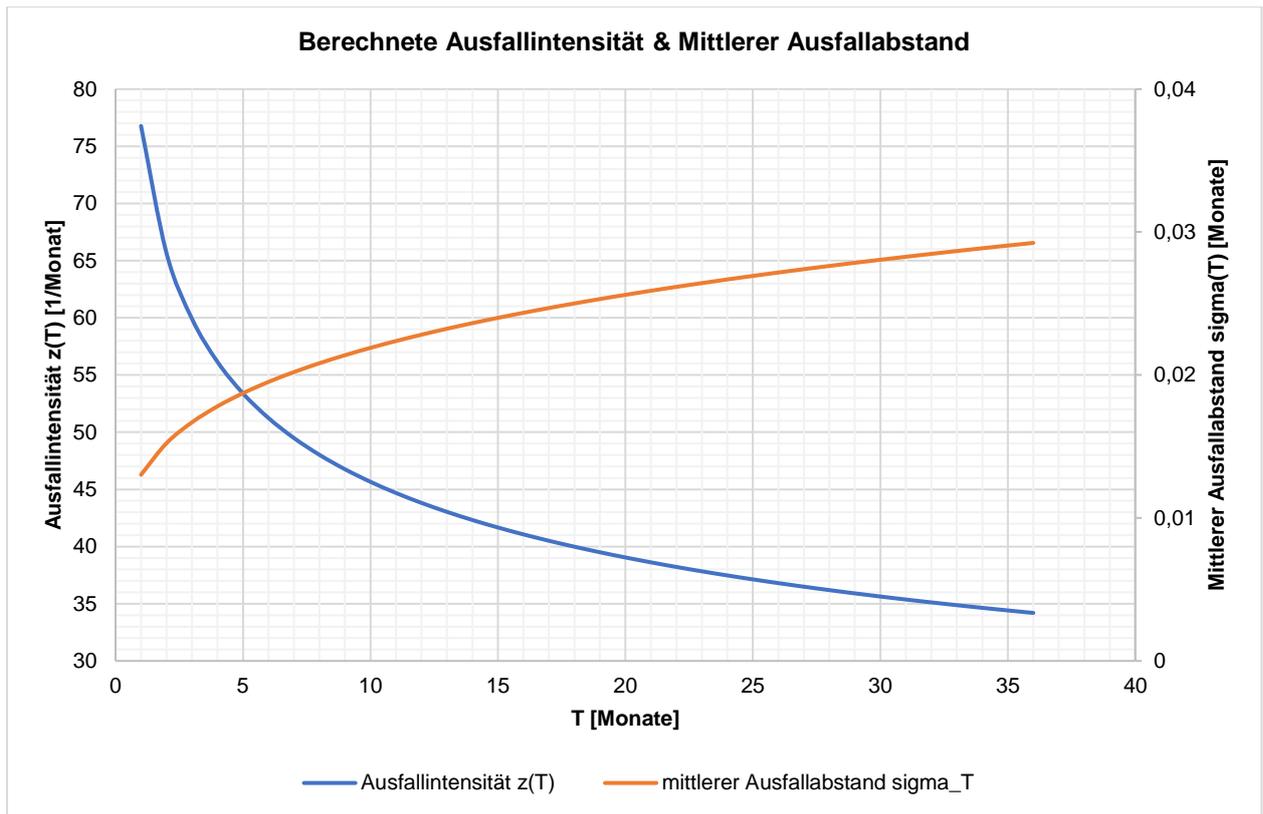


Abbildung 6-24: Ausfallintensität & Mittlerer Ausfallabstand

7 Zuverlässigkeitswachstumsprogramm

Das Konzept für ein Zuverlässigkeitswachstum orientiert sich grundsätzlich am RAM – Prozess, wie in der *EN 50126* (siehe Abschnitt 2.1) beschrieben. Es wird ein Fahrplan erstellt, um ein systematisches und strukturiertes Vorgehen zu erreichen und um Kundenwünschen hinsichtlich Zuverlässigkeitswachstum gerecht zu werden. Die Abbildung 7-1 zeigt das Konzept.

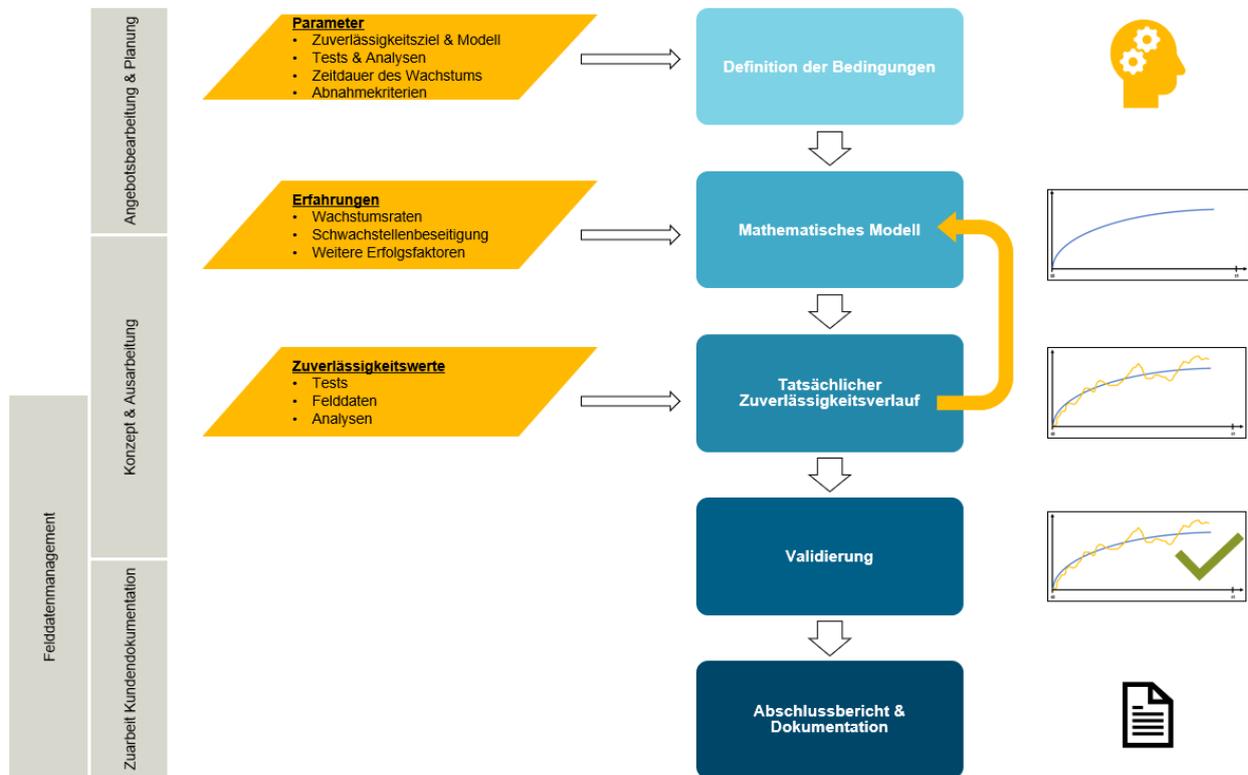


Abbildung 7-1: Zuverlässigkeitswachstumskonzept

Wie bereits erwähnt, orientiert sich dieses Programm an den Phasen der *EN 50126-1* und in weiterer Folge am hausinternen *RAM – Prozess* (siehe Abschnitt 4.1). Um dieser Verknüpfung Ausdruck zu verleihen, sind in der Abbildung 7-1 ganz links die Phasen aus dem *RAM – Prozess* angegeben. Die genaue Verbindung wird noch erläutert. Grundsätzlich geben die blauen Kästchen den Ablauf vor.

Im ersten Schritt (**Definition der Bedingungen**) wird klargestellt, welches Ziel überhaupt erreicht werden soll. Dabei werden notwendige Parameter geklärt. Hierzu zählen ein konkretes, quantitatives Zuverlässigkeitsziel und das zu verwendende Modell. Vom Autor wird das *Krasich – Modell* empfohlen, da es für erste Anwendungen geeignet ist und dementsprechend wenig Eingangsparameter benötigt. Die quantitativen Zuverlässigkeitsziele müssen in einer von beide Parteien akzeptierten Einheit und Höhe vorliegen. Zusätzlich müssen noch die gewünschte Zeitdauer des Wachstums und die Abnahmekriterien festgelegt werden. Diese sind deshalb wichtig, damit es am Ende der Projektlaufzeit zu keinen Missverständnissen zwischen den Vertragspartnern kommt. Des Weiteren werden in diesem ersten Schritt die eingesetzten (Zuverlässigkeits-)Tests und anzufertigende Analysen besprochen. Wie bereits in vorigen Kapiteln erläutert wurde, sind Tests sehr aufwändig und kostenintensiv. Wenn man also vorhat, Zuverlässigkeit in geplanten Testprogrammen zu „ertesten“, so empfiehlt es sich, dies zuvor

mit dem Vertragspartner zu diskutieren. Oft werden Komponententests vom Sublieferanten oder Kunden durchgeführt.

Im zweiten Schritt (**Mathematisches Modell**) wird das gewählte Zuverlässigkeitswachstumsmodell konkret nach den Eingangsparametern durchkalkuliert und Maßnahmen für die Schwachstellenbeseitigung ausgeleitet. Aus Erfahrungen aus Altprojekten können die Wachstumsrate und Strategien zur Schwachstellenbeseitigung festgelegt werden. Dies ist nicht Teil dieser Arbeit.

Im dritten Schritt (**Tatsächlicher Zuverlässigkeitsverlauf**) wird anhand von getesteten Komponenten, Felddaten oder anderen Analysen (FMECA, FTA) ein tatsächlicher Zuverlässigkeitsverlauf mitverfolgt. Hier kann bei der Prognose sofort eingehakt und reagiert werden, falls sich ein gänzlich anderer Verlauf zeigt. Dieser Schritt ist also sehr stark an den zweiten Schritt gekoppelt. Der auftretende Verlauf wird mit dem prognostizierten verglichen und etwaige Maßnahmen können ausgeleitet werden. Dabei müssen auch die Verteilung der auftretenden Fehler kontrolliert und nachgeprüft werden, ob es sich um etwa eine *Potenzgesetzverteilung* handelt. Hier sollte man sich an Abbildung 5-3 orientieren. Sie gibt die Vorgehensweise bei der Analyse des *tatsächlichen Verlaufs* vor.



Abbildung 7-2: Vorgehensweise Zuverlässigkeitswachstumsbewertung

Im vierten und vorletzten Schritt (**Validierung**) handelt es sich um einen Meilenstein. Hier muss nach Absprache mit dem Vertragspartner der tatsächliche Zuverlässigkeitsverlauf mit den Prognosewerten verglichen und bestätigt werden, dass es sich um Zuverlässigkeitswachstum handelt. Wenn dieser Schritt erfolgt ist, hat der Lieferant die Arbeit erledigt und das Zuverlässigkeitsziel erreicht.

Im letzten Schritt fünf (**Abschlussbericht & Dokumentation**) wird angedeutet, dass es auch einen Abschlussbericht und eine Kundendokumentation geben muss. Sämtliche Erkenntnisse, Erklärungen und Schritte sind zusammenfassend zu dokumentieren. Nur was festgeschrieben wurde, gilt auch.

Die Zugehörigkeit zu den Phasen des *RAM – Prozesses* ist hier nicht eindeutig. Es muss in der Praxis erst probiert werden, wie sich die Ablaufschritte des Zuverlässigkeitsprogramms am besten in die Phasen und zwischen Meilensteine eingliedern lassen. Trotzdem ist hier ein Beispiel angegeben, welches plausibel ist. Die Phasen aus dem Prozess wurden auf 4 zusammengefasst. Beginnend mit der *Angebotsbearbeitung & Planung*, in der die Definition des Zieles und ein erstes mathematisches Modell erstellt wird. Dies wird schon in der Angebotslegung benötigt. Im Anschluss werden dann Analysen erstellt und das Zuverlässigkeitswachstum beobachtet. Dies fällt klar in das *Konzept & Ausarbeitung* des Projektes. Die Validierung wird in den Phasen des *Felddatenmanagements* und der *Zuarbeit Kundendokumentation* eingliedert.

8 Diskussion der Ergebnisse

Im letzten Kapitel dieser Diplomarbeit sollen die beschriebenen Themengebiete, Zusammenhänge und vor allem gewonnenen Erkenntnisse diskutiert werden.

Ausgangssituation dieser Arbeit war die Forderung nach inhärentem Zuverlässigkeitswachstum von Schienenfahrzeugen, welches anhand geeigneter Methoden und Prognosen nachgewiesen und geplant werden kann. Dazu wurde in den ersten Teilen der Arbeit eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt. Beginnend mit den wichtigsten Normen, die weitaus nicht alle relevanten Werke behandeln, konnte ein Einblick in die Zuverlässigkeitstechnik und seine Grenzen, Anforderungen und allgemeinen Regeln gegeben werden. Dabei stellt die *EN 50126-1:2017* das wichtigste Dokument dar. Es beschreibt den grundsätzlichen Zusammenhang der Phasen des RAM – Prozesses, welcher auf operativer Ebene als „Fahrplan“ für die ausführenden Ingenieure und Entwickler fungiert. Darüber hinaus ist diese Norm Grundlage für Kundenabnahmen und Gutachten hinsichtlich einer systematischen Zuverlässigkeitsanalyse und derer Nachweisbarkeit. Zusätzlich im ersten Teil wurden noch weitere Normen, auf unterschiedlicher Managementhöhe, angegeben. Besonders hervorzuheben sind dabei noch *DIN EN 61014:2004* und *DIN EN 61164:2004* – die beiden Werke geben eine hilfreiche normative Basis für die Entwicklung und Durchführung von Zuverlässigkeitswachstumsprogrammen an.

Um Zuverlässigkeit konkreter zu definieren und eine Vergleichbarkeit von Werten schaffen zu können, wurden anschließend Begriffe rund um *Zuverlässigkeit*, *Verfügbarkeit*, *Instandhaltung* und in weiterer Folge statistische Werkzeuge, wie *Ausfallwahrscheinlichkeiten* und *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen* betrachtet. Diese spielen eine wesentliche Rolle bei der Betrachtung von Fehlern in Systemen, welche sich auf die Zuverlässigkeit auswirken. Dabei war das Ziel, die notwendigen Werkzeuge bereitzustellen, um im praktischen Teil dieser Arbeit auf plausible und vergleichbare Auswertungen zu kommen. Zusätzlich wurden noch kurze Informationen bezüglich der angrenzenden Themengebiete *Lebenszykluskosten* und *Safety* gegeben.

Darüber hinaus wurden in diesem Kapitel die verschiedenen *Klassifizierungen* und *Arten* von *Fehlern* beschrieben. Diese Einteilungen, wie sich in den späteren analytischen Arbeiten herausstellte, sind essentiell für eine korrekte Auswertung und Basis einer Vergleichbarkeit und Diskussion von Zuverlässigkeitskennwerten. Dabei ist speziell der Unterschied zwischen *zufälligen* und *systematischen* Fehlern herauszuheben und des Weiteren die Definition von *inhärenter Zuverlässigkeit*. Die Literatur spricht stets von ersterer Unterscheidung, im realen Feld gibt es aber eine weitaus feinere Granulierung von Fehlerklassen. In dieser Arbeit wurde nur die *inhärente*, also die direkt an dem System behaftete Zuverlässigkeit, ohne auf äußere Faktoren acht zu geben, betrachtet.

Im nächsten Schritt wurde das Thema *RAM/LCC Management* allgemein beschrieben. Dabei handelt es sich zum einen um den hausinternen Prozess, welcher am Engineering – Prozess verankert ist und die Grundlage für alle auszuführenden Analysen und Tests ist, die in weiterer Folge auch angeführt werden. Dazu zählen wichtige Analysen wie die *FMECA* oder der *Fehlerbaum*, aber auch *Zuverlässigkeitstest*, die in dieser Arbeit nur aufgezählt, aber leider nicht näher betrachtet werden konnten.

Als theoretischen Abschluss bildet die Ausarbeitung der konkreten Werkzeuge für das *Zuverlässigkeitswachstum*. Dabei wurden zuerst die vier wichtigsten Modelle für die Prognose von Zuverlässigkeit beschrieben, von denen zwei im praktischen Teil umgesetzt wurden. Zusätzliche *Wachstumsprüfung*, *Anpassungsprüfung* und Theorie zu *Vertrauensbereichen* wurden angegeben. Außerdem wurde *Softwarezuverlässigkeit* kurz umrissen, doch diese findet in dieser Arbeit keine nähere Betrachtung, denn das hätte den Rahmen dieser Diplomarbeit gesprengt.

Hinsichtlich *Zuverlässigkeitswachstum* in der Literatur bleibt zu erwähnen, dass dieses noch nicht sehr detailliert beschrieben wird. Großteils werden Modelle herangezogen, die schon seit mehreren Jahrzehnten im Einsatz sind und auf einfachsten Überlegungen beruhen – allen voran das *DUANE* – Modell. Auf der anderen Seite tendiert die Prognose von Zuverlässigkeit sehr stark in Richtung der Softwareentwicklung; aufgrund von immer steigender Komplexität von Programmen ist es notwendig Zuverlässigkeit beschreiben und vorhersagen zu können.

Im praktischen Teil dieser Arbeit wurde ein anonymisiertes, „neutralisiertes“ Projekt herangezogen. Zu diesem Projekt, welches seit mehreren Jahren im Einsatz ist, konnten etwa 14.000 Datensätze mit sämtlichen Störungsdaten zur Verfügung gestellt werden. Diese Datensätze beinhalten Informationen zu Ausfallsart, Störungsklasse, Zeitpunkt der Störung und getroffene Maßnahmen. Mithilfe geeigneten Überlegungen und Analysen konnte aus diesen Daten Verhalten der Zuverlässigkeit über die Zeit ermittelt werden. Viele *FIT* und *MDBF* Kurven wurden ausgewertet. Dabei wurde auch auf die Auslöser (Komponenten) von Störungen eingegangen. Ein paar wenige Subsysteme (zum Beispiel: *Türsystem*) verursachen einen Großteil der Fehler. Hier könnten mit geeigneten *Zuverlässigkeitstests* Schwachstellen geprüft werden, die dann rückwirkend in einer Verbesserung des Verhaltens resultieren könnten.

Anschließend wurden zwei Modelle (*Krasich & IBM – Rosner nach Bayes*) zur Modellierung von Zuverlässigkeitswachstum herangezogen und anhand eines Use – Case eine konkrete Prognose erarbeitet. Über eine vorgegebene Laufzeit und Laufleistung sollte, ausgehend von einer geschätzten Anfangszuverlässigkeit, ein Zuverlässigkeitsziel erreicht werden. Die Modelle geben den Verlauf an, welche Zuverlässigkeit über die Zeit erreicht werden kann. Das *Krasich* – Modell beruht auf dem *Potenzgesetzmodell* und benötigt nur ein paar wenige Eingangsparameter. Diese wurden so gewählt, dass sie zum analysierten Projekt passen und ein Vergleich möglich wurde. Obwohl die tatsächlich aufgenommenen Werte stark schwanken, kann mithilfe dieses Modells die Zuverlässigkeit genau vorhergesagt werden. Das Modell nach *IBM – Rosner* stellt eine Weiterentwicklung dar. Es ist für konkrete Anwendung im Entwicklungsprozess weniger geeignet, da es viele spezifische Annahmen benötigt, die nicht vorhanden sind, beziehungsweise schwer zu schätzen sind.

Um den Kreis zu schließen, wurden dann die beiden Modelle (*Krasich & IBM – Rosner*) mit den tatsächlichen Kurven des analysierten Projekts überlagert. Dabei zeigte sich eine sehr starke Ähnlichkeit der beiden Verhalten. Somit konnte gezeigt werden, dass Zuverlässigkeitswachstum bereits Realität ist und dieses auch vorhergesagt werden kann. Voraussetzung dafür sind geeignete Eingangswerte. Diese sind für jedes neue Projekt gesondert zu ermitteln.

Abschließend wurde im letzten Kapitel ein erstes Konzept für die Einbettung eines *Zuverlässigkeitswachstumsprogramms* skizziert und erklärt. Eine starke Orientierung am bereits vorhandenen *RAM* – Prozess muss zwingend sein, denn dieser bildet die Basis für alle anderen

Betrachtungen und eine zusätzliche Betrachtung von *Zuverlässigkeitswachstum* soll möglichst wenig zusätzliche Arbeitsbelastung mitbringen.

Die Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit der Firma Siemens Mobility GmbH gestaltete sich als äußerst spannend und lehrreich. Die Recherchearbeiten in diverser Fachliteratur zeigte bereits die Tiefen dieses jungen Forschungsbereichs, welcher in den verschiedensten Branchen Anwendung findet. Aufgrund von immer höherer Komplexität durch das Zusammenspiel von Software und Hardware folgt eine stärkere Notwendigkeit des Nachweises, dass Systeme oder Produkte stets funktionsbereit sind und keine Ausfälle während des Betriebs zulassen. Aus den vielen Schriften ging hervor, dass hier noch großes Potential steckt, welches erst zu einem kleinen Teil erarbeitet wurde.

Der praktische Teil mit der Analyse eines realen Projekts zeigte, welche Hindernisse abseits theoretischen Definitionen auftreten können und wie diese gelöst werden können. In der realen Welt muss fundiertes fachliches Wissen mit praktischen Ansätzen gepaart werden, um herausragende Produkte auf den Markt zu bringen. Die Datenanalyse konnte viel zum Lerneffekt hinsichtlich inhaltlichem Fachwissen beitragen. Die Interpretation der Kurven führte zu neuen Erkenntnissen und konnte gesammelt in einem Konzept niedergeschrieben werden.

8.1 Ausblick auf weitere Themen im Zusammenhang mit Zuverlässigkeitswachstum

Da die Themengebiete *Zuverlässigkeitsmanagement* und *Zuverlässigkeitswachstum* an viele Schnittstellen grenzen, sollen hier folgende mögliche Themengebiete angeführt werden, die in dieser Diplomarbeit nicht behandelt wurden, aber in möglichen weiteren Arbeiten untersucht werden können.

Sie bilden einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen im Bereich der *Zuverlässigkeit* von technischen Systemen und sollten nicht außer Acht gelassen werden, denn sie sind für ein Erreichen von hohen, ambitionierten Zielen notwendige Schlüsselfaktoren.

- Machbarkeit und wirtschaftliche Effizienz von geeigneten und notwendigen Zuverlässigkeitstests
- Ausarbeitung von konkreten Prüfprogrammen für Zuverlässigkeitstests
- Betrachtung, Beschreibung und Vermeidung von Serienfehlern
- Wachstumsraten von Zuverlässigkeit auf Komponenten- oder Plattformebene
- Untersuchung von Methoden zur Softwarezuverlässigkeitsprognose
- Definierte Kopplung eines Zuverlässigkeitswachstumsprogramm an den RAM/LCC – Prozess

Literaturverzeichnis

- [1] EN 50126-1:2017, *Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) - Part 1: Generic RAMS Process.*
- [2] DIN EN 60300-1:2015, *Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 1: Leitfaden für Management und Anwendung.* .
- [2] DIN 27200:2011-11, *Zustand der Eisenbahnfahrzeuge - Grundsätze und Begriffe für den betriebssicheren Zustand.*
- [3] DIN EN 61014:2004-02, *Programme für das Zuverlässigkeitswachstum (IEC 61014:2003).*
- [4] DIN EN 61164:2004-11, *Zuverlässigkeitswachstum - Statistische Prüf- und Schätzverfahren (IEC 61164:2004).*
- [6] ISO 31000:2018, *Risk management - Guidelines.*
- [7] ISO 9001:2015, *Quality management systems - Requirements.*
- [8] DIN EN ISO 14001:2015-11, *Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 14001:2015).*
- [5] ISO 45001:2018, *Occupational health and safety management systems - Requirements with guidance for use.*
- [10] A. Avizienis, J.-C. Laprie, B. Randell, und C. Landwehr, „Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing“, *IEEE transactions on dependable and secure computing*, Bd. 1, Nr. 1, S. 11–33, 2004.
- [9] DIN 27200:2011, *Zustand der Eisenbahnfahrzeuge - Grundsätze und Begriffe für den betriebssicheren Zustand - Beiblatt 1: Übersicht des Gesamtwerkes.*
- [12] Alan Calder, *ISO27001/ISO27002: Ein Taschenführer.* Ely, IRELAND: IT Governance Publishing, 2017.
- [13] M. Hinsch, *Die neue ISO 9001:2015 - Status, Neuerungen und Perspektiven.* Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [14] H. Franke, „Das Qualitätsmanagement-System nach DIN EN ISO 9001“, *Auflage Renningen*, 2005.
- [15] H. Brüggemann und P. Bremer, *Grundlagen Qualitätsmanagement: von den Werkzeugen über Methoden zum TQM*, 2., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [16] G. Förtsch und H. Meinholz, *Handbuch Betriebliches Umweltmanagement*, 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [17] International Organization for Standardization, Hrsg., „ISO/TC 283 - Occupational health and safety management systems - <https://committee.iso.org/home/pc283>“, Okt. 2018.
- [18] A. Birolini, *Reliability engineering*, Bd. 5. Springer, 2007.
- [19] J. Lienig und H. Brümmer, *Elektronische Gerätetechnik: Grundlagen für das Entwickeln elektronischer Baugruppen und Geräte.* Berlin: Springer Berlin, 2014.
- [20] E. Calixto, *RAMS and LCC Engineering for Railway Industry: Analysis, Modelling and Optimization*, 1. Aufl. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2018.
- [21] „Research and Markets Adds New Report: Predictive Maintenance Market Report 2017-22“, *Professional Services Close - Up*, Aug. 2017.
- [22] DIN EN 61703:2017, *Mathematische Ausdrücke für Begriffe der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft (IEC 61703:2016).* .
- [23] Siemens Standard SN 29500-1, *Ausfallraten Bauelemente – Erwartungswerte, Allgemeines.* .
- [24] DIN EN ISO 12100, *Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung (ISO 12100:2010).* .
- [25] N. Bloom, *Reliability centered maintenance (RCM): implementation made simple.* New York: McGraw-Hill, 2006.
- [26] G. Kemnitz, *Test und Verlässlichkeit von Rechnern.* Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [27] DIN 60300-3-3:2005, *Zuverlässigkeitsmanagement, Teil 3-3: Anwendungsleitfaden Lebenszykluskosten.* .

- [28] C. Schindler, Hrsg., *Handbuch Schienenfahrzeuge*, 1. Hamburg: DVV Media Group GmbH, 2014.
- [29] S. Eberlin und B. Hock, *Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [30] Q. Mahboob und E. Zio, Hrsg., *Handbook of RAMS in railway systems*. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2018.
- [31] „Siemens Mobility GmbH - Interne Information“, 2018.
- [32] L. Felsberger, D. Kranzlmüller, und B. Todd, „Field-Reliability Predictions Based on Statistical System Lifecycle Models“, in *International Cross-Domain Conference for Machine Learning and Knowledge Extraction*, 2018, S. 98–117.
- [33] H. Pham, *System software reliability*. Berlin ; London: Springer, 2006.
- [34] D. R. S. Prasad, K. P. Rao, und G. K. Mohan, „Software Reliability using SPRT: Inflection S- shaped Model“, Bd. 2, Nr. 6, S. 7, 2013.
- [35] T. A. Runkler, *Data analytics: models and algorithms for intelligent data analysis*. Wiesbaden ; New York: Springer Vieweg, 2012.
- [36] VDV 166-3:2014, *Anforderungen an die Fahrzeugsteuerung von Stadt- und U-Bahn-Fahrzeugen, Teil 3: System zur Diagnosemeldung* .

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Ebenen der Normen	8
Abbildung 2-2: Managementaspekte.....	9
Abbildung 2-3: Einflussfaktoren von RAMS [1, S. 29].....	10
Abbildung 2-4: RAMS - Management V – Zyklus [1, S. 39]	12
Abbildung 2-5: Dependability Tree [10, S. 4].....	13
Abbildung 2-6: Bedürfnisse und Anforderungen an eine Einheit [2, S. 11].....	14
Abbildung 2-7: Zuverlässigkeitswachstum durch schrittweise Verbesserung [4, S. 19]	16
Abbildung 2-8: Managementaspekte Zuverlässigkeitsprogramm [4, S. 21]	16
Abbildung 2-9: ISO 31000:2018 Kontrollfunktion.....	18
Abbildung 2-10: Teile der ISO 31000:2018	18
Abbildung 2-11: ISO 31000:2018 Prozess [6]	19
Abbildung 2-12: ISO 31000:2018 Framework [6].....	19
Abbildung 2-13: ISO 31000:2018 Richtlinien [6].....	20
Abbildung 2-14: Deming – Zyklus ISO 14001:2015 [16, S. 89].....	22
Abbildung 2-15: ISO 45000:2018 Zyklus [17]	23
Abbildung 3-1: Überlebenswahrscheinlichkeit [19, S. 53].....	24
Abbildung 3-2: Instandhaltungsmaßnahmen [20, S. 145].....	26
Abbildung 3-3: Ausfalldichte [19, S. 53].....	27
Abbildung 3-4: Ausfallrate [19, S. 53].....	27
Abbildung 3-5: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen im Vergleich [20, S. 213].....	28
Abbildung 3-6: Exponentielle WDF (links) und Ausfallrate (rechts) [20, S. 224].....	29
Abbildung 3-7: Normalverteilte WDF (links) und Ausfallrate (rechts) [20, S. 230]	30
Abbildung 3-8: Lognormalverteilte WDF (links) und Ausfallrate (rechts) [20, S. 234].....	31
Abbildung 3-9: Gumbel WDF (links) und Ausfallrate (rechts) [20, S. 237].....	32
Abbildung 3-10: Mixed Weibull Ausfallwahrscheinlichkeit [20, S. 246].....	33
Abbildung 3-11: Zuverlässigkeitskennwerte Zusammenhang [1, S. 88].....	34
Abbildung 3-12: Lebenszyklus [29, S. 8]	37
Abbildung 3-13: Lebenszykluskosten	38
Abbildung 3-14: Badewannenkurve [31, S. 188].....	39
Abbildung 3-15: Verbesserte Badewannencharakteristik [20, S. 78]	39
Abbildung 4-1: Siemens Produktentstehungszyklus [33].....	41
Abbildung 4-2: RAM – Prozess [33]	43
Abbildung 4-3: Vorgangsweise FME(C)A	45
Abbildung 4-4: Fehlerbaumanalyse (FTA) [19, S. 76].....	45
Abbildung 4-5: Ishikawa Diagramm [19, S. 77].....	46
Abbildung 4-6: Stresslevel HALT [21, S. 288]	47
Abbildung 4-7: Temperaturprofil HALT Elektronikkomponente [21, S. 289].....	47
Abbildung 5-1: Geplantes und erzieltes Zuverlässigkeitswachstum [5, S. 38]	53
Abbildung 5-2: Beispiel Wachstumsmodell nach Bayes [5, S. 39]	54
Abbildung 5-3: Vorgehensweise Zuverlässigkeitswachstumsbewertung	57
Abbildung 5-4: Kritische Werte 10 % Signifikanzniveau [5, S. 33]	60
Abbildung 5-5: Zusammenhang Faults & Failure [35, S. 2]	64
Abbildung 5-6: Fehlerrate von Software [21, S. 320]	64
Abbildung 5-7: S - Shaped Modell.....	66
Abbildung 5-8: Zusammenhang LDA	67
Abbildung 5-9: Einflussfaktoren menschlicher Fehler [21, S. 340].....	69

Abbildung 6-1: Vorgehensweise bei der Datenanalyse [37, S. 3]	71
Abbildung 6-2: Screenshot Umfang Felddaten	72
Abbildung 6-3: Eingesetzte Züge vs. Flottenkilometer	74
Abbildung 6-4: Laufleistung pro Monat vs. Flottenkilometer	75
Abbildung 6-5: Primärschlüssel	76
Abbildung 6-6: Vorgehensweise Sortieren der Fehler	76
Abbildung 6-7: Fehlerklassen ABCD	77
Abbildung 6-8: FIT & MDBF (ABCD)	78
Abbildung 6-9: Verteilung betriebsrelevante Fehlerklassen	79
Abbildung 6-10: FIT (ABC)	80
Abbildung 6-11: MDBF (ABC)	80
Abbildung 6-12: Trennung inhärente und serielle Fehler	81
Abbildung 6-13: FIT (Inhärente Fehler, ABC)	82
Abbildung 6-14: MDBF (Inhärente Fehler, ABC)	82
Abbildung 6-15: Paretodiagramm Auswirkung auf Zuverlässigkeit	84
Abbildung 6-16: Wachstumsrate α_D	86
Abbildung 6-17: Zusammenhang α_D und D	88
Abbildung 6-18: Use - Case: Krasich MDBF	88
Abbildung 6-19: Use - Case: Krasich FIT	89
Abbildung 6-20: Zuverlässigkeitswachstumsmodell DUANE	90
Abbildung 6-21: Use - Case: IBM – Rosner MDBF	93
Abbildung 6-22: Use - Case: IBM – Rosner FIT	93
Abbildung 6-23: Auswertung Zuverlässigkeitswachstum	94
Abbildung 6-24: Ausfallintensität & Mittlerer Ausfallabstand	95
Abbildung 7-1: Zuverlässigkeitswachstumskonzept	96
Abbildung 7-2: Vorgehensweise Zuverlässigkeitswachstumsbewertung	97

Formelverzeichnis

(3-1) Zuverlässigkeit/Überlebenswahrscheinlichkeit	24
(3-2) Mittlere Lebensdauer	25
(3-3) Verfügbarkeit allgemein	25
(3-4) Verfügbarkeit	25
(3-5) Dauerverfügbarkeit	25
(3-6) Ausfallwahrscheinlichkeit	27
(3-7) Ausfalldichte	27
(3-8) Ausfallrate	27
(3-9) Exponentielle Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	29
(3-10) Exponentielle Überlebenswahrscheinlichkeit	29
(3-11) Exponentielle Ausfallrate	29
(3-12) Normale Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	30
(3-13) Lognormale Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion.....	30
(3-14) Gumbel Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion.....	31
(3-15) Weibull Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion.....	32
(3-16) Gemischte Weibull Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion.....	32
(3-17) MTBF & MTTF	34
(3-18) MTBF allgemein	34
(3-19) Verfügbarkeit allgemein	35
(3-20) Umrechnung FIT zu MDBF	35
(3-21) Risiko	36
(4-1) Losgröße QALT	48
(5-1) Ausfallrate	51
(5-2) Anfangsausfallrate	51
(5-3) Anzahl der Verbesserungen	51
(5-4) Zielausfallrate	52
(5-5) Gesamtanzahl der Verbesserungen	52
(5-6) Zuverlässigkeitswachstumsrate	52
(5-7) Allgemeiner Zusammenhang Fehlerrate & Zuverlässigkeit	52
(5-8) Modifiziertes Potenzgesetzmodell	52
(5-9) Erwartete Anzahl Schwachstellen.....	53
(5-10) Anfangszuverlässigkeit	54
(5-11) Zuverlässigkeitswachstum	54
(5-12) Wachstumsrate.....	54
(5-13) Geschätzte Zeitdauer	54
(5-14) Erwartete Anzahl Ausfälle.....	55
(5-15) Ausfallintensität	55
(5-16) Mittlerer Ausfallabstand	55
(5-17) Änderungsrate	55
(5-18) Erwartete Anzahl Ausfälle.....	55
(5-19) Fehlerfreie Teile.....	55
(5-20) Zeitpunkt fehlerfreie Teile	56
(5-21) Mittlerer Ausfallabstand	56
(5-22) Kumulierte Anzahl an Versuchen.....	56
(5-23) Ausfallwahrscheinlichkeit.....	56
(5-24) Erwartete Anzahl Ausfälle.....	56

(5-25) Schätzung Skalenparameter & Formparameter	56
(5-26) Ausfallwahrscheinlichkeit & Zuverlässigkeit	57
(5-27) Kenngröße U	58
(5-28) Kriterium Zuverlässigkeitswachstum	58
(5-29) Summe	58
(5-30) Schätzung Formparameter	58
(5-31) Schätzung Ausfallrate	59
(5-32) Schätzung Ausfallrate & Mittlerer Ausfallabstand	59
(5-33) Gesamtanzahl Ausfälle	59
(5-34) Kriterium Intervalle	59
(5-35) Kenngröße Chi – Quadrat	59
(5-36) Kritischer Wert	59
(5-37) Schätzung Formparameter	59
(5-38) Schätzung Ausfallrate, Ausfallintensität, Mittlerer Ausfallabstand	60
(5-39) Cramér – von – Mises Kenngröße	60
(5-40) Erwartete Anzahl Ausfälle	61
(5-41) Chi – Quadrat Kenngröße	61
(5-42) Vertrauensbereich Formparameter Fall 1 Typ 1	61
(5-43) Vertrauensbereich Formparameter Fall 1 Typ 2	62
(5-44) Vertrauensbereich Formparameter Fall 2	62
(5-45) Fehlerrate Jelinski & Moranga – Modell	65
(5-46) Zuverlässigkeit Jelinski & Moranga – Modell	65
(5-47) Mittelwert S – Shaped – Modell	66
(5-48) Fehlerrate S – Shaped – Modell	66
(5-49) Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Fehlers	68
(6-1) MDBF monatlicher Verlauf (ABCD)	78
(6-2) FIT monatlicher Verlauf (ABCD)	78
(6-3) Umrechnung MDBF → FIT	85
(6-4) Umrechnung FIT → MTBF	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Begriff RAMS (deutsch/englisch)	9
Tabelle 2-2: Gesamtwerk DIN 27200:2011 [11].....	15
Tabelle 2-3: DIN EN 61164:2004 Kategorien Wachstumsmodelle [5, S. 12]	17
Tabelle 3-1: Präventive IH – Kategorien [21].....	26
Tabelle 3-2: Zuverlässigkeitskennwerte [1, S. 86]	33
Tabelle 3-3: Englische Risikobegriffe	36
Tabelle 5-1: Kennwerte je nach Testtyp	60
Tabelle 5-2: Arten von menschlichen Fehlern [21, S. 337]	69
Tabelle 6-1: Erklärung der Spalten.....	73
Tabelle 6-2: Theoretische Randbedingungen Felddaten	73
Tabelle 6-3: Annahmen für die Analyse	77
Tabelle 6-4: Annahmen für den Use – Case	86
Tabelle 6-5: Ergebnisse Use - Case: Krasich.....	87
Tabelle 6-6: Berechnung α_D und D	87
Tabelle 6-7: Annahmen IBM - Rosner Modell.....	91
Tabelle 6-8: Erwartete Entwurfsschwachstellen IBM - Rosner Modell	91
Tabelle 6-9: Ergebnisse Use - Case: IBM – Rosner	92

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Deutscher Begriff	Englischer Begriff
A	Verfügbarkeit	Availability
AMS	Arbeitsschutzmanagementsystem	Occupational Health and Safety Assessment system (OHSAS)
CBM	Zustandsgesteuerte Instandhaltung	Condition-based Maintenance
CM	Korrektive Instandhaltung	Corrective Maintenance
DIN	Deutsches Institut für Normung	German Institute for Standardization
EN	Europäische Norm	N/A
FA	Flottenverfügbarkeit	Fleet Availability
FC	-	Fault Coverage
FIT	Ausfall pro Zeiteinheit	Failure In Time
FM	-	Fisher – Matrix
FME(C)A	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse	Failure Mode Effects and Criticality Analysis
FRACAS	Fehlerreportanalyse- und Wartungssystem	Failure Report Analysis and Corrective Action System
FTA	Fehlerbaumanalyse	Fault Tree Analysis
HALT	Stark beschleunigte Grenzlastprüfung	High Accelerated Life Test
HASS	Belastungsschnellprüfung	High Accelerated Stress Screen
HRA	Menschliche Zuverlässigkeitsanalyse	Human Reliability Analysis
IH	Instandhaltung	Maintenance
ISO	Internationale Organisation für Normung	International Organization for Standardization
LCC	Lebenszykluskosten	Life Cycle Costs
LDA	Ereigniszeitanalyse	Lifetime Data Analysis
MDT	-	Mean Down Time
MEOST	Mehrfachumwelteinflusslastprüfung	Multiple Environment Over Stress Testing
MRT	-	Mean Repair Time
MTBF	-	Mean Time Between Failures
MTBM	-	Mean Time Between Maintenance
MTTF	-	Mean Time To Failure
MTTM	-	Mean Time To Maintain
MTTR	-	Mean Time To Restore
MUT	-	Mean Up Time
n.r.	nicht relevant	not relevant
OEE	Gesamtanlageneffektivität	Overall Equipment Efficiency
PDCA	Planen – Umsetzen – Überprüfen – Handeln	Plan – Do – Check – Act
PDF	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	Probability Density Function
PdM	Prädiktive Instandhaltung	Predictive Maintenance
PM	Präventive Instandhaltung	Preventive Maintenance
PsM	Präskriptive Instandhaltung	Prescriptive Maintenance
QALT	Beschleunigte Grenzlastprüfung	Quantitative Accelerated Life Test
QM	Qualitätsmanagement	Quality management
R	Zuverlässigkeit	Reliability
RAM	Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit	Reliability, Availability, Maintainability

RAMS	Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit	Reliability, Availability, Maintainability, Safety
RC	-	Repair Coverage
RCA	Fehler – Ursachen – Analyse	Root Cause Analysis
RGA	Zuverlässigkeitswachstumsanalyse	Reliability Growth Analysis
RTF	-	Run – to – failure
TOA	Thermische Überlastungsanalyse	Thermal Overstress Analysis
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik	N/A
VIM	Verzeichnis der Instandhaltungsmaßnahmen	N/A
WCA	-	Worst Case Analysis
WDF	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	Probability Density Function

